



FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO

“BRECHAS DE RENDIMIENTO EN SOJA: FACTORES DETERMINANTES, MECANISMOS RESPONSABLES Y MANEJO AGRONÓMICO PARA REDUCIRLAS”

Guido Di Mauro

Ingeniero Agrónomo – Universidad Nacional de Rosario - Doctorando

Tesis para optar para el título de Doctor en Ciencias Agrarias

Fernando Salvagiotti

Doctor of Philosophy – University of Nebraska – Director

José Luis Rotundo

Doctor of Philosophy –Iowa State University – Codirector

2021

**BRECHAS DE RENDIMIENTO EN SOJA: FACTORES DETERMINANTES,
MECANISMOS RESPONSABLES Y MANEJO AGRONÓMICO PARA REDUCIRLAS**

Guido Di Mauro

Ingeniero Agrónomo – Universidad Nacional de Rosario

Esta Tesis es presentada como parte de los requisitos para optar al grado académico de Doctor en Ciencias Agrarias, de la Universidad Nacional de Rosario y no ha sido previamente presentada para la obtención de otro título en ésta u otra Universidad. La misma contiene los resultados obtenidos en experimentos y análisis llevados a cabo para la zona Central de Argentina, durante el período comprendido entre abril del 2015 y julio del 2020, bajo la dirección de Fernando Salvagiotti y la codirección de José Luis Rotundo.

Guido Di Mauro

Doctorando

Fernando Salvagiotti

Director

José Luis Rotundo

Codirector

Defendida el 18 de junio del 2021.

AGRADECIMIENTOS

A José Luis Rotundo, por marcarme profesionalmente para el resto de mi carrera. Por incentivar constantemente mi curiosidad, por aconsejarme durante todos estos años, y guiarme a pesar de los contratiempos.

A Fernando Salvagiotti, por su inmensurable predisposición y honestidad, por su constante ayuda y opinión sincera durante todos estos años.

A Lucas Borrás, por la gran oportunidad de trabajar dentro de su equipo de investigación. Por convertirse en un gran sustento durante este proceso. Por sus valiosos aportes al Capítulo IV de esta tesis.

A Santiago Gallo por darme la oportunidad de interactuar con productores y asesores de la Región CREA Sur de Santa Fe sobre los hallazgos presentados en los Capítulos II y III de esta tesis.

A Pablo Cipriotti, por su valiosa ayuda en el análisis espacial realizado en el Capítulo II de esta tesis doctoral.

A Brenda Gambin, por hacerse parte en cada situación que la necesité, por su constante apoyo desinteresado. Por su colaboración en el análisis exploratorio de datos realizado en el Capítulo III de esta tesis.

A Octavio Caviglia, Federico Bert y Álvaro Quijano, por evaluar esta tesis doctoral. Por sus valiosos comentarios, sugerencias y correcciones en la primera versión de este manuscrito.

A Tomás Bustillo, Diego H. Pérez, Santiago Morin, Germán Baroli, Cristian Natali, Darío Barth, Federico Sorenson, Adrián Rovea, Ricardo Pozzi, Federico Sampaoli, Franco Permingeat, Pablo Bressa, Luciano Ascheri y Agustín Fernández de AACREA por su colaboración fundamental en la recopilación de la base de datos de producción y por su espíritu crítico de los resultados del Capítulo II.

A los productores agropecuarios y asesores de la Región CREA Sur de Santa Fe, en especial a Miguel Boxler, Maximiliano Berardi, Ricardo Pozzi, Diego H. Pérez, Agustín Fernández, Franco Permingeat, Santiago Morin, Marcelo Tombetta, Santiago Gallo, Adrián Barrau y Enrique Scrimaglio por proporcionar los establecimientos productivos y financiar las actividades experimentales relacionadas al Capítulo III de esta tesis.

A Santiago Tamagno, Fernando Hernández, Santiago Álvarez Prado, Giuliana Gizzi, Agustina Amelong, Guillermo Ravera, Matías de Felipe, Gabriel Santachiara, Florencia Poeta, Lucas Vitantonio, Lucas Abdala, Nancy Caballero, Gonzalo Parra, Ezequiel Saenz, Ana Carcedo, Tomás Coyos, Andrés Madias, Florencia Accame, Florencia Buldain, Joel Spinozzi, Damián Gómez y Federico Larrosa, por su gran amistad.

A Alicia Condori, Ariel Insaurraldi, Omar Medina, Diego Uliassi, Juan Enrico, Silvina Bacigaluppo, Facundo Ramirez y Cecilia Moyano por su invaluable ayuda en las mediciones a campo relacionadas al Capítulo III de la presente tesis doctoral.

A los estudiantes de la asignatura “Sistemas de Cultivos Extensivos: Cereales y Oleaginosas” de la carrera Ingeniería Agronómica de la UNR, por su gran ayuda en las actividades de campo relacionadas al Capítulo IV de esta tesis doctoral.

A José Gerde, por su apoyo en las determinaciones de laboratorio relacionadas al Capítulo IV de esta tesis doctoral.

A Pablo Rugeroni y Syngenta Agro S.A. por financiar parcialmente el proyecto relacionado al Capítulo IV de esta tesis doctoral.

A la Fundación Nuevo Banco de Santa Fe por financiar parcialmente el proyecto relacionado al Capítulo IV de esta tesis doctoral.

Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas por la beca otorgada, permitiéndome dedicación exclusiva a las actividades experimentales de este proyecto.

A la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Rosario, al Instituto de Investigaciones en Ciencias Agrarias de Rosario y a la Estación Experimental Agropecuaria INTA Oliveros, por brindarme sus instalaciones para desarrollar las actividades relacionadas a esta tesis.

A mi compañera Lina, mis padres Norma y Carlos, y mis hermanos Bruno y Adriano, por ser el soporte incondicional en todos mis proyectos.

DEDICATORIA

*“A mi tía Cata,
por ser el ejemplo que guía mi vida”*

PUBLICACIONES PRINCIPALES DERIVADAS DE ESTA TESIS

Trabajos científicos publicados en revistas con referato

Di Mauro, G.; Cipriotti, P.; Gallo, S.; Rotundo, J.L. 2018. Environmental and management variables explain soybean yield gap variability in Central Argentina. *European Journal of Agronomy*. 99, 186-194.

Di Mauro, G.; Borrás, L.; Ruggeroni, P.; Rotundo, J.L. 2019. Exploring soybean management options for environments with contrasting water availability. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 205, 274-282.

Trabajos de divulgación

Di Mauro G., Rotundo J.L. 2016. Explorando manejos agronómicos en pisos y techos de producción de soja del Sur Santafesino. *Revista técnica Soja en Siembra Directa*. Edición AAPRESID, Rosario, Argentina. pp. 57-62.

Salvagiotti F., Rotundo J.L., **Di Mauro G.**, Condori A., Gallo S., Boxler M., Pozzi R. 2016. Rendimientos potenciales y brechas de rendimiento de soja en la campaña 2014-15. *Para mejorar la producción*. Ediciones INTA, Oliveros, Argentina. 54, 129-136.

Contribuciones en congresos y reuniones científicas

Di Mauro, G.; Rotundo J.L. Estrategias productivas tendientes a mitigar el estrés hídrico en soja. *XIV Reunión Latinoamericana de Fisiología Vegetal. XXX Reunión Argentina de Fisiología Vegetal*. Mar del Plata, Argentina. Septiembre 2014.

Di Mauro G. Brechas de rendimiento en soja y reducción mediante el uso de insumos no convencionales. *5º Jornada de intercambio académico ámbito público-privado Monsanto-INTA*. Paraná, Marzo 2017.

Di Mauro G.; Salvagiotti, F. Brechas de rendimiento y respuesta a insumos en soja de alto rendimiento en la Pampa Central. *Jornada de avance de actividades Proyecto Nacional Manejo de Cultivos INTA*. Oliveros, Mayo 2018.

Di Mauro G., Rotundo, J.L., Salvagiotti, F. Brechas de rendimiento en soja: factores determinantes, mecanismos responsables y manejo agronómico para reducir las. *Jornada de avance de tesis doctorales, Escuela de Posgrado Facultad de Ciencias Agrarias UNR*. Zavalla, Agosto 2018.

OTRAS PUBLICACIONES DERIVADAS DE ESTA TESIS

Trabajos científicos publicados en revistas con referato

Salvagiotti, F.; Magnano, L.; Barbagelata, P.; Barraco, M.; Condori, A.; **Di Mauro, G.**; Manlla, A.; Rotundo, J.L.; Enrico, J.; Garcia, F.; Echeverría, H.; Ferrari, M.; Gudelj, V.; Ortez, O.; Ciampitti, I. 2021. Estimating nitrogen, phosphorus, potassium, and sulfur requirements in soybean. *European Journal of Agronomy*. 127, 126289.

Trabajos de divulgación

Di Mauro G.; Borrás, L.; Gerde, J. 2016. Efecto del estrés hídrico y el manejo agronómico sobre el perfil de ácidos grasos de los granos de soja para la producción de biodiesel. *Ciencia y tecnología 2016: divulgación de la producción científica y tecnológica de la UNR*. UNR editora. pp. 453-460.

Contribuciones en congresos y reuniones científicas

Di Mauro G.; Borrás, L.; Gerde, J. Efecto del estrés hídrico y el manejo agronómico sobre el perfil de ácidos grasos de los granos de soja para la producción de biodiesel. *IX Jornada de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Rosario*. Rosario, Argentina. Noviembre 2015.

Di Mauro G., Gerde J., Borrás, L. Efecto del estrés hídrico y el manejo agronómico sobre el perfil de ácidos grasos de los granos de soja para la producción de biodiesel. *XIX Encuentro Jóvenes Investigadores*. Santa Fe, Argentina. Octubre 2015.

Condori A.; **Di Mauro G.**; Bacigaluppo S.; Salvagiotti F. Atributos físicos del suelo en ambientes con diferente potencial de rendimiento en soja. *XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. San Miguel de Tucumán, Argentina. Mayo 2018.

Salvagiotti, F.; Barbagelata P.; Barraco, M.; Condori, A.; **Di Mauro, G.**; Rotundo, J.L.; Enrico, J.; Echeverría, H.; Ferrari, M., Garcia F., Gudelj V.; Ortez, O.; Ciampitti, I. Requerimientos de nutrientes en soja: curvas de dilución y acumulación e índice de cosecha. *XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. San Miguel de Tucumán, Argentina. Mayo 2018.

Condori, A., **Di Mauro, G.**, Rotundo, J.L., Gallo, S., Salvagiotti, F. Variables ecofisiológicas y consumo de nutrientes en sojas de alto rendimiento. *7° Congreso de la Soja Mercosur-Mercosoja 2019- "A todo soja"*. Rosario, Argentina. Septiembre 2019.

INDICE

AGRADECIMIENTOS	3
DEDICATORIA	5
PUBLICACIONES PRINCIPALES DERIVADAS DE ESTA TESIS	6
OTRAS PUBLICACIONES DERIVADAS DE ESTA TESIS	7
INDICE	9
ABREVIATURAS, SIGNOS Y ANGLICISMOS	13
RESUMEN	16
ABSTRACT	16
I. JUSTIFICACIÓN, MARCO CONCEPTUAL Y ANTECEDENTES EN EL ESTUDIO DE BRECHAS DE RENDIMIENTO DE SOJA	19
1.1. Resumen.....	19
1.2. Justificación	20
1.3. Marco conceptual del estudio de brechas de rendimiento	22
1.4. Antecedentes en el estudio de brechas de rendimiento.....	24
1.4.1. <i>Estimación de brechas de rendimiento en sistemas de cultivos</i>	24
1.4.2. <i>Magnitud de las brechas de rendimiento en el cultivo de soja</i>	26
1.5. Metodologías para identificar factores determinantes de las brechas de rendimiento.....	26
1.6. Manejo agronómico para reducción de brechas de rendimiento en el cultivo de soja	28
1.6.1. <i>Reducción de brechas de rendimiento de soja mediante tecnología de insumos</i>	29
1.6.2. <i>Reducción de brechas de rendimiento de soja mediante tecnología de procesos</i>	29
1.7. Necesidades actuales de información y oportunidades a explorar en la presente tesis	30
1.7.1. <i>¿Cuál es la magnitud de las brechas de rendimiento de soja utilizando datos de lotes de producción de la región?</i>	30
1.7.2. <i>¿Qué importancia relativa tienen los factores de manejo y los ambientales en la variabilidad de las brechas de rendimiento de soja?</i>	31
1.7.3. <i>¿Existen zonas sojeras bien diferenciadas con valores de brechas de rendimiento contrastantes dentro de la Pampa Central?</i>	31
1.7.4. <i>¿Pueden las tecnologías de insumos contribuir al cierre de las brechas de rendimiento? ¿Cuán factible económicamente es su adopción?</i>	32

1.7.5. <i>¿Pueden identificarse variables del sitio que maximicen la probabilidad de respuesta al uso de insumos? ¿La efectividad del uso de insumos depende de la magnitud de las brechas de rendimiento?</i>	32
1.7.6. <i>¿La variabilidad interanual en las precipitaciones debe ser tomada en cuenta al plantear estrategias de manejo para el cierre de las brechas de rendimiento?</i>	33
1.7.7. <i>¿Qué procesos fisiológicos son los determinantes del éxito de una estrategia de manejo en un ambiente particular?</i>	33
1.8. Objetivos	35
1.8.1. <i>Objetivo general</i>	35
1.8.2. <i>Objetivos específicos</i>	35
1.9. Hipótesis	36
1.10. Estructura y enfoque aplicado en la presente tesis.....	37
II. VARIABLES AMBIENTALES Y DE MANEJO EXPLICAN LA VARIABILIDAD DE LAS BRECHAS DE RENDIMIENTO DE SOJA EN LA REGIÓN CENTRAL ARGENTINA.....	43
2.1. Resumen.....	43
2.2. Introducción	45
2.3. Materiales y métodos	48
2.3.1. <i>Descripción de la región y agricultores bajo estudio</i>	48
2.3.2. <i>Rendimiento actual, rendimiento potencial limitado en agua y estimación de la brecha de rendimiento</i>	53
2.3.3. <i>Variables de manejo y ambientales explicando la variabilidad de las brechas de rendimiento de soja</i>	53
2.3.4. <i>Análisis del patrón espacial de brecha de rendimiento</i>	54
2.4. Resultados	56
2.4.1. <i>Rendimiento actual, rendimiento potencial limitado por agua y brecha de rendimiento</i> ..	56
2.4.2. <i>Variables ambientales y de manejo explicando la variabilidad de la brecha de rendimiento de la soja</i>	57
2.4.3. <i>Análisis espacial de brechas de rendimiento en el centro de Argentina</i>	62
2.5. Discusión.....	64
2.6. Conclusiones	68
III. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL MANEJO DE INSUMOS EN LA REDUCCIÓN DE LA BRECHAS DE RENDIMIENTO DE SOJA EN SITUACIONES ALTAMENTE PRODUCTIVAS.....	70

3.1. Resumen.....	70
3.2. Introducción.....	72
3.3. Materiales y Métodos.....	75
3.3.1. Experimentos de campo. Manejo y caracterización ambiental.....	75
3.3.2. Tratamientos de insumos.....	77
3.3.3. Análisis de brechas de rendimiento y respuesta en rendimiento al uso de insumos.....	77
3.3.4. Diseño experimental y análisis estadístico.....	78
3.3.5. Análisis económico.....	79
3.4. Resultados.....	80
3.4.1. Sistemas productivos explorados.....	80
3.4.2. Análisis de brechas de rendimientos y respuesta al uso de insumos.....	83
3.4.3. Factores condicionantes de la respuesta al uso de insumos.....	85
3.4.4. Resultado económico del tratamiento con insumos.....	87
3.5. Discusión.....	90
3.6. Conclusiones.....	93
IV. EXPLORANDO OPCIONES DE MANEJO PARA EL CIERRE DE BRECHAS DE RENDIMIENTO DE SOJA EN AMBIENTES CON DISPONIBILIDAD HÍDRICA CONTRASTANTE.....	95
4.1. Resumen.....	95
4.2. Introducción.....	97
4.3. Materiales y métodos.....	100
4.3.1. Detalles experimentales.....	100
4.3.2. Tratamientos de manejo y disponibilidad hídrica.....	100
4.3.3. Condiciones climáticas y caracterización ambiental.....	102
4.3.4. Mediciones de plantas.....	102
4.3.5. Diseño experimental y análisis estadístico.....	103
4.4. Resultados.....	104
4.4.1. Fenología, condiciones climáticas y caracterización ambiental.....	104
4.4.2. Rendimiento y componentes numéricos.....	105
4.4.3. Captura total aparente de N, eficiencia de uso de N e índice de cosecha.....	108
4.5. Discusión.....	110

4.6. Conclusiones	115
V. DISCUSIÓN GENERAL Y CONSIDERACIONES FINALES	117
5.1. Resumen.....	117
5.2. Introducción	119
5.3. Integración de resultados y aportes al conocimiento científico	119
5.3.1. Magnitud regional de las brechas de rendimiento de soja.....	120
5.3.2. Factores ambientales y de manejo agronómico condicionando la variación regional de las brechas de rendimiento.....	121
5.3.3. Opciones de manejo para el cierre de las brechas de rendimiento.....	122
5.4. Contraste de hipótesis asociados a los objetivos específicos de la presente tesis doctoral..	123
5.5. Implicancias para futuras investigaciones	126
5.5.1. Ensayos multiambientales para explorar factores genéticos, de manejo y ambientales que determinan las brechas de rendimiento de soja.	126
5.5.2. Exploración de factores socioeconómicos para el análisis de brechas de rendimiento de soja.....	127
5.5.2. Diseño de opciones de manejo para el cierre de brechas de rendimiento en paralelo con elevada concentración de proteína en las semillas de soja.	128
5.5.3. Exploración de fechas de siembra y elección de ciclo en ambientes hídricos contrastantes.	129
5.5.4. Evaluación de genotipos tolerantes al estrés hídrico para el cierre de brechas de rendimiento en ambientes limitantes.	131
5.5.5. Exploración del efecto del exceso hídrico sobre el rendimiento de soja para el diseño de estrategias de manejo	131
5.5.6. Análisis síntesis del efecto del uso de insumos sobre el rendimiento de soja.....	132
5.5.7. Agricultura de precisión como aproximación para la evaluación de paquetes de insumos que permitan el cierre de brechas de rendimiento	133
5.5.8. Desarrollo de una “Red de concursos de Máximos Rendimientos” para explorar rendimientos potenciales en la región.	134
5.9. Referencias.....	136
VI. ANEXO	148

ABREVIATURAS, SIGNOS Y ANGLICISMOS

\$; dólar estadounidense

%; porcentaje

Σ ; sumatoria

***; probabilidad asociada menor a 0,001

**; probabilidad asociada menor a 0,01

*; probabilidad asociada menor a 0,05

<; menor

>; mayor

°; grados decimales

°C; Grados centígrados

25^{ptl}; percentil 25

5^{ptl}; percentil 5

75^{ptl}; percentil 75

95^{ptl}; percentil 95

AACREA; Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agropecuaria

AIC; Criterio de información de Akaike

B; boro

b; pendiente de una recta

B_r; brecha de rendimiento

ca.; del latín, alrededor, cerca de

Ca; calcio.

CIC; capacidad de intercambio catiónico

cmol kg⁻¹; centimol por kilogramo

d; día

DE; desvíos estándar

Ec.; ecuación

EE; error estándar

ESPS; del inglés, Sistema de Producción Temprana de Soja

et al.; del latín, y otros

Fig.; figura

h; hora

ha; hectárea

in sillico; del latín, mediante simulación computacional

in situ; del latín, en el sitio

kg; kilogramo

KPa; kilo Pascal

krigging; del inglés, krigeado

m; metro

MJ m⁻²; Mega joule por metro cuadrado

mm; milímetro

N; nitrógeno

n; número de datos

N₂; nitrógeno atmosférico

ns; no significativo

nugget; del inglés, efecto pepita

P; fósforo

p; probabilidad asociada

pH; potencial hidrógeno

pl m⁻²; plantas por metro cuadrado

R₁; inicio de floración

R²: coeficiente de determinación.

R₂; plena floración

R₃; inicio de formación de vainas

R₅; inicio del llenado de las semillas.

R₇; madurez fisiológica

R₈; madurez de cosecha

R_a; rendimiento real o actual.

Rain out-shelter; del inglés, Refugio para lluvia.

R_{ins}; rendimiento del tratamiento alto insumos

RMSE; error medio cuadrático residual

R_{pot.agua}; rendimiento potencial limitado por agua

S; azufre

UTM; del inglés, Universal Transverse Mercator

V₁; primer hoja expandida.

x; por

Y_a, en inglés; actual yield

Y_g; en inglés, yield gap

Zn; zinc

RESUMEN

Argentina es uno de los principales productores mundiales de soja, cuyos rendimientos han tendido a desacelerarse en términos relativos en los últimos años, especialmente en el área Central de la región pampeana. Esta tendencia puede deberse a que los agricultores estén alcanzando los máximos rendimientos posibles bajo las actuales condiciones productivas. El marco teórico de las brechas de rendimiento (B_r) puede usarse para estudiar la importancia relativa de distintos factores para explicar los niveles de rendimiento real o actual (R_a). Esto es útil como base para identificar oportunidades de mejoras en la productividad de los sistemas agrícolas. El objetivo general de esta tesis fue evaluar los factores y mecanismos que determinan las B_r en soja en ambientes de la región central pampeana y analizar posibles manejos agronómicos para reducirlas. La temática fue abordada a diferentes escalas, combinando aproximaciones. El enfoque observacional, analizando una base de datos de lotes de producción entre 2003 y 2015 mostró un promedio de B_r cercano al 30% tanto para soja de primera como de segunda. La importancia relativa de distintos factores de manejo agronómico y ambiente varió según se trató de cultivos de primera o segunda. Para soja de primera se detectó un patrón espacial regional, sugiriendo que lotes cercanos presentan valores de B_r similares. Por otro lado, el enfoque experimental de esta tesis evaluó la efectividad de distintas opciones de manejo para cerrar B_r . En primer lugar, se plantearon experimentos en campos de productores para evaluar si la aplicación de insumos de uso no generalizado puede reducir las B_r , siendo a su vez, evaluada su factibilidad económica para productores de alta tecnología de la región. A pesar de que el R_a se incrementó por uso de insumos, el cierre de B_r mediante el manejo de insumos no sería económica ni técnicamente recomendable, dado la reducida magnitud explotable de las B_r . En segundo lugar, mediante experimentos controlados, se evaluaron diferentes estructuras de cultivo bajo disponibilidad hídrica contrastante cuantificando su rendimiento y las variables fisiológicas que lo explican. Los mayores rendimientos a través de ambientes se alcanzaron utilizando una estrategia de rendimiento potencial independientemente de la disponibilidad hídrica. Esta opción de manejo incluyó reducciones en el espaciamiento entre surcos, alta densidad de plantas y un genotipo de alto potencial de rendimiento. Las variaciones en el rendimiento se explicaron principalmente por diferencias en el número de granos cosechados por unidad de área y captura total aparente de N a madurez.

ABSTRACT

Soybean yield gaps: determinant factors, responsible mechanisms and agronomic management to reduce them

Argentina is one of global main soybean producers, where yields have tended to decelerate in relative terms in recent years, especially in the Central area of the Pampas. This trend may be due to farmers are reaching the highest possible yields under current production conditions. The yield gap (Y_g) theoretical framework can be used to study the relative importance of different factors to explain actual yield levels (Y_a). This is useful as a basis for identifying opportunities for improvements of productivity in agricultural systems. The general objective of this thesis was to evaluate factors and mechanisms that determine soybean Y_g under environments of the Central Pampas and to analyze possible agronomic management to reduce them. To accomplish these objectives observational and experimental approaches at different scales were combined. Observational approach, analyzing a database of production between 2003 and 2015, showed an average Y_g close to 30% of soybean as single or as second crop in the year. The relative importance of different management and environmental factors differed between soybean as single or as second crop. For single soybeans, a regional spatial pattern was detected, suggesting that nearby farms have similar Y_g magnitude. On the other hand, the experimental approach of this thesis evaluated the effectiveness of different management options to close Y_g . First, experiments were conducted at commercial farmers fields to evaluate if non-generalized inputs application can reduce Y_g , testing its economic feasibility for high-tech farmers in the region under study. Despite Y_a increased due to input use, Y_g closure via input management would not be economically or technically advisable, given reduced exploitable Y_g magnitude in this type of farming systems. Second, through controlled experiments, different crop structures under contrasting water availability were tested to quantify possible yield trade-offs and the physiological variables that explain them. The highest yields across environments were achieved using a potential yield strategy regardless of water availability. This management option included reductions in row spacing, high plant density, and a high-yielding genotype. Yield variations were mainly accounted by differences in seed number and apparent total canopy N uptake at maturity.

**JUSTIFICACIÓN, MARCO CONCEPTUAL Y
ANTECEDENTES EN EL ESTUDIO DE BRECHAS DE
RENDIMIENTO DE SOJA**

I. JUSTIFICACIÓN, MARCO CONCEPTUAL Y ANTECEDENTES EN EL ESTUDIO DE BRECHAS DE RENDIMIENTO DE SOJA

1.1. Resumen

El desafío de la agricultura mundial se basa en satisfacer las demandas crecientes de productos agrícolas. La intensificación agrícola sustentable persigue alcanzar mayores rendimientos de un cultivo individual por unidad de superficie sin impactos negativos sobre el ambiente. Sin embargo, el margen para aumentar los rendimientos en el área cultivada actual presenta algunas restricciones. Los rendimientos de soja en Argentina han tendido a incrementarse en forma lineal y rápida, pero en términos relativos, estos aumentos son cada vez más bajos anualmente, incluso tendiendo a estancarse en los últimos años. Esta desaceleración interanual puede deberse a múltiples causas, entre ellas, a que los productores estén alcanzando los máximos rendimientos posibles bajo las actuales condiciones productivas. El marco conceptual de las B_r puede explotarse para investigar la importancia relativa de distintos factores y prácticas de manejo agronómico que explican los niveles de R_a . Dicho marco es útil como base para identificar oportunidades de mejoras en la productividad de los sistemas agrícolas. Para el análisis de B_r es necesario definir el tipo de sistema de cultivo, la escala de análisis y la metodología de estimación de los diferentes niveles teóricos de rendimiento. Por otro lado, son numerosos los estudios enfocados en cuantificar las B_r de los cultivos, comparados con los aquellos enfocados en explorar sus posibles causas o estrategias de manejo para su cierre. Se esbozaron una serie de interrogantes no totalmente explorados relacionados con (i) estimar las B_r , (ii) identificar potenciales causas, y (iii) evaluar estrategias de manejo para su cierre combinando distintas escalas y metodologías de análisis en la región Central Argentina.

Palabras claves: seguridad alimentaria, manejo agronómico, ambiente, Argentina.

Puntos destacados:

- La demanda de productos agrícolas continuará en crecimiento.
- El análisis de B_r es clave para identificar oportunidades de mejora en los sistemas agrícolas.
- Existe la necesidad de profundizar el análisis de B_r de soja en Argentina.
- Es necesario identificar factores y procesos que determinan la B_r .
- Estrategias de manejo para el cierre de B_r de soja incluyen tecnologías de procesos e insumos.

1.2. Justificación

El desafío fundamental de la agricultura mundial se basa en satisfacer las demandas de productos agrícolas las cuales continuarán incrementándose dado el aumento poblacional, los cambios en la calidad de las dietas, y los potenciales requerimientos en biocombustibles previstos para los próximos años (Godfray et al., 2010; Penning de Vries et al., 1997; Tilman et al., 2011; Tilman y Clark, 2014). En este sentido, los aumentos necesarios en la producción podrían lograrse teóricamente vía expansión de superficie agrícola y/o por una intensificación en el uso de la tierra actualmente bajo agricultura. A escala global, la disponibilidad de nuevas áreas para cultivos está restringida. Por lo cual el aumento en la producción requerirá fundamentalmente la intensificación de la tierra actualmente bajo uso agrícola (Foley et al., 2011).

La intensificación agrícola sustentable persigue alcanzar mayores rendimientos de un cultivo individual por unidad de superficie cuidando al medio ambiente (Cassman, 1999) y/o realizar una mayor cantidad de cultivos por año aprovechando eficientemente los recursos y/o disminuyendo a su vez riesgos productivos (Andrade et al., 2017; Caviglia et al., 2013, 2004; Monzon et al., 2014). Sin embargo, el margen para aumentar los rendimientos en el área cultivada actual presenta algunas restricciones: (i) ya que algunas regiones evidencian bajas tasas de incremento de los rendimientos medios, incluso alcanzando los niveles cercanos a los máximos alcanzables (Grassini et al., 2013; Licker et al., 2010) y (ii) el cambio climático y sus posibles efectos negativos sobre los rendimientos medios y máximos alcanzables (Pugh et al., 2016; Wheeler y vom Braum, 2013).

Bajo este contexto, Argentina se ha convertido y consolidado como el tercer productor mundial de soja (FAOSTAT, 2021). El aumento de su importancia global y su producción se debió principalmente a la incorporación de tierras cultivables, así como también a mejoras en genética y manejo agronómico del cultivo durante las últimas décadas (de Felipe et al., 2020, 2016; Edmeades et al., 2010; Satorre, 2011; Viglizzo et al., 2011). En nuestro país, el cultivo de soja se realiza principalmente en condiciones de secano en la Pampa Central, bajo una amplia gama de condiciones ecológicas y técnicas (Andrade y Satorre, 2015; Aramburu Merlos et al., 2015; Monfreda et al., 2008). Los rendimientos de soja en esta región han tendido a incrementarse en forma lineal (Aramburu Merlos et al., 2015; Edmeades et al., 2010; Ray et al.,

2012, Fig. 1.1A), pero en términos relativos, estos aumentos son cada vez más bajos anualmente e incluso inconsistentes en los últimos años (Fig. 1.1B). Esta desaceleración interanual puede deberse a múltiples causas, entre ellas, a que los productores estén alcanzando los máximos rendimientos posibles bajo las actuales condiciones productivas, o bien, a otros factores como ser la degradación de los suelos, la polución o el cambio climático (Lobell et al., 2009). Bajo este escenario, se vuelve relevante evaluar cuáles son las posibilidades de Argentina y de la Pampa Central para incrementar su producción actual (Aramburu Merlos et al., 2015), así como también explorar si existen opciones de manejo agronómico y tecnologías para lograrlo.

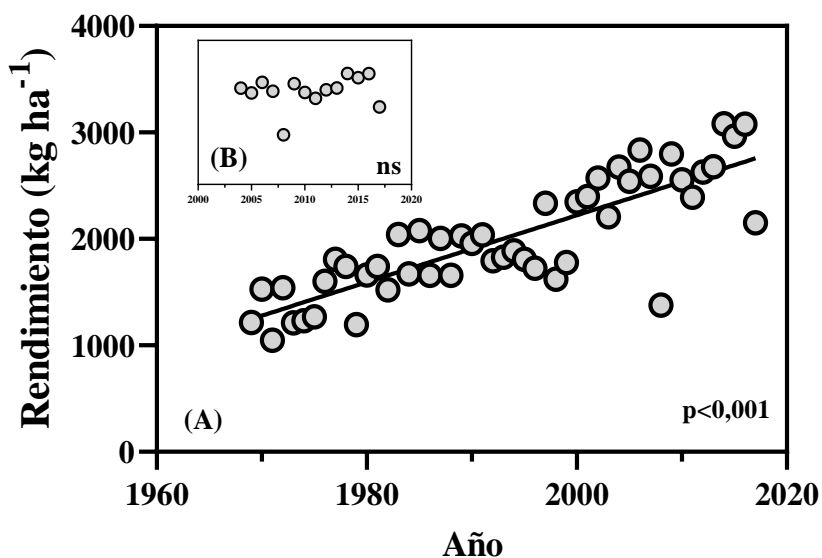


Fig. 1.1. Evolución del rendimiento (kg ha^{-1}) del cultivo de soja para Córdoba, Santa Fe y Buenos Aires, componentes de la Pampa Central Argentina de los últimos (A) 50 años y (B) 15 años. p, probabilidad asociada; ns, no significativo. Elaboración propia a partir de Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de Argentina (SIIA, 2021).

Frente al desafío de aumentar la producción en nuestro país, los suelos con aptitud agrícola se encuentran actualmente en producción (Monfreda et al., 2008); y la expansión a nuevas áreas sojeras enfrenta un severo riesgo ambiental dada la fragilidad de dichos ecosistemas ante cambios en el uso de la tierra (Nosetto et al., 2012). En este sentido, es necesario un incremento en el rendimiento de la soja actualmente cultivada en la región Central del país, mejorando la productividad y competitividad de los productores agropecuarios, así como el saldo

exportable de soja a nivel nacional (Aramburu Merlos et al., 2015). Ambos desafíos no son únicamente relevantes a escala nacional, dado que el mundo demanda cada vez más y mejores productos agrícolas (Andrade, 2016).

1.3. Marco conceptual del estudio de brechas de rendimiento

La ecología de la producción de cultivos integra información básica asociada a procesos físicos, químicos, fisiológicos y ecológicos determinantes del rendimiento en los sistemas agrícolas (Loomis y Connor, 1992). Un nivel de producción teórico representa la producción primaria de un sistema de cultivo por unidad de área; distinguiéndose tres niveles de según los factores definitorios, limitantes o reductores del crecimiento (Rabbinge, 1992). De acuerdo con Van Ittersum y Rabbinge (1997), los factores definitorios del crecimiento son aquellos que determinan el crecimiento potencial, por ende, el rendimiento potencial de un cultivo. Los factores limitantes del crecimiento comprenden los recursos abióticos esenciales como el agua y los nutrientes. Una disponibilidad inadecuada de dichos recursos hace que la tasa de crecimiento de las plantas se reduzca de su potencial. Los factores reductores del crecimiento disminuyen o dificultan el crecimiento de las plantas e involucran fundamentalmente factores bióticos como malezas, plagas y enfermedades.

Según los factores que afectan el crecimiento vegetal existen distintos niveles teóricos de rendimiento (Van Ittersum y Rabbinge, 1997). Evans (1993) define al rendimiento potencial como el rendimiento de un genotipo adaptado que crece en condiciones favorables sin limitaciones de agua, nutrientes, y sin la presencia de plagas o enfermedades. Está determinado por los factores definitorios tales como radiación solar, el dióxido de carbono y la eficiencia del uso de la radiación del cultivo (Sinclair y Horie, 1989). La magnitud del rendimiento potencial es el nivel máximo de producción en sistemas de cultivos manejados bajo riego (Grassini et al., 2011; Lobell et al., 2009). En segundo lugar, el rendimiento potencial limitado por agua ($R_{\text{pot-agua}}$) o nutrientes es menor que el potencial debido a la disponibilidad subóptima de agua o nutrientes, respectivamente. En este sentido, $R_{\text{pot-agua}}$ es el rendimiento máximo posible de obtener en sistemas de producción de secano (Lobell et al., 2009). Finalmente, el R_a es el rendimiento cosechado al final de la estación de crecimiento, asociado fundamentalmente con la

presencia de adversidades bióticas no efectivamente controladas (Van Ittersum y Rabbinge, 1997).

Bajo este enfoque, se define como B_r a la diferencia entre dos niveles teóricos de rendimiento, en una escala espacial y temporal definida (Lobell et al., 2009; Sadras et al., 2015; Van Ittersum et al., 2013). Dependiendo de los objetivos de cada estudio, diferentes estimaciones de B_r pueden ser consideradas como relevantes (Sadras et al., 2015). La B_r explotable explica la improbable alineación de todos los factores requeridos para el logro del rendimiento potencial o $R_{pot.agua}$, tales como las restricciones económicas, operativas y ambientales que impiden, por ejemplo, el uso de dosis de fertilizantes que maximizan el rendimiento (Lobell et al., 2009). Esto ocurre dado que el objetivo de los productores es a menudo un compromiso entre maximizar la ganancia y minimizar el riesgo a escala de sistema, en lugar de maximizar los R_a de los cultivos (Lobell et al., 2009). Se considera que las B_r son explotables, cuando su magnitud es mayor al 20% del $R_{pot.agua}$ en sistemas de secano (Lobell, et al., 2009). La diferencia entre el rendimiento potencial y el $R_{pot.agua}$ es un indicador de la B_r que se puede eliminar con la implementación de riego o por la posible influencia de napa freática fluctuante (Sentelhas et al., 2015). La B_r estimada como la diferencia entre el $R_{pot.agua}$ y R_a es un indicador de las posibilidades de mejora mediante optimización del manejo agronómico en sistemas de secano (Lobell et al., 2009). En situaciones en las cuales las B_r son menores al 20%, se espera que estrategias asociadas a aumentos en el rendimiento potencial o $R_{pot.agua}$ sean las responsables de los aumentos en el R_a a nivel de productor (Grassini et al., 2015a; Reynolds et al., 2011). El marco conceptual de las B_r puede explotarse para investigar la importancia relativa de distintos factores y prácticas de manejo agronómico que explican los niveles de R_a . A su vez, puede utilizarse para analizar las diferencias entre los niveles de rendimiento potenciales y R_a como la base para identificar oportunidades de mejoras en la productividad de los sistemas agrícolas (Espe et al., 2016; Grassini, 2010; Grassini et al., 2015a, 2011; Rattalino Edreira et al., 2017).

1.4. Antecedentes en el estudio de brechas de rendimiento

1.4.1. Estimación de brechas de rendimiento en sistemas de cultivos

Para el análisis de B_r en cultivos agrícolas es necesario definir tres cuestiones centrales como: (i) el tipo de sistema de cultivo, (ii) la escala de análisis y, (iii) la metodología de estimación de los diferentes niveles teóricos de rendimiento (Lobell et al., 2009; Sadras et al., 2015; Van Ittersum et al., 2013). Según el tipo del sistema de cultivo, el análisis de B_r puede realizarse tanto para cultivos individuales o simples (Grassini et al., 2015, 2011), secuencias agrícolas (Balboa et al., 2019; Guilpart et al., 2017) o intercultivos (Gou et al., 2017).

En segundo lugar, las B_r se pueden cuantificar bajo diferentes escalas espaciales y/o temporales (Hall et al., 2013). La precisión y confiabilidad de los datos básicos para el análisis de B_r deben considerarse en relación con la escala espacial y temporal objetivo (Grassini et al., 2015b; Van Ittersum et al., 2013). Algunos estudios de B_r no hacen suposiciones explícitas sobre la escala de tiempo, algunos han usado series de tiempo que son lo suficientemente largas como para abarcar un amplio rango de variación climática pero lo suficientemente corto para que no haya saltos abruptos debido a innovación tecnológica (Aramburu Merlos et al., 2015; Van Ittersum et al., 2013). Adicionalmente, el análisis de B_r para una campaña agrícola particular permitiría estimar qué rendimiento extra podría haberse obtenido en el caso de optimizar variables de manejo agronómico en ese año/sistema productivo en cuestión, asistiendo a los productores en el proceso de toma de decisiones, y mejorando su productividad actual (Lollato et al., 2019).

En el plano espacial, las B_r pueden cuantificarse a distintas resoluciones que varían desde la escala de lote (French y Schultz, 1984), establecimiento productivo (Monzon et al., 2018), región (Casanova et al., 1999), nación (Aramburu Merlos et al., 2015), continente (Schils et al., 2018), mega-ambiente (Caldiz et al., 2002) hasta globalmente (Licker et al., 2010). A su vez, varios esfuerzos han sido documentados para escalar estimaciones de B_r desde una escala espacial menor a otra de mayor extensión y complejidad (Mourtzinis et al., 2020; Rattalino Edreira et al., 2018a, 2017; van Bussel et al., 2015). Dado los diferentes tipos de sistemas productivos, así como también la escala temporal y espacial de análisis, la definición del

universo de estudio es un factor esencial para el cálculo de B_r , por lo tanto también, para su interpretación y utilidad (Sadras et al., 2015).

Por otro lado, existen diferentes aproximaciones para estimar los niveles máximos de los sistemas productivos, es decir, el rendimiento potencial o $R_{\text{pot.agua}}$ (Lobell et al., 2009). La identificación de los percentiles superiores de rendimiento con datos de productores y en base a un recurso ambiental limitante individual como puede ser agua (Grassini et al., 2009; Mekonnen et al., 2020; Rattalino Edreira et al., 2018b; Zanon et al., 2016), nitrógeno (de Oliveira Silva et al., 2020; Hoogmoed et al., 2018), temperatura (Andrade y Satorre, 2015), radiación (Rattalino Edreira et al., 2020a); puede utilizarse para el cálculo de rendimientos potenciales de los agricultores. También se han documentado el uso de registros de producción para estimar rendimientos potenciales, sin discriminación de alguna limitante particular (Egli y Hatfield, 2014a, 2014b; Ernst et al., 2016; Hajjarpoor et al., 2018). Por otra parte, los concursos de rendimiento también pueden ser utilizados para la estimación de rendimientos potenciales (Lollato et al., 2019; Van Roekel y Purcell, 2014), sin embargo, deben provenir de lotes de producción apropiadamente manejados, además de ser verificables y comprobables los niveles de rendimiento alcanzados (Lobell et al., 2009; Sinclair y Cassman, 2004). A su vez, el uso de experimentos controlados también pueden ser una medida análoga al rendimiento potencial de un cultivo (Cafaro La Menza et al., 2017; Van Roekel et al., 2015). Finalmente, el uso de modelos de simulación de cultivos es una de las aproximaciones más utilizadas para la estimación de $R_{\text{pot.agua}}$ en sistemas de producción de secano (Lobell et al., 2009; Van Ittersum et al., 2013).

Estas cuatro metodologías de estimación del rendimiento potencial o $R_{\text{pot.agua}}$ en comparación con R_a , permiten el cálculo de B_r basado en lotes de producción; B_r basado en concursos de rendimiento, B_r basado en experimentos y B_r basados en modelos de simulación (Lobell et al., 2009). A pesar de las diferencias en magnitud de las B_r debido al método de estimación (Lobell et al., 2009), un aporte importante para el entendimiento de las variaciones en magnitud en una región el uso de enfoques complementarios para su estimación (Grassini et al., 2015a; Hochman et al., 2016; Rattalino Edreira et al., 2017; van Loon et al., 2019). En la presente tesis se abordará la cuantificación de B_r usando dos aproximaciones con diferencias en su método para estimar $R_{\text{pot.agua}}$ y la escala temporal bajo análisis. En el capítulo II se estimarán B_r basado en lotes de producción y para el período 2003-2015. En el capítulo III las B_r se

estimarán basándose en modelos de simulación y para el período 2014-2016 para la región Central Argentina.

1.4.2. Magnitud de las brechas de rendimiento en el cultivo de soja

Existen numerosos estudios relacionados a la cuantificación de las B_r del cultivo de soja bajo diferentes escalas de análisis y utilizando diferentes metodologías. A su vez, existen antecedentes en el cálculo de B_r para los principales países productores de soja como Estados Unidos, Brasil, Argentina, India y China.

Egli y Hatfield (2014b) encontraron que la B_r de soja promedio basado en lotes de producción varió del 9 al 24% en tres estados en el Medio Oeste de Estados Unidos durante un período de 40 años. A su vez, Grassini et al. (2015a) y Rattalino Edreira et al. (2017) mostraron que las estimaciones de B_r basados en modelos de simulación fueron 32 y 22% en condiciones de secano en Estados Unidos, respectivamente. Por otro lado, Sentelhas et al. (2015) encontraron que la B_r promedio basado en modelos era 13% en los sistemas sojeros de secano de Brasil. Mientras que para Argentina, Aramburu Merlos et al. (2015) representó el primer intento de evaluar B_r de soja en la región central mediante modelos de simulación, encontrando un promedio de 25% de B_r bajo condiciones de secano. Por su parte, Bhatia et al. (2008) mostraron una B_r basada en modelos del 54% para la producción de soja en India; mientras que Zhang et al. (2016) encontraron una B_r basada en modelos del 16% para soja en China a través de años con diferentes niveles de disponibilidad hídrica.

1.5. Metodologías para identificar factores determinantes de las brechas de rendimiento

Numerosos son los antecedentes relacionados a cuantificar las B_r de los cultivos (Sadras et al., 2015), comparados con aquellos enfocados en explorar sus posibles causas (Beza et al., 2017; Ciampitti y Vyn, 2014; Farmaha et al., 2016; Woittiez et al., 2017) o estrategias de manejo para su cierre o reducción (Jaenisch et al., 2019; Mueller et al., 2012; Pasuquin et al., 2014; Rattalino Edreira et al., 2017). Evaluar los factores determinantes de áreas con rendimientos contrastante puede considerarse como un paso necesario para contribuir con el diseño de

sistemas agrícolas sostenibles (Adams et al., 2018a, 2018b, 2017). En este sentido, los factores de manejo agronómico y ambientales contribuyen globalmente a determinar áreas con niveles de rendimiento variables del cultivo de soja (Licker et al., 2010). Un entendimiento profundo de que variables ambientales o de manejo limitan la productividad de los cultivos permitirá identificar oportunidades de mejora en los R_a , y por lo tanto reducir las B_r en los sistemas de producción (Lollato et al., 2019, 2017; Patrignani et al., 2014; Rattalino Edreira et al., 2017; Tittonell et al., 2008).

Distintas opciones de manejo como el esquema de rotación de cultivos, la definición de la estructura del cultivo, el manejo de la nutrición o la protección del cultivo han sido documentadas como prácticas relevantes en la determinación de la variabilidad del R_a de soja (Andrade et al., 2019; Beal Cohen et al., 2019; Marburger et al., 2016a; Matcham et al., 2020; Rattalino Edreira et al., 2020b, 2017; Sucunza et al., 2018). Ciertas variables ambientales como características edáficas (Smidt et al., 2016), climáticas (Verón et al., 2015), o su interacción (Bacigaluppo et al., 2011) tienen incidencia sobre los R_a de soja alcanzados por los productores agropecuarios en diferentes zonas sojeras del mundo. A modo general, los factores de manejo son fácilmente modificables por los productores respecto a los ambientales (Gambin et al., 2016). Incluso algunos factores ambientales son persistentes o consistentes en el tiempo, otros presentan cierta estacionalidad, mientras que otros son más aleatorios y por ende de más difícil de controlar (Farmaha et al., 2016; Lobell et al., 2007). Por lo tanto, identificar y desentrañar el efecto de factores ambientales y de manejo agronómico sobre las B_r se vuelve relevante para la mejora de la productividad de los sistemas de cultivos actuales, y para el diseño de sistemas de cultivos cada vez más eficientes y productivos (Tittonell et al., 2008)

Se han documentado varios enfoques para explorar y analizar las posibles causas de la variabilidad del rendimiento de soja, variando desde regresiones simples y análisis de la varianza (Bastidas et al., 2008; Farmaha et al., 2016) hasta técnicas más complejas multivariadas que involucran más de una única variable explicativa (Bacigaluppo et al., 2011; Calviño et al., 2003; Faé et al., 2020; Villamil et al., 2012). A su vez, el uso de técnicas de minería de datos en proyectos de agricultura viene creciendo en las últimas décadas, siendo muy útiles para describir y explorar los sistemas de producción de cultivo actuales (Mucherino et al., 2009; Silva et al., 2020; Wolfert et al., 2017). Dentro de este tipo de técnicas, las más utilizadas que pueden

enumerarse son: los árboles de regresión y clasificación, bosques aleatorios, redes neuronales y regresión parcial por mínimos cuadrados (Corassa et al., 2018; De Paepe y Alvarez, 2016; Duan et al., 2020; Kaul et al., 2005; Mourtzinis et al., 2019b, 2018a, 2018b; Smidt et al., 2016).

El análisis de árbol de regresión es sumamente útil para identificar eficazmente variables relevantes asociadas a un fenómeno particular (Andrianasolo et al., 2014), presentando ventajas para explotar bases de datos de producción en proyectos de agricultura (De'Ath y Fabricius, 2000). En este sentido, el uso de árboles de regresión ha sido utilizado para explorar la variabilidad del R_a en cultivos como trigo, maíz y arroz (Lobell et al., 2005; Rotili et al., 2020; Tanaka et al., 2015; Tittonell et al., 2008). Incluso recientemente, su uso se ha expandido para explorar las causas de la variabilidad de R_a en soja (Hansel et al., 2019; Matcham et al., 2020), su concentración de proteína (Bosaz et al., 2019), así como de las B_r en trigo (Ernst et al., 2016).

Por otro lado, explorar el patrón espacial de las B_r en una determinada zona puede contribuir a mejorar el entendimiento de los factores asociados a la magnitud de las B_r (Mann y Warner, 2017). En el caso de que exista un patrón espacial B_r , esto puede estar asociado a que el factor determinante de su magnitud también siga las mismas tendencias en la región de interés.

1.6. Manejo agronómico para reducción de brechas de rendimiento en el cultivo de soja

El cierre de B_r requiere la optimización del manejo agronómico en cada ambiente productivo (Calviño y Sadras, 1999). Los niveles de rendimiento teóricos pueden ser modificados mediante decisiones agronómicas (Van Ittersum y Rabbinge, 1997). El rendimiento potencial varía con la fecha de siembra, el genotipo, el espaciamiento entre hileras y la densidad siembra. Sin embargo, también podría establecerse un rendimiento potencial mediante la definición de ciertas prácticas agronómicas, y explorar cómo las B_r es explicada por modificaciones de estas. El $R_{pot.agua}$ o el rendimiento limitado por nutrientes puede aumentar al eliminar estas restricciones ambientales mediante el riego y la fertilización (Licker et al., 2010; Mueller et al., 2012). El R_a puede aumentar controlando los factores reductores bióticos, como las malezas y las plagas. A su vez y en términos generales, el R_a puede incrementarse mediante estrategias para aumentar el rendimiento potencial en ambientes favorables (Grassini et al.,

2011), o mediante estrategias para mitigar el estrés de los cultivos en ambientes restrictivos (Passioura, 2006).

Según la magnitud de B_r pueden explorarse distintas opciones de manejo para su reducción (Lobell et al., 2009; Van Ittersum y Rabbinge, 1997). Una clasificación amplia de estas opciones puede agruparse en: (i) la implementación de tecnologías de insumos (inoculantes, fertilizantes, fungicidas o insecticidas entre otros), que representan un costo económico adicional significativo en el sistema productivo, por lo cual, es importante además evaluar no sólo cuestiones técnicas, sino además el retorno económico de su adopción (Lobell et al., 2009), o (ii) el uso de tecnologías de procesos, es decir, opciones de manejo agronómico que no implican un costo adicional significativo para el productor agropecuario (fecha de siembra, largo de ciclo o espaciamiento entre surcos, por ejemplo).

1.6.1. Reducción de brechas de rendimiento de soja mediante tecnología de insumos

Las prácticas de manejo que definen la estructura del cultivo como la siembra temprana el uso cultivares de ciclo intermedio, la reducción del espacio entre hileras y los aumentos en la densidad de las plantas en menor medida, tienen un gran impacto en alcanzar un alto nivel de R_a (Andrade et al., 2019; Gaspar et al., 2020; Mourtzinis et al., 2019, 2017; Mourtzinis y Conley, 2017). En este sentido, una vez que se optimizan estas principales decisiones de manejo, un ajuste del manejo agronómico mediante el uso de múltiples insumos tendientes a mejorar la nutrición de los cultivos, y a potenciar el crecimiento puede aumentar potencialmente el R_a . En la actualidad, existen diversas opciones en el mercado de insumos que ofrecen productos destinados a aumentar el R_a (Orlowski et al., 2016), permitiendo un posible cierre de la B_r de los cultivos agrícolas utilizándolos individualmente como en conjunto (Bluck et al., 2015; Orlowski et al., 2016; Ruffo et al., 2015; Villamil et al., 2012).

1.6.2. Reducción de brechas de rendimiento de soja mediante tecnología de procesos

El principal factor que determina la productividad del cultivo en los sistemas de secano es la disponibilidad de agua (Boyer et al., 1982), tal como ocurre en sistemas sojeros de Argentina

(Sinclair et al., 1992; Sinclair et al., 2007). En la región Central Argentina, a pesar de la abundante disponibilidad de agua, pueden ocurrir períodos aleatorios sin lluvias asociados con el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (Ropelewski y Halpert, 1996) y a otros fenómenos climáticos. Adaptar las estrategias de manejo de cultivos a la fluctuación de la disponibilidad de agua año a año es fundamental para el cierre de las B_r de los cultivos (Aramburu Merlos et al., 2015; Hoffmann et al., 2018)

La decisión entre estrategias de manejo de tolerancia a estrés hídrico o de aplicar aquellas que busquen alcanzar rendimientos potenciales se realiza utilizando escenarios meteorológicos bien documentados y pronósticos climáticos extendidos (Bert et al., 2007, 2006; Chapman y de la Vega, 2002; Gastaldi et al., 2020). Sin embargo, una estrategia de rendimiento potencial puede tener un impacto desproporcionadamente negativo sobre el rendimiento en un escenario con déficit hídrico. A su vez, una estrategia de tolerancia a estrés puede determinar un rendimiento potencial muy bajo en un escenario con amplia disponibilidad hídrica (Blum, 2009).

1.7. Necesidades actuales de información y oportunidades a explorar en la presente tesis

De acuerdo con la revisión de antecedentes realizada, surgen una serie de interrogantes insuficientemente explorados y oportunidades relacionadas al estudio de las B_r en los sistemas sojeros de la región Central de Argentina.

1.7.1. ¿Cuál es la magnitud de las brechas de rendimiento de soja utilizando datos de lotes de producción de la región?

Actualmente contamos con la cuantificación regional de las B_r de soja utilizando modelos de simulación agronómica (Aramburu Merlos et al., 2015). Sin embargo, la identificación de los quintiles superiores en lotes de producción puede utilizarse también para su estimación (Sadras et al., 2015). Algunos trabajos han explotado dicha metodología para la región usando datos a nivel departamento (Foley et al., 2011; Licker et al., 2010; Mueller et al., 2012), sin embargo, ampliar las condiciones agroecológicas exploradas y mejorar el nivel de detalle puede mejorar la precisión de la estimación de B_r .

1.7.2. ¿Qué importancia relativa tienen los factores de manejo y los ambientales en la variabilidad de las brechas de rendimiento de soja?

Las B_r han sido poco exploradas en base a los factores de manejo y ambiente que determinan su variabilidad en Argentina (Andrade y Satorre, 2015; Aramburu Merlos et al., 2015; Calviño et al., 2003; Monzon et al., 2018). El uso de registros de lotes de producción para el análisis de B_r viene en crecimiento durante los últimos años (Grassini et al., 2015a, 2011; Rattalino Edreira et al., 2017). El análisis mediante árboles de regresión presenta una serie de ventajas que los hacen adecuados para separar los efectos del manejo y el ambiente utilizando este tipo de registros (Lobell et al., 2005; Mourtzinis et al., 2018b; Tittonell et al., 2008). Dicha metodología ha sido explorada para análisis de las causas subyacentes en las B_r en otros países (Ernst et al., 2016). Por lo cual, puede explotarse para el cultivo de soja en la región Central Argentina dónde se cuenta con gran cantidad de registros de producción bajo una amplia gama de condiciones ambientales y de manejo. A su vez, estimar el $R_{\text{pot. agua}}$ distintivamente para soja de primera y segunda permitiría aproximarse a este interrogante. De esta forma, el rendimiento máximo posible de obtener estaría adecuado a las condiciones ambientales más frecuentes para cada uno de los cultivos (primera vs. segunda), permitiendo una evaluación más objetiva de la importancia del manejo vs. el ambiente en la determinación de las B_r . Esto es relevante de testear, dado el control por parte de los agricultores sobre las variables de manejo vs. las ambientales.

1.7.3. ¿Existen zonas sojeras bien diferenciadas con valores de brechas de rendimiento contrastantes dentro de la Pampa Central?

Estudios previos se centraron en metodologías para escalar las estimaciones específicas de B_r a áreas espaciales más grandes (Rattalino Edreira et al., 2017; van Bussel et al., 2015). Este protocolo, basado en la determinación de áreas homogéneas con respecto a las condiciones ambientales, se utilizó en el análisis B_r en Argentina (Aramburu Merlos et al., 2015). Una alternativa interesante es incorporar un enfoque geoestadístico a escalas espaciales más detalladas (por ejemplo, establecimientos productivos o lotes de producción de una región particular) para mejorar la resolución espacial y la precisión del análisis de B_r . Esta aproximación ha sido exitosa en explorar la variabilidad regional en rendimiento y calidad de soja, por ende, factible de utilización para el análisis de B_r de soja en la región Central Argentina (Andrade y Satorre, 2015; Bosaz et al., 2019; Rotundo et al., 2016).

*1.7.4. ¿Pueden las tecnologías de insumos contribuir al cierre de las brechas de rendimiento?
¿Cuán factible económicamente es su adopción?*

Muchos de los estudios previos sobre la evaluación de tratamientos experimentales con participación de insumos en el cultivo de soja no incluyeron un análisis de B_r que determine la probabilidad de que el R_a pueda aumentar al optimizar el manejo mediante la adición de dicho tratamiento (Mangialardi et al., 2016; Orłowski et al., 2016; Villamil et al., 2012). Además, un análisis económico asociado con la respuesta a su uso puede ayudar a evaluar la factibilidad de incluir insumos a escala comercial de producción (de Bruin et al., 2010; Orłowski et al., 2016), dado que los productores agropecuarios no buscan sólo maximizar la producción por unidad de superficie, sino incrementar las ganancias derivadas de la actividad agrícola (Arora et al., 2016; Lobell et al., 2009). En este sentido, el análisis de las respuestas a insumos debe ser evaluada en conjunto con una cuantificación de la B_r (Monjardino et al., 2019), así como complementada con un análisis económico. Estos tres enfoques simultáneos son necesarios para entender bajo qué situaciones es efectivo el cierre de las B_r mediante el uso de tecnologías de insumos de uso poco generalizado.

1.7.5. ¿Pueden identificarse variables del sitio que maximicen la probabilidad de respuesta al uso de insumos? ¿La efectividad del uso de insumos depende de la magnitud de las brechas de rendimiento?

Reportes previos dónde fue evaluado el uso de insumos para incrementar los R_a de soja no realizaron una evaluación exhaustiva acerca de potenciales condicionantes a la respuesta en rendimiento (Orłowski et al., 2016; Villamil et al., 2012). En este sentido, se vuelve relevante explorar e identificar predictores a nivel de sitio que maximicen la probabilidad de respuesta al uso de insumos. Por ejemplo, el uso de fertilizantes para el cierre de B_r debería estar condicionado por la dotación de nutrientes en el suelo del sitio de producción. De esta forma, identificar variables edafoclimáticas y de manejo que permitan explotar la respuesta al uso de insumos sería de gran utilidad para los productores de la región. Estos resultados nos acercarían a un entendimiento de los condicionantes al uso de insumos, de manera de generar información de los patrones de respuesta (Bandara et al., 2020). Estos aportes contribuirían al desarrollo de una agricultura con bajo impacto ambiental, compatible con la maximización de la productividad de los cultivos (Coyos et al., 2018; Tseng et al., 2020).

1.7.6. ¿La variabilidad interanual en las precipitaciones debe ser tomada en cuenta al plantear estrategias de manejo para el cierre de las brechas de rendimiento?

Adaptar las estrategias de manejo de cultivos a la fluctuación de la disponibilidad de agua año a año es fundamental para mejorar su productividad y rentabilidad de los sistemas agrícolas actuales de la región (Bert et al., 2007, 2006; Gastaldi et al., 2020). Sin embargo, plantear diferentes estrategias tendientes a cerrar las B_r pueden producir resultados variables en ambientes con disponibilidad hídrica contrastante (Blum, 2009, 2005). Se pueden identificar opciones de manejo contrastantes asociadas con diferentes patrones de consumo de agua. Una "estrategia de tolerancia a estrés" es común que busque conservar el agua durante las primeras etapas vegetativas. El agua conservada al principio del ciclo del cultivo se puede usar más tarde durante etapas reproductivas más relevantes. Una estrategia contrastante puede ser una "estrategia de rendimiento potencial" dirigida a maximizar la captura de radiación y el uso del agua durante todo el ciclo. Estas estrategias se pueden implementar a través de simples opciones de manejo agronómico, como el grupo de madurez, el espaciamiento entre hileras o cambios en la densidad de plantas. Por ejemplo, los grupos de madurez más largos pueden enfrentar mejor la escasez de agua intermitente al tener una temporada de crecimiento extendida en comparación con los cultivares de grupo más cortos (Egli, 1993; Wegerer et al., 2015). Un mayor espaciamiento entre hileras puede ayudar a conservar el agua al principio de la temporada de crecimiento (Reicosky et al., 1985). Una densidad de plantas reducida puede ayudar a conservar el agua al principio de la temporada de crecimiento (Holshouser y Whittaker, 2002).

En este sentido, generar información respecto a posibles compensaciones de rendimiento entre estrategias de tolerancia a estrés y estrategias de rendimiento potencial en ambientes con disponibilidad de agua contrastante es crucial para dar soporte a productores y asesores para la toma de decisiones de manejo frente a la variabilidad climática reinante en la región bajo estudio.

1.7.7. ¿Qué procesos fisiológicos son los determinantes del éxito de una estrategia de manejo en un ambiente particular?

En su expresión más simple el rendimiento puede describirse como el producto entre la biomasa total acumulada y el índice de cosecha (Gifford y Evans, 1981). En condiciones limitadas por agua, la productividad del cultivo puede estar limitada por el agua y la

disponibilidad de N (Hooper y Johnson, 1999), lo que reduce la biomasa aérea debido a las pérdidas en fotosíntesis y la menor fijación simbiótica de N_2 (Sinclair et al., 2007). De esta forma, la producción de biomasa a su vez puede entenderse a través de marcos teóricos asociados a la captura y eficiencia de utilización del N (Ciampitti y Salvagiotti, 2018; Rotundo et al., 2014; Salvagiotti et al., 2008).

Por otro lado, las variaciones en el número de granos y el peso individual de los granos pueden utilizarse para explorar los niveles de rendimiento ante modificaciones en las condiciones ambientales o prácticas de manejo agronómico (Board y Tan, 1995; Ruffo et al., 2015). El planteo de estrategias de manejo exitosas debería estar asociado al uso de aquellas opciones que permitan maximizar la captura de recursos, permitiendo incrementar el componente numérico más asociado a la variabilidad del rendimiento. A su vez, identificar los procesos fisiológicos que explican las diferencias entre ambientes contrastantes permitirá diseñar estrategias de manejo para reducir las B_r en la región.

1.8. Objetivos

1.8.1. Objetivo general

Evaluar brechas de rendimiento en soja en distintos ambientes de producción, identificar los factores y mecanismos que las determinan, y analizar posibles manejos agronómicos para reducirlas en ambientes de la región Central Argentina.

1.8.2. Objetivos específicos

1. Evaluar la magnitud de las brechas de rendimiento en el cultivo de soja producida en secano en la región Central Argentina.
2. Identificar variables ambientales y de manejo agronómico asociadas con la variabilidad en las brechas de rendimiento en el cultivo de soja producida en secano en la región Central Argentina.
3. Explorar la distribución espacial de las brechas de rendimiento de soja producida en secano en la región Central Argentina.
4. Estimar el efecto de la aplicación de un paquete insumos de uso no generalizado sobre la reducción de las brechas de rendimiento y su resultado económico.
5. Explorar la relación entre la respuesta a la aplicación de insumos de uso no generalizado con variables del sitio en la región Central Argentina.
6. Cuantificar posibles beneficios/penalidades entre los manejos agronómicos para reducir la brecha de rendimiento y la tolerancia a estrés hídrico.
7. Identificar variables ecofisiológicas relacionadas con los componentes de rendimiento y la captura total de N para explicar posibles penalidades entre los manejos agronómicos diseñados para reducir la brecha de rendimiento y la tolerancia a estrés hídrico.

1.9. Hipótesis

1. *Hipótesis 1, asociada a Objetivo específico 1.* Las brechas de rendimiento del cultivo de soja en la región Central Argentina se encuentran dentro del rango de valores explotables.

Predicción 1. Las brechas de rendimiento medias de soja son mayores al 20%.

2. *Hipótesis 2, asociada a Objetivo específico 2.* Las variables de manejo agronómico son más relevantes que las ambientales en la determinación de la variabilidad de las brechas de rendimiento de soja, y su importancia relativa no varía entre cultivos de primera o de segunda.

Predicción 2. Las variables de manejo agronómico explican más del 50% de la variabilidad de las brechas de rendimiento, y su importancia relativa es igual para soja de primera y de segunda.

3. *Hipótesis 3, asociada a Objetivo específico 3.* La zona Central de Argentina presenta subzonas con valores diferenciales de brechas de rendimiento de soja de primera y segunda.

Predicción 3. Existe un patrón espacial detectable dentro de la región Central Argentina, con zonas de menor magnitud de brechas de rendimiento (<20%) y zonas con valores mayores (>60%), tanto para soja de primera como de segunda.

4. *Hipótesis 4, asociada a Objetivo específico 4.* Las brechas de rendimiento pueden disminuirse mediante un paquete de insumos de uso no generalizado, representando una ganancia económica adicional para los productores.

Predicción 4a. Reducción de al menos 10% de la brecha de rendimiento por aplicación de insumos de uso no generalizado.

Predicción 4b. Costos de producción menores al ingreso adicional por el uso del paquete de insumos.

5. *Hipótesis 5, asociada a Objetivo específico 5.* La respuesta al uso de insumos está relacionada con la magnitud del rendimiento potencial limitado por agua, brecha de rendimiento y condicionada por variables que caracterizan al sitio de producción.

Predicción 5a. Existe correlación positiva entre la respuesta al uso de insumos y el rendimiento potencial limitado por agua.

Predicción 5b. Existe correlación positiva entre la respuesta al uso de insumos y la brecha de rendimiento.

Predicción 5c. Variables químicas de suelo están asociadas a la magnitud de la respuesta al uso de insumos a través de diferentes sitios de producción.

6. *Hipótesis 6, asociada a Objetivo específico 6.* Planteos ofensivos formulados para alcanzar rendimientos potenciales tienen penalidades en ambientes con estrés hídrico.

Predicción 6a. En ambientes no limitantes en disponibilidad hídrica, son mayores los rendimientos en planteos tendientes a obtener rendimientos potenciales que en planteos tolerantes a estrés hídrico.

Predicción 6b. En ambientes con estrés hídrico, son mayores los rendimientos en planteos tolerantes a estrés hídrico que en planteos tendientes a obtener rendimientos potenciales.

7. *Hipótesis 7, asociada a Objetivo específico 7.* Diferencias de rendimiento entre planteos productivos en distintos ambientes están asociados a diferencias en captura total aparente de N y número de granos.

Predicción 7. Rendimientos superiores están asociados a elevados valores de captura total aparente de N y número de granos.

1.10. Estructura y enfoque aplicado en la presente tesis

Para cumplir con los objetivos específicos, esta tesis doctoral está planteada en 3 capítulos anexos al presente introductorio (Figura 1.1). En primer lugar, se realizó una aproximación observacional a partir de registros históricos de producción de soja de productores

de la zona Central Argentina (Capítulo II). Se caracterizaron los sistemas productivos sojeros en base a sus prácticas de manejo frecuentes y condiciones ambientales exploradas, así como también en base a sus rangos de productividad máxima, media y mínima. Esto permitió a su vez, cuantificar la magnitud de las B_r ; identificando aquellos factores con mayor impacto en su variabilidad (Objetivos específicos 1 y 2). A su vez, se exploraron patrones espaciales dentro de la región bajo estudio, identificando zonas con valores diferenciales de B_r (Objetivo específico 3). El enfoque adoptado en el Capítulo II se utilizó para explorar los patrones de B_r de soja de primera y segunda, analizado a través de distintas condiciones agroecológicas y de manejo agronómico, permitiendo identificar sus factores determinantes en los sistemas sojeros pampeanos. La metodología aplicada y los resultados obtenidos en dicho capítulo permitirá acercarnos a un entendimiento más profundo sobre qué factores son relevantes en la magnitud de las B_r en los sistemas productivos agrícolas.

En segundo lugar, se llevó a cabo una aproximación experimental en campos de productores bajo condiciones de secano. Se desplegó una red de ensayos en diferentes localidades de Santa Fe, Buenos Aires y Córdoba durante dos años. En el Capítulo III se abordaron una serie de experimentos para hallar manejos agronómicos tendientes a cerrar la B_r de soja, mediante la incorporación de insumos de uso no generalizado en la región (Objetivo específico 4). Los niveles de rendimiento y respuestas al uso de insumos observados fueron contrastados con el $R_{pot.agua}$ para cada ambiente obtenidos mediante modelos de simulación de cultivos, y analizados en base a su resultado económico. Este enfoque permitió un análisis profundo acerca de qué posibilidades existen de aumentar los rendimientos mediante ciertas tecnologías de insumos disponibles para los productores y no frecuentemente adoptadas en la actualidad. Además, resaltó la relevancia de que la recomendación de estrategias de manejo agronómico para el cierre de B_r no sólo debe ser analizada de acuerdo con el resultado físico productivo sino, además, de acuerdo con el resultado económico de su adopción. A su vez, fueron exploradas variables a nivel de sitio que podrían condicionar la respuesta al uso de insumos (Objetivo específico 5).

En tercer lugar, se llevó a cabo una aproximación experimental en experimentos controlados, manipulando artificialmente la disponibilidad hídrica del cultivo de soja (Capítulo IV). Se evaluaron cuatro estrategias de manejo en ambientes con alta y baja disponibilidad

hídrica durante dos años. Esta tercera sección presenta un estudio exhaustivo enfocado en explorar beneficios y penalidades en rendimiento de distintas estrategias de manejo agronómico frente a la aleatoriedad climática frecuente en la región (Objetivo específico 6). A su vez, la variabilidad de los rendimientos fue explicada utilizando aproximaciones teóricas como los componentes numéricos del rendimiento y la captura de N, explorando los mecanismos responsables del éxito de ciertas estrategias de manejo para cada ambiente particular (Objetivo específico 7). Por otro lado, los niveles de rendimiento alcanzados en estos experimentos controlados fueron contrastados con los máximos registrados de series históricas. El propósito de esta comparación radicó en contextualizar los niveles de estrés impuestos en los experimentos, de manera de extraer conclusiones generales basadas en la variabilidad interanual de las precipitaciones de la región y no solo limitarnos a las condiciones experimentales evaluadas. Este capítulo buscó aportar información a la hora de tomar decisiones de manejo frente a la variabilidad climática reinante en la región, permitiendo a su vez, dilucidar los mecanismos fisiológicos detrás de aquellas estrategias de manejo más exitosas para el cierre de las B_r en cada ambiente.

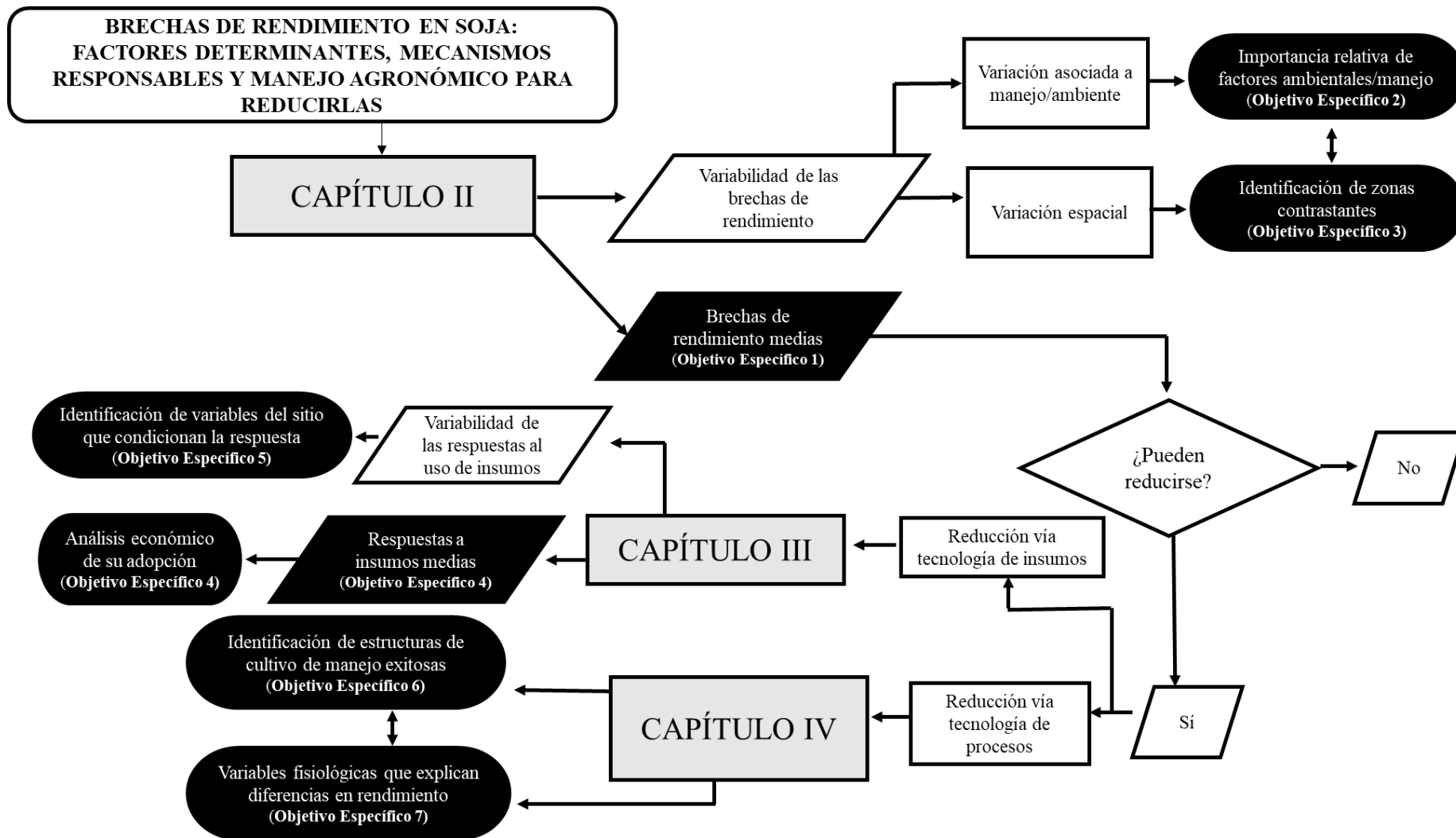


Figura 1.1. Diagrama de flujo con los contenidos y objetivos específicos abordados en cada capítulo de resultados de la presente tesis doctoral.

Al final de la tesis, se incluye el contraste de hipótesis en base a los resultados obtenidos acerca de los puntos más sobresalientes de esta serie de investigaciones, así como potenciales proyectos de investigación futuros (Capítulo V). De esta manera, dicho capítulo pretendió integrar los resultados presentados, cuantificando las B_r e identificando sus causas más relevantes y posibles manejos agronómicos para su cierre desde varios enfoques para su análisis de datos, escalas de trabajo, y con diferentes tipos de implicancias en forma complementaria. La presente tesis doctoral busca contribuir a responder algunos de los interrogantes actuales para mejorar la productividad de los sistemas sojeros de Argentina.

**VARIABLES AMBIENTALES Y DE MANEJO
EXPLICAN LA VARIABILIDAD DE LAS BRECHAS DE
RENDIMIENTO DE SOJA EN LA REGIÓN CENTRAL
ARGENTINA ²**

² El contenido de este capítulo fue publicado en: **Di Mauro, G.**; Cipriotti, P.; Gallo, S.; Rotundo, J.L. 2018. Environmental and management variables explain soybean yield gap variability in Central Argentina. *European Journal of Agronomy*. 99, 186-194.

II. VARIABLES AMBIENTALES Y DE MANEJO EXPLICAN LA VARIABILIDAD DE LAS BRECHAS DE RENDIMIENTO DE SOJA EN LA REGIÓN CENTRAL ARGENTINA

2.1. Resumen

Se requiere evaluar la B_r para identificar oportunidades para futuros aumentos de rendimiento. La zona Central Argentina es una de las regiones de soja más productivas del mundo. En esta región, el cultivo de soja se siembra después de un período de barbecho invernal (soja de primera) o después de la cosecha de un cultivo invernal (soja de segunda). La información sobre las opciones para obtener rendimientos aún más altos es limitada. Los objetivos de este capítulo fueron: (i) estimar la B_r de soja de primera y de segunda, (ii) identificar variables de manejo y ambientales asociadas con la variabilidad de B_r de soja, y (iii) evaluar la distribución espacial de la B_r de soja. Se compiló un relevamiento y registro compuesto por *ca.* 22.500 observaciones de lotes de producción desde 2003 a 2015. El $R_{\text{pot.agua}}$ se estimó como el percentil 95 del R_a a lo largo de los años. La B_r fue la diferencia entre $R_{\text{pot.agua}}$ y R_a , expresada como porcentaje de $R_{\text{pot.agua}}$. Los factores asociados con la B_r se evaluaron usando árboles de regresión. Se utilizó *kriging* ordinario para explorar patrones espaciales de B_r . Los $R_{\text{pot.agua}}$ promedio fueron 5.095 y 4.337 kg ha⁻¹ para soja de primera y segunda, respectivamente. La B_r promedio fue 28,7 y 33,5% para soja de primera y segunda, respectivamente. Las B_r mostró un amplio rango de variación. El manejo agronómico representó el 66 y el 91% de la variación explicada en B_r para soja de primera y segunda, respectivamente. El cierre de la B_r para soja de primera se asoció con siembras tempranas y maíz como cultivo antecesor. El cierre de B_r para soja de segunda se asoció con la utilización de fungicidas foliares, la fertilización con fósforo (P) y la siembra temprana. Para soja de primera, la B_r estuvo espacialmente auto-correlacionada, mientras que no se observó autocorrelación para soja de segunda. La estructura espacial para soja de primera fue representada por un modelo exponencial, con el 81% de la variación total explicada por la estructura espacial y un rango máximo de autocorrelación de aproximadamente 120 km. Este resultado es consistente con la variación espacial observada de las variables ambientales que explican la B_r en soja de primera. Esta aproximación permitió la caracterización de la magnitud, los posibles factores explicativos y la dependencia espacial del B_r de soja en una de las regiones

más productivas del mundo. Si bien las B_r promedio son relativamente pequeñas en comparación con las de otras regiones, aún existen oportunidades para futuras mejoras en el rendimiento.

Palabras claves: *Glycine max (L.) Merr.*, rendimiento real de los productores, rendimiento potencial limitado por agua, árbol de regresión, análisis espacial.

Puntos destacados:

- Fechas de siembra tempranas se asociaron al cierre de B_r en soja de primera.
- La aplicación de fungicida redujo las B_r en soja de segunda.
- Las precipitaciones y el tipo de suelo condicionaron los valores de B_r de soja de primera.
- La B_r estuvo estructurada espacialmente sólo para soja de primera.

2.2. Introducción

El aumento en la producción mundial de cultivos jugará un papel crucial para satisfacer la demanda de alimentos en los próximos años (Godfray et al., 2010). Alcanzar esta meta requiere aumentar el rendimiento por unidad de área cultivada, dado que actualmente la disponibilidad de nuevas áreas para cultivos es escasa (Foley et al., 2011). Una alternativa para aumentar el rendimiento es cerrar las B_r a nivel de lote de producción. La estimación de B_r a nivel de lote de producción requiere comparar el R_a con alguna medida de rendimiento potencial (o el $R_{pot.agua}$ en los sistemas de cultivo de secano; Van Ittersum et al., 2013). El rendimiento potencial puede estimarse mediante modelos de simulación de cultivos, experimentos controlados o rendimientos máximos de productores. Estas tres medidas de rendimiento potencial, en comparación con R_a , permiten el cálculo de B_r basado en modelos; B_r basado en experimentos y B_r basado en productores, respectivamente (Lobell et al., 2009). Aunque el análisis B_r basado en modelos es la aproximación estándar (Van Ittersum et al., 2013; van Wart et al., 2013), el análisis basado en productores también se ha utilizado ampliamente para el análisis global o regional de B_r de diferentes cultivos (Egli y Hatfield, 2014a, 2014b; Ernst et al., 2016; Licker et al., 2010; Tanaka et al., 2015). El objetivo general de este capítulo fue evaluar el B_r para la producción de soja argentina en secano. De acuerdo con Lobell et al. (2009) el análisis de B_r basado en productores sólo es apropiado en sistemas de cultivo manejados intensivamente mediante tecnología y cuando se analizan muchos lotes, a fin de aumentar las posibilidades de obtener al menos un lote con rendimiento cercano al $R_{pot.agua}$. El presente capítulo se centra en el análisis en *ca.* 22.500 observaciones de lotes de un subgrupo de productores con alto nivel de adopción de tecnología de la región Central de Argentina. Dicha aproximación para estimar la B_r proporciona una importante medida de las oportunidades para mejorar la producción de soja con la tecnología actualmente disponible en dicha región.

El análisis de B_r puede ayudar a identificar regiones o sistemas de producción donde se debe dar la mayor prioridad para aumentar con éxito la productividad de los cultivos (van Oort et al., 2017). Las posibilidades de aumentar el rendimiento son más altas en situaciones en las que la B_r es lo suficientemente grande ($>20\%$; Lobell et al., 2009). Bhatia et al., (2008) mostraron una B_r basada en modelos del 54% para la producción de soja en India. Zhang et al., (2016) encontraron una B_r basada en modelos del 16% para soja en China a través de años con

diferentes niveles de disponibilidad hídrica. Egli y Hatfield (2014b) encontraron que la B_r promedio basado en productores varió del 9 al 24% en tres estados en el medio oeste de EE. UU. durante un período de 40 años. Grassini et al. (2015a) y Rattalino Edreira et al. (2017) mostraron las B_r basado en modelos en los EE. UU. fueron 32 y 22% en condiciones de secano, respectivamente. Sentelhas et al. (2015) encontraron que la B_r promedio basado en modelos fue del 13% en los sistemas sojeros de secano de Brasil. Aramburu Merlos et al. (2015), utilizando el enfoque Global Yield Gap Atlas (www.yieldgap.org), representó el primer intento de evaluar B_r de soja en Argentina central mediante modelos de simulación y encontró una B_r promedio del 25% bajo condiciones de secano. Sin embargo, la información respecto a las causas potenciales (factores de manejo o ambientales) de la variación de B_r y la distribución espacial dentro de Argentina Central es escasa. El análisis de B_r se ha ampliado recientemente a los sistemas de doble cultivo para identificar las posibilidades de mejora de rendimiento o diseñar nuevos sistemas agrícolas (Guilpart et al., 2017). Sin embargo, la información sobre las causas ambientales de la B_r de la soja como cultivo de segunda en Argentina es actualmente limitada (Andrade y Satorre, 2015).

La identificación de variables de manejo agronómico y ambientales asociadas con la B_r es fundamental para la toma de decisiones relacionadas a su cierre. Diferentes técnicas pueden ser utilizadas para este fin. Los árboles de regresión se han utilizado para explorar variables explicativas de la B_r en trigo (Ernst et al., 2016). A su vez, dicha metodología se ha utilizado con éxito para identificar variables asociadas con el rendimiento de diferentes cultivos. Por ejemplo, se utilizaron para explorar los factores asociados a la variabilidad del rendimiento en trigo (Lobell et al., 2005), maíz (Tittonell et al., 2008), arroz (Tanaka et al., 2015), caña de azúcar (Ferraro et al., 2009) y soja (Mourtzinis et al., 2018b; Zheng et al., 2009). Este enfoque tiene varias ventajas que lo hacen adecuado para analizar relevamientos o registros productivos de campos a escala regional (De'Ath y Fabricius, 2000). Brevemente, los árboles de regresión son fáciles de interpretar, la selección de variables es insesgada, las relaciones no lineales entre variables se pueden descifrar y no hay supuestos de distribución de la variable respuesta. Además, los árboles de regresión manejan variables categóricas y continuas, y admiten datos faltantes. Por lo tanto, en el capítulo II se utilizará el enfoque de árbol de regresión para explorar los factores de manejo y ambientales asociados a la variabilidad de las B_r de soja analizando *ca.* 22.500 observaciones de lotes en el Centro de Argentina.

El análisis de B_r puede realizarse bajo diferentes escalas espaciales (Sadras et al., 2015). Estudios previos se centraron en metodologías para escalar estimaciones específicas de B_r a áreas espaciales más grandes (van Bussel et al., 2015; van Wart et al., 2013; Van Wart et al., 2013). Este protocolo, basado en la determinación de áreas homogéneas con respecto a las condiciones ambientales, se utilizó en el análisis B_r en Argentina (Aramburu Merlos et al., 2015). Una alternativa interesante es incorporar un enfoque geoestadístico a escalas espaciales más detalladas (por ejemplo, establecimientos productivos o lotes de producción) para mejorar la resolución espacial y la precisión del análisis regional de B_r (Lobell y Ortiz-Monasterio, 2006; Steinbuch et al., 2016). Por lo tanto, en el presente capítulo se explorará este método alternativo, para identificar patrones espaciales en la B_r de soja a través de técnicas geoestadísticas. El mapeo de esta variabilidad puede ayudar al desarrollo de estrategias agronómicas espacialmente dirigidas a cerrar B_r en áreas precisas (Schulthess et al., 2013; van Dijk et al., 2012).

Existe una clara necesidad de sintetizar datos de rendimiento de los cultivos, clima, suelo y datos de manejo agronómico en diferentes áreas para identificar limitantes a la producción de cultivos (Lobell y Asner, 2003). El análisis de B_r utilizando bases de datos de producción a escala de agricultor constituye una oportunidad para lograr este objetivo (Beza et al., 2017). Se necesitan estudios locales para comprender e identificar el papel de las características de los sistemas agrícolas y sus condiciones biofísicas en el cierre de la B_r (Rattalino Edreira et al., 2017). En este contexto, en el capítulo II de esta tesis se utilizarán observaciones de lotes en el área principal de producción de soja del Centro de Argentina para lograr los siguientes objetivos: (i) estimar la B_r de soja, (ii) identificar variables ambientales y de manejo asociadas con su variabilidad; y (iii) explorar la distribución espacial de la B_r de la soja en el Centro de Argentina.

2.3. Materiales y métodos

2.3.1. Descripción de la región y agricultores bajo estudio

El área bajo estudio es parte de la región central de Argentina, involucrando sistemas de producción ubicados principalmente en Santa Fe, Buenos Aires, Entre Ríos y La Pampa (Fig. 2.1). La soja es el cultivo principal en dicha zona, contribuyendo con 85% de la producción a nivel nacional en las últimas 5 campañas (SIIA, 2021). La soja se puede sembrar después de un período de barbecho otoño/invernal (abril-septiembre) siendo el cultivo antecesor otro cultivo de verano (por ejemplo, soja o maíz) que creció durante la campaña de verano anterior (septiembre-abril). Por lo tanto, la soja se siembra después de un período de barbecho otoño/invernal que comienza después de la cosecha del cultivo estival anterior. Las fechas habituales de siembra van desde octubre hasta mediados de diciembre. Este cultivo de soja se conoce como soja de primera. Alternativamente, la soja se puede sembrar después de cosechar un cultivo invernal o después de segar un cultivo de cobertura invernal con herbicida o que eventualmente es consumido por pastoreo de animales. El cultivo de cosecha más común en esta región es el trigo (*Triticum aestivum* L.), mientras que el verdeo invernal también puede ser trigo (secado antes de madurez fisiológica), rye grass (*Lolium multiflorum* Lam.), entre otros. Los cultivos invernales para grano generalmente se cosechan a fines de noviembre a diciembre, mientras que los verdeos se secan/consumen antes. Por lo tanto, en este esquema, la soja se siembra desde principios de diciembre hasta mediados de enero. Este cultivo de soja se conoce como soja de segunda. El área de estudio tiene un clima monzónico con lluvias concentradas en la temporada de verano (diciembre-febrero; Hall et al., 1992). Existe una considerable variabilidad interanual de la lluvia asociada con el fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (Podestá et al., 1999) y otros fenómenos climáticos. Los suelos son predominantemente Molisoles (USDA, 1975). La base de datos de productores agropecuarios bajo análisis fue provista por miembros de la Región Sur de Santa Fe de la Asociación de Consorcios de Experimentación Agrícola (AACREA). Los datos de rendimiento y manejo agronómico se compilaron desde 2003 a 2015. Los datos se basaron por completo en condiciones de siembra directa y cultivares resistente a los herbicidas. La adopción generalizada y rápida de estrategias de manejo basadas en siembra directa y germoplasma de soja *Roundup Ready*® (Monsanto Company, St. Louis, MO) representan cambios importantes en la tecnología de producción de la zona (Satorre, 2011). El marco de tiempo analizado aseguró que

se usó aproximadamente la misma tecnología general para evitar saltos productivos abruptos a lo largo de los años, pero permitiendo la construcción de un conjunto de datos climáticos suficientemente grande. Cada unidad observacional correspondió a un lote específico en un año particular. Todos los lotes se manejaron con la tecnología agrícola disponible por el productor en condiciones de secano. Se mantuvieron dos bases de datos separadas para el análisis: soja de primera ($n = 15.522$) y de segunda ($n = 7.112$).

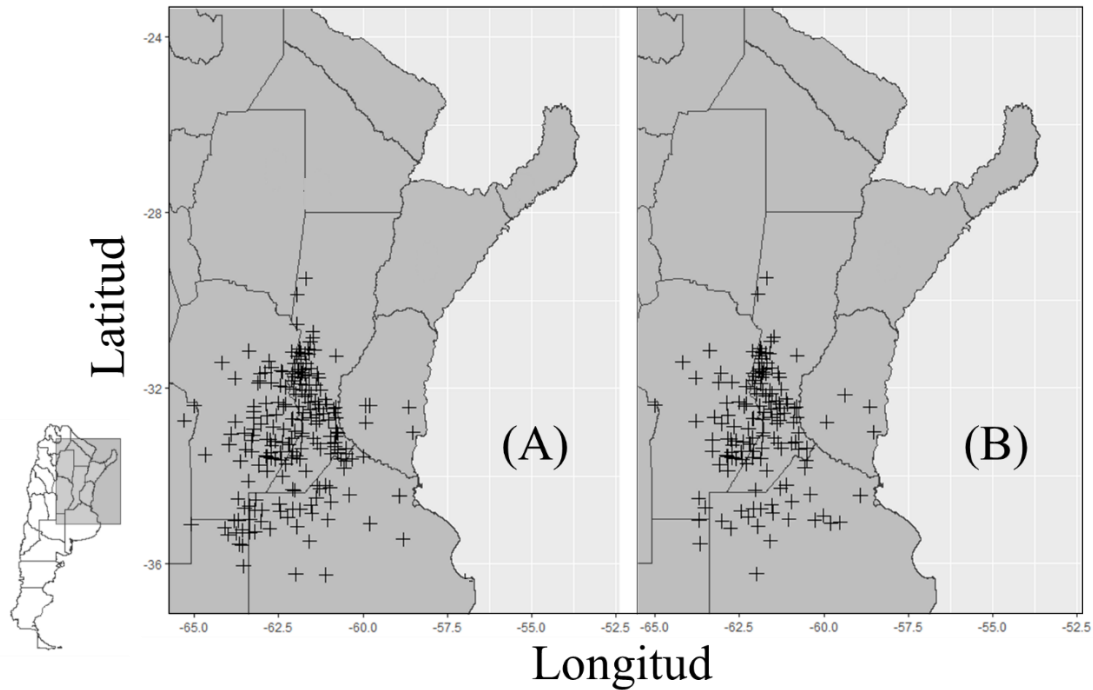


Fig. 2.1. Ubicación de referencia de los lotes de producción de soja de primera (A) y segunda (B) evaluados para el análisis del Capítulo II.

Las variables de manejo extraídas del relevamiento de agricultores fueron: cultivo antecesor, fecha de siembra, espaciamento entre hileras, densidad de plantas, grupo de madurez, dosis de nutrientes aplicados por fertilización y uso de fungicidas e insecticidas (Tabla 2.1). Cada observación fue georreferenciada utilizando la localidad más cercana (Fig. 2.1) y caracterizada de acuerdo con variables ambientales. La distribución aproximada geográfica de los lotes en evaluación puede observarse en la Fig. 2.1. Las variables ambientales consideradas fueron el tipo de suelo de acuerdo con su clasificación taxonómica del USDA (1975), la elevación topográfica, la presencia de napa freática, lluvias y radiación acumuladas mensualmente y la temperatura media mensual. En cuanto a las variables climáticas, la inclusión de más variables podría haber

agregado mucha complejidad a la interpretación de los resultados. Además, se seleccionaron las variables climáticas más comúnmente disponibles en las estaciones meteorológicas estándar, fácilmente disponibles para los productores y relevantes para la determinación del rendimiento de los cultivos. Por ejemplo, la temperatura máxima y mínima del aire también podría haberse incluido en el análisis. Sin embargo, estas variables pueden considerarse redundantes debido a que muestran un alto grado de colinealidad. En este sentido, sus efectos fueron resumidos utilizando la temperatura media del aire. La presencia de napa freática se obtuvo del relevamiento de productores. A pesar de la variable ambiental presencia de napa fue tenida en cuenta en este capítulo, fueron escasos los lotes con registro (< 5% de las observaciones para soja de primera y segunda, datos no presentados). El tipo de suelo fue provisto por los productores bajo estudio, usando información del Atlas de Suelo de Argentina con una resolución 1:500 (Moscatelli, 1990) Las variables climáticas se estimaron de acuerdo con la ubicación geográfica de cada observación utilizando datos públicos disponibles (Grassini et al., 2015b). El registro de precipitaciones efectivamente acumuladas en cada uno de los lotes no fue provisto por los agricultores relevados. De esta manera, tanto las precipitaciones y la radiación acumuladas mensualmente y la temperatura media mensual se obtuvieron de estaciones meteorológicas del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria de Argentina (<http://inta.gob.ar>) cercanas a cada observación (Aramburu Merlos et al., 2015; Verón et al., 2015). En los casos en que faltaron los registros de radiación, se estimaron de datos de Predicción de Recursos Energéticos Mundiales de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (<http://power.larc.nasa.gov>). Estudios recientes mostraron una buena concordancia entre los datos satelitales y de radiación medida en estaciones experimentales terrestres (Aramburu Merlos et al., 2015; Bai et al., 2010; White et al., 2011). Para soja de primera, todas las variables climáticas se estimaron para el período de octubre a marzo. Para soja de segunda, se estimó la lluvia para el período de octubre a marzo, y la radiación y la temperatura se estimaron para diciembre a marzo. Dado que el registro de productores no contaba con datos de agua a la siembra, y siendo una variable importante para la disponibilidad hídrica en el cultivo de soja de segunda, este análisis contempló las lluvias primaverales previo a la siembra (octubre-diciembre) como un indicador de una posible recarga de perfil previo a la siembra del cultivo. Esta aproximación fue utilizada en otro trabajo para la zona Central de Argentina (Bosaz et al., 2019). Los rangos de las variables climáticas se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.1. Caracterización del cultivo de soja (de primera o segunda) dentro de la región Central Argentina según variables de manejo agronómico. Los datos de manejo corresponden a productores miembros de la Región del Sur de Santa Fe de la Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola (AACREA).

Variable	Tipo	Unidades	Rango explorado	
			Soja de primera	Soja de segunda
Cultivo antecesor	Categórica		maíz, soja, sorgo, girasol, maní, verdeo estival.	trigo, cebada, colza, arveja, avena, garbanzo,
Fecha de siembra	Cuantitativa	Fecha	1° Octubre – 1° Enero	1° Noviembre – 1° Enero
Espaciamiento entre surcos	Cuantitativa	m	0,17 – 0,70	0,17 – 0,52
Densidad de plantas	Cuantitativa	pl m ⁻²	17 – 76	14 – 100
Grupo de madurez	Categórica	000 a X	II – VIII	II – VIII
Dosis de N aplicada	Cuantitativa	kg ha ⁻¹	0 – 32	0 – 32
Dosis de P aplicada	Cuantitativa	kg ha ⁻¹	0 – 59	0 – 70
Dosis de S aplicada	Cuantitativa	kg ha ⁻¹	0 – 33	0 – 33
Dosis de Zn aplicada	Cuantitativa	kg ha ⁻¹	0 – 38	0 – 38
Dosis de Ca aplicada	Cuantitativa	kg ha ⁻¹	0 – 30	0 – 30
Uso de fungicidas	Categórica	Si/No		
Uso de insecticidas	Categórica	Si/No		

Tabla 2.2. Caracterización ambiental del área de estudio dentro de la región Central Argentina. Los datos de ubicación, tipo de suelo y presencia de napa fueron proporcionados por productores miembros de la Asociación de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola (AACREA) de la Región Sur de Santa Fe. Los datos climáticos se estimaron utilizando estadísticas públicas nacionales. Para obtener más detalles sobre la estimación de variables climáticas, consultar la sección 2.3.1.

Variable	Tipo	Unidades	Rango explorado
Latitud	Cuantitativa	Grados	-33,4 a -27,7
Longitud	Cuantitativa	Grados	-65,3 a -62,8
Tipo de suelo ^a	Cualitativa	Gran grupo	Argiudol, Argialbol, Hapludol, Natralbol, Alfisol.
Presencia de napa	Cualitativa	Si/No	
Lluvias acumuladas	Cuantitativa	mm	
			octubre 2 – 334
			noviembre 0 – 294
			diciembre 3 – 406
			enero 8 – 312
			febrero 0 – 390
			marzo 0 – 524
Radiación acumulada ^b	Cuantitativa	MJ m ⁻²	
			octubre 396 – 766
			noviembre 512 – 838
			diciembre 582 – 882
			enero 376 – 872
			febrero 324 – 923
			marzo 350 – 665
Temperatura media del aire ^b	Cuantitativa	°C	
			octubre 13 – 26
			noviembre 18 – 29
			diciembre 20 – 32
			enero 21 – 33
			febrero 18 – 33
			marzo 11 – 30

^a Tipo de suelo de acuerdo con la clasificación según USDA (1975). ^b Las estimaciones para soja de segunda fueron para período de diciembre a marzo.

2.3.2. Rendimiento actual, rendimiento potencial limitado en agua y estimación de la brecha de rendimiento

El R_a de los agricultores corresponde al rendimiento en grano de soja (kg ha^{-1}) de cada lote y año dado y expresado al 13,5% de humedad. El $R_{\text{pot.agua}}$ se estimó ajustando una regresión lineal por cuantiles para el percentil 95 entre R_a y años (Egli y Hatfield, 2014a, 2014b). Se requirió utilizar este método de estimación en lugar de seleccionar el percentil 95 de los lotes de mayor rendimiento para deducir la tendencia de los datos de rendimiento observados y el aumento de rendimiento esperado observado durante el período analizado (de Felipe et al., 2016). El modelo lineal se ajustó utilizando el paquete *quantreg* en el entorno R (Koenker, 2013). En el presente capítulo, el interés fue en cuantificar la magnitud B_r de cada tipo de cultivo de soja. Por lo tanto, separadamente para soja de primera como de segunda, la B_r se calculó como la diferencia entre $R_{\text{pot.agua}}$ y R_a , expresada como el porcentaje de $R_{\text{pot.agua}}$.

2.3.3. Variables de manejo y ambientales explicando la variabilidad de las brechas de rendimiento de soja

El análisis mediante árbol de regresión se realizó para explorar posibles asociaciones entre variables de manejo agronómico y ambientales con B_r . Los árboles de regresión se construyeron utilizando el software JMP (versión 13.1.0, SAS Institute Inc., Chicago, IL, EE. UU.). Brevemente, los árboles de regresión explican la variación de una variable dependiente (es decir, B_r) dividiendo repetidamente los datos en grupos más homogéneos, usando combinaciones de variables explicativas (por ejemplo, fecha de siembra y tipo de suelo, entre otros). El algoritmo define un valor umbral de la variable explicativa que divide los datos en grupos que muestran homogeneidad dentro de ellos. Cada división óptima debería maximizar la estadística LogWorth. Esta es una medida de significancia estadística definida como $-\log_{10}$ (valor p). Para el caso de variables continuas, esta aproximación es eficaz dado que evita que el observador establezca *a priori* criterios de clasificación que no necesariamente crean grupo de observaciones homogéneos dentro y contrastante entre ellos. Por ejemplo, para la variable fecha de siembra, en primer lugar fue expresada como días después del 1 de octubre para correr el análisis de árbol de regresión, aunque luego los resultados fueron expresados como fecha calendario para una más

fácil interpretación. Esto permitió que el algoritmo establezca el valor umbral de fecha de siembra para agrupar observaciones que presenten valores similares de B_r , y no que el observador establezca categorizaciones de fechas de siembra sin ningún criterio definido. Se establecieron quinientas observaciones como la población mínima de cada nodo terminal.

2.3.4. Análisis del patrón espacial de brecha de rendimiento

El patrón espacial de B_r para soja de primera y segunda se evaluó para aquellas localidades que tuvieron al menos cinco años de estimaciones B_r . Este subconjunto limitó el análisis espacial a una subregión con la mayor densidad de datos. Las coordenadas geográficas de ubicación se proyectaron a coordenadas planares utilizando la zona UTM H20. Se adoptó un enfoque de campo aleatorio para una variable continua en un espacio R^2 continuo para describir los patrones espaciales de B_r (Goovaerts, 1997). La tendencia espacial de B_r a gran escala a través del espacio se exploró mediante el ajuste de regresiones suaves no paramétricas entre el B_r , las coordenadas espaciales planas y la elevación topográfica de cada sitio. También se exploraron supuestos de campo aleatorios y distribucionales (estacionariedad y continuidad) de B_r . La autocorrelación de B_r (residual en caso de que se detecte una tendencia significativa) se evaluó construyendo un variograma omnidireccional directo. El variograma se exploró en una extensión máxima de 220 km (es decir, menos de un tercio de la diagonal del cuadro delimitador del área muestreada) y una resolución espacial de 14 km que garantiza al menos 30 observaciones emparejadas para cada clase de distancia de retardo. La semi-varianza muestral en cada distancia de retraso se estimó de acuerdo con el método robusto propuesto por Cressie y Hawkins (1980) (Ec. 2.1).

$$2\gamma_{CH}(h) = \frac{1}{c_h} \left[\left(\frac{1}{N_h} \sum_1^{N(h)} |Z_{xi} - Z_{xj}|^{\frac{1}{2}} \right)^4 \right] \quad \text{Ec. 2.1}$$

donde $\gamma(h)$ representa la semi-varianza calculada para una clase específica de distancia de retardo espacial h , y Z representa la variable aleatoria en diferentes ubicaciones. En este caso, el B_r estimado en los sitios X_i y X_j , N_h es el número de todos los pares de sitios separados por la clase de distancia h , y C_h es un factor de corrección para el sesgo en la variable Z calculada en Ec. 2.2.

$$C_h = 0.457 + \frac{0.494}{N_h} + \frac{0.494}{N_h^2} \quad \text{Ec. 2.2}$$

Para cada cultivo de soja, se ajustaron diferentes modelos (es decir, exponencial, esférico y gaussiano) mediante el método de mínimos cuadrados ponderados y se seleccionaron de acuerdo con la suma de cuadrados residuales después de obtener los dos variogramas directos omnidireccionales empíricos. Luego, utilizando el modelo espacial regionalizado (tendencia + autocorrelación) que caracterizó la estructura espacial particular de cada cultivo, utilizamos la interpolación por *kriging* ordinario para predecir la B_r en una nueva cuadrícula más fina que la original (*ca.* 2/3 más fina que la resolución espacial empleada en el muestreo original). Para construir el mapa predicho de B_r para cada cultivo de soja, se enfocó en la misma subregión con alta densidad de datos para evitar zonas sin datos cercanos. Para manipular objetos espaciales, los paquetes *sp* (Bivand et al., 2008) y *rgdal* (Bivand et al., 2016) se usaron en el entorno R. Para calcular los semivariogramas empíricos, ajustar los modelos y aplicar las técnicas de interpolación, se utilizó el paquete *gstat* de R (Pebesma, 2004).

2.4. Resultados

2.4.1. Rendimiento actual, rendimiento potencial limitado por agua y brecha de rendimiento

El R_a promedio para soja de primera fue de 3.635 kg ha⁻¹, y varió de 1.625 a 5.156 kg ha⁻¹ (Tabla 2.3). El R_a promedio para soja de segunda fue de 2.941 kg ha⁻¹, variando de 1.141 a 4.430 kg ha⁻¹ (Tabla 2.3). El $R_{pot.agua}$ difirió entre soja de primera y segunda. Para soja de primera, $R_{pot.agua}$ varió de 4.816 a 5.306 kg ha⁻¹ (Tabla 2.3), con un aumento lineal de 54 kg ha⁻¹ año⁻¹ durante el período bajo análisis ($p < 0,001$, datos no mostrados). En soja de segunda, $R_{pot.agua}$ varió de 4.007 a 4.611 kg ha⁻¹ a lo largo de los años (Tabla 2.3), mostrando un aumento lineal de 67 kg ha⁻¹ año⁻¹ ($p < 0,001$, datos no mostrados). La B_r promedio fue de 28,7 y 33,5% para soja de primera y segunda, respectivamente (Tabla 2.3). Las B_r variaron de 0 a 68% y de 0 a 78%, respectivamente (Tabla 2.3). No se observaron incrementos/disminución de las B_r a través de los años para el período de tiempo analizado ($p > 0,05$; Anexo Fig. 6.1)

Tabla 2.3. Medidas estadísticas resumen relacionadas con el rendimiento actual de los productores, el rendimiento potencial limitado por agua y la brecha de rendimiento de los cultivos de soja (primera o segunda) del Centro de Argentina durante el período 2003-2015.

	95 ^{ptl}	75 ^{ptl}	Mediana	25 ^{ptl}	5 ^{ptl}	Media
<i>Rendimiento actual (kg ha⁻¹)</i>						
Soja de primera	5.156	4.421	3.786	2.979	1.625	3.635
Soja de segunda	4.430	3.692	3.010	2.262	1.141	2.941
<i>Rendimiento potencial limitado por agua (kg ha⁻¹)</i>						
Soja de primera	5.306	5.252	5.089	4.980	4.816	5.095
Soja de segunda	4.611	4.544	4.343	4.141	4.007	4.337
<i>Brecha de rendimiento (%)</i>						
Soja de primera	68,0	41,4	25,7	13,4	0,0	28,7
Soja de segunda	78,0	48,5	30,6	15,6	0,0	33,5

2.4.2. Variables ambientales y de manejo explicando la variabilidad de la brecha de rendimiento de la soja

2.4.2.1. Soja de primera

El árbol de regresión para soja de primera explicó el 25,8% de la variación total en las B_r observadas (Anexo Tabla 6.1). Las variables de manejo representaron el 66% de la variación explicada, mientras que las variables de ubicación y ambientales representaron el 34% restante (Tabla 2.4). Hubo 20 nodos terminales, con B_r promedio en los nodos terminales que fueron de 11 al 52% (Fig. 2.2).

Tabla 2.4. Variabilidad relativa de la brecha de rendimiento de la soja (%) explicada por variables de manejo/ambientales usando árboles de regresión. La variabilidad relativa se refiere a la variabilidad total explicada por el modelo para cada cultivo. En general, los árboles de regresión explicaron 25,8 y 30,7% de la variación total en las brechas de rendimiento para la soja de primera y de segunda, respectivamente.

Variable	Soja de primera % Variabilidad explicada	Soja de segunda % Variabilidad explicada
Fecha de siembra	49,6	14,0
Cultivo antecesor	6,2	6,9
Fertilización	3,9	18,2
Grupo de madurez	3,5	0,0
Uso de fungicidas	2,3	51,8
<i>Σ Manejo</i>	65,5	90,9
Lluvias	12,4	4,9
Temperatura	3,9	0,0
Longitud	0,8	4,2
Tipo de suelo	17,4	0,0
<i>Σ Ambiente - Ubicación</i>	34,5	9,1

La fecha de siembra fue el criterio de división primario ($p < 0.001$; Fig. 2.2) y explicó aproximadamente el 50% de la variación de la B_r explicable (Tabla 2.4). El promedio de B_r fue de 25,6% y 42,5% para las fechas de siembra anteriores y posteriores al 25 de noviembre, respectivamente. El cultivo antecesor explicó el 6,2% de la variación explicable de B_r en soja de primera (Tabla 2.4); la B_r fue 8,1% más bajo en lotes que tenían maíz como cultivo antecesor en comparación con otros cultivos ($p < 0,001$, Fig. 2.2). La fertilización con P y Cinc (Zn) también disminuyó la B_r en comparación con los casos sin fertilización ($p < 0,001$, Fig. 2.2). El grupo de madurez y la aplicación de fungicidas representaron el 5,8% de la variación explicable de la B_r en soja de primera (Tabla 2.4). Los grupos de madurez II a IV mostraron B_r menores que V a VIII (27,5 y 36,4% respectivamente, $p < 0,001$, Fig. 2.2). Sin embargo, los grupos de madurez más cortos mostraron disminuciones de las B_r asociadas con la aplicación de fungicidas ($p < 0,001$; Fig. 2.1).

Entre las variables ambientales, el tipo de suelo fue el factor más importante tanto en la fecha de siembra temprana como tardía ($p < 0,001$; Fig. 2.2), lo que explicó el 17,4% de la variación explicable de la B_r (Tabla 2.4). La precipitación y la temperatura del aire representaron el 16,3% de la variación explicable de la B_r para soja de primera (Tabla 2.4). En general, se observó una disminución de la B_r en ambientes con mejor suministro de agua y temperaturas más frías ($p < 0,001$, Fig. 2.2).

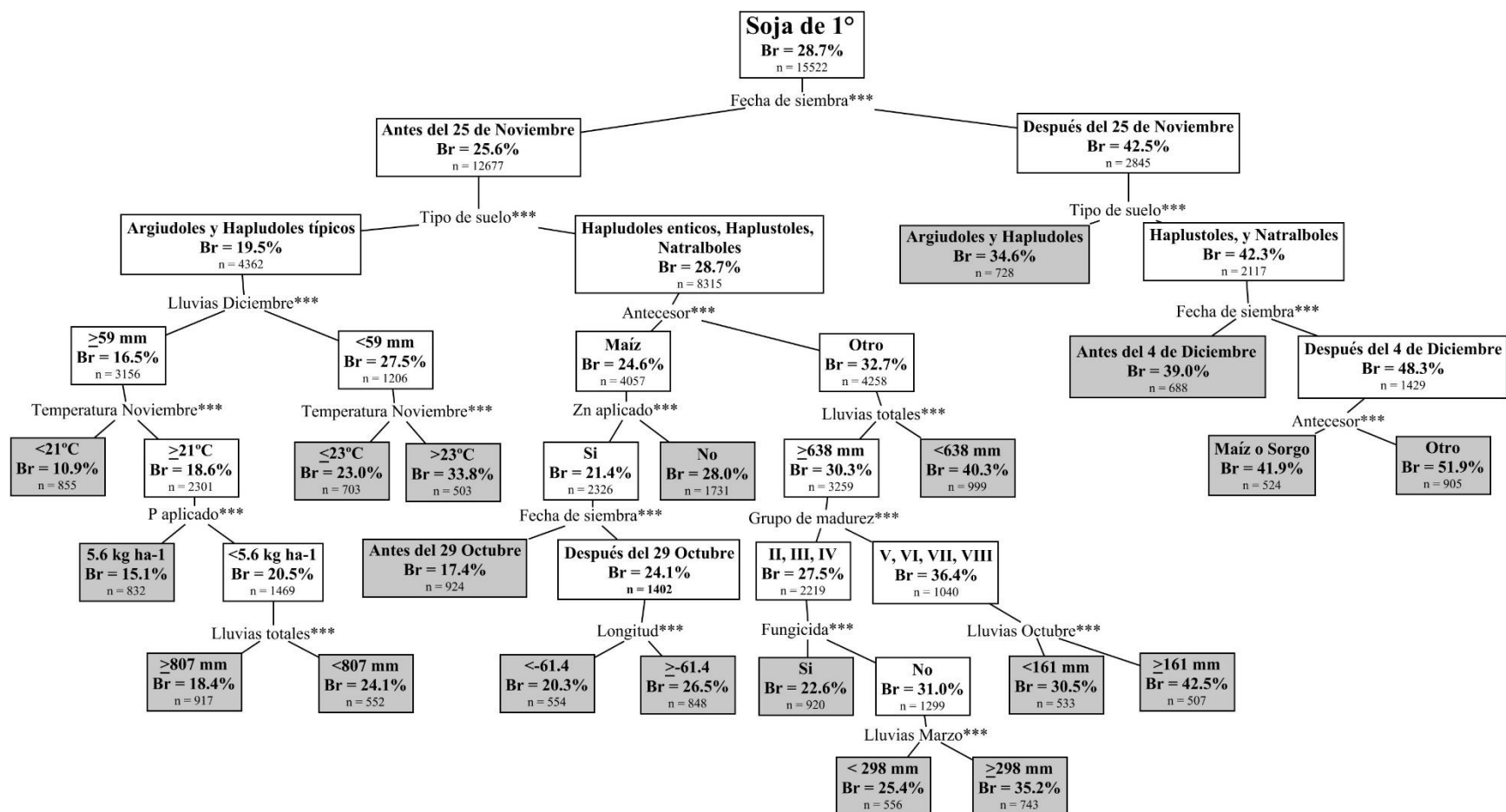


Fig. 2.2. Modelo de árbol de regresión para la brecha de rendimiento de soja (B_r) de primera en Argentina Central. La brecha de rendimiento se expresó como el porcentaje del rendimiento potencial limitado por agua usando máximos rendimientos de productores. *** $p < 0,001$. Los valores de p se estimaron usando el estadístico LogWorth. Los nodos terminales se representan como cuadros grises.

2.4.2.2. Soja de segunda

El árbol de regresión para soja de segunda explicó el 30,7% de la variación total en B_r observada (Anexo Tabla 6.1). De la variación explicada, las variables ambientales tuvieron menor importancia que las variables de manejo para explicar la variación de las B_r para soja de segunda (Tabla 2.4). Hubo 10 nodos terminales, con valores de B_r promedio en los nodos terminales que variaron entre 14 y 62% (Fig. 2.3).

La aplicación de fungicida fue el criterio principal de división. El promedio de B_r fue de 27,9 y 50,1% para casos con fungicidas aplicados vs. no aplicados, respectivamente ($p < 0,001$; Fig. 2.3). En los casos en que no se aplicaron fungicidas, la fertilización P tuvo un efecto significativo en la reducción de B_r pasando de 61,9 a 39,3% para los casos no fertilizados y fertilizados, respectivamente ($p < 0,001$; Fig. 2.3). Los lotes con aplicación de fungicida mostraron una variación de B_r asociada con la fecha de siembra y el cultivo antecesor ($p < 0,001$). Se observó una baja magnitud de la B_r cuando se sembró soja antes del 7 de diciembre y después de la cosecha de un cultivo de invierno (por ejemplo, trigo y cebada para grano) en comparación con un verdeo invernal para forraje o como cultivo de cobertura ($p < 0,001$; Fig. 2.3). Las precipitaciones acumuladas durante diciembre representaron el 4,9% de la variación explicable de la B_r en soja de segunda (Tabla 2.4). Reducciones de las B_r se asociaron con aumentos en las precipitaciones de diciembre por encima de 138 mm ($p < 0,001$; Fig. 2.3).

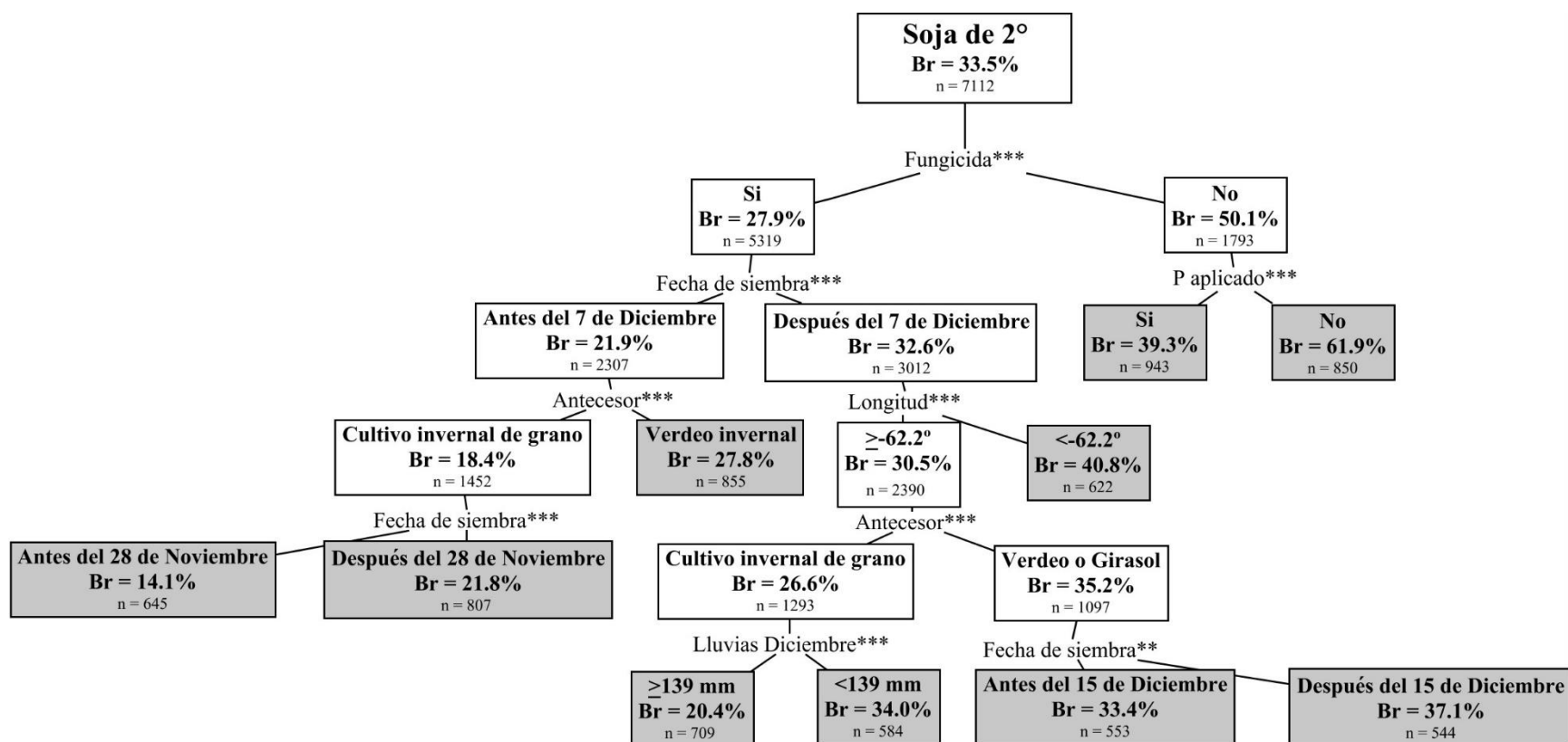


Fig. 2.3. Modelo de árbol de regresión para la brecha de rendimiento de soja (B_r) de segunda en Argentina Central. La brecha de rendimiento se expresó como el porcentaje del rendimiento potencial limitado por agua usando máximos rendimientos de productores. *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$. Los valores p se estimaron usando el estadístico LogWorth. Los nodos terminales se representan como cuadros grises

2.4.3. Análisis espacial de brechas de rendimiento en el centro de Argentina

En ambos tipos de cultivos de soja, no pudo detectarse ninguna tendencia espacial significativa para el B_r promedio a través de latitud, longitud y/o elevación topográfica en la región estudiada. El variograma muestral indicó una fuerte autocorrelación espacial de B_r para el cultivo de soja de primera (Fig. 2.4A). Sin embargo, no hubo autocorrelación espacial en el B_r en soja de segunda (Fig. 2.4B). La estructura espacial de soja de primera estuvo bien representada por un modelo exponencial con un 81% de variación total explicada por la estructura espacial ($nugget = 34,48$ y umbral = 181,3) y un rango máximo de autocorrelación de *ca.* 120 km (Fig. 2.4A). El error para el modelo ajustado fue muy bajo (RSS <0.001).

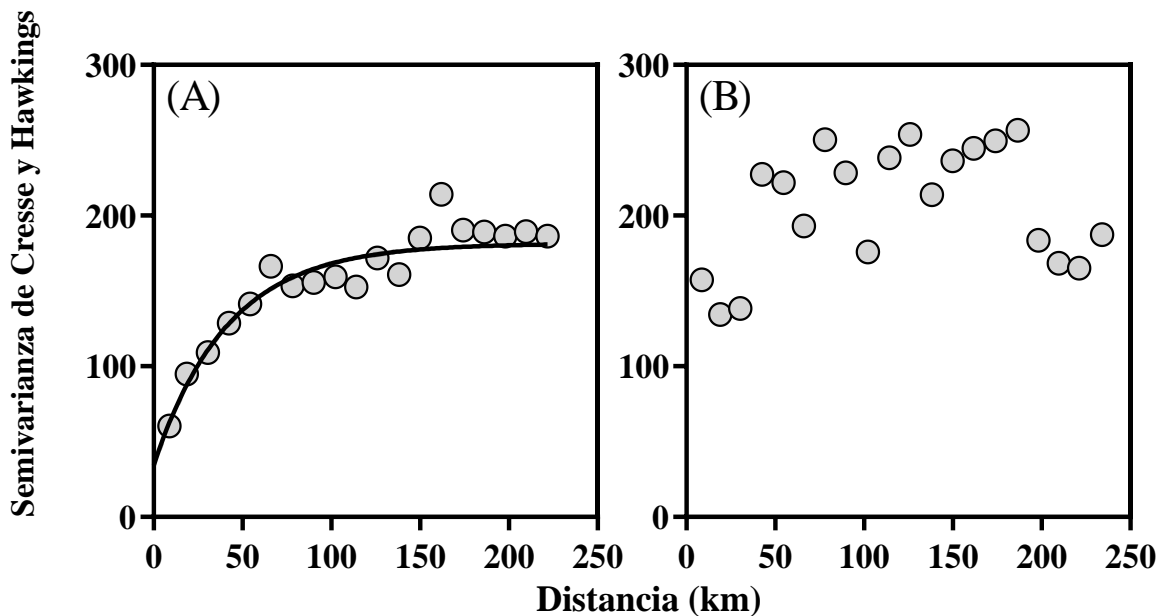


Fig. 2.4. Variogramas omnidireccionales muestrales y directos de brechas de rendimiento de soja de primera (A) o segunda (B) para describir la autocorrelación espacial local. Gamma se estimó mediante el método robusto propuesto por Cressie y Hawkins (1980). En el panel "A", la línea continua representa el modelo exponencial ajustado ($nugget = 34,48$, umbral = 181,62 y rango = 120 km; RSS = 0,00008).

La variación espacial de B_r para soja de primera se predijo usando *kriging* ordinario ya que no hubo modelos significativos para la respuesta media (tendencia). El mapa predicho indicó zonas con bajas B_r (<20%) y zonas bien definidas con B_r grandes (> 40%, Fig. 2.5A). Además, debido a la alta densidad de puntos dentro del área predicha, el error estándar estimado por *kriging* ordinario fue muy bajo cerca de los puntos observados (<7%), y también relativamente

bajo incluso en áreas con menor densidad de puntos observados (12-14%, Fig. 2.5B). El error de predicción del modelo espacial en realidad estaría influenciado por la proximidad de los datos usados para la interpolación espacial. Más allá de la relativa baja magnitud del error, mejorar la predicción en zonas con baja densidad de puntos influiría drásticamente en la confiabilidad de la estimación de las B_r .

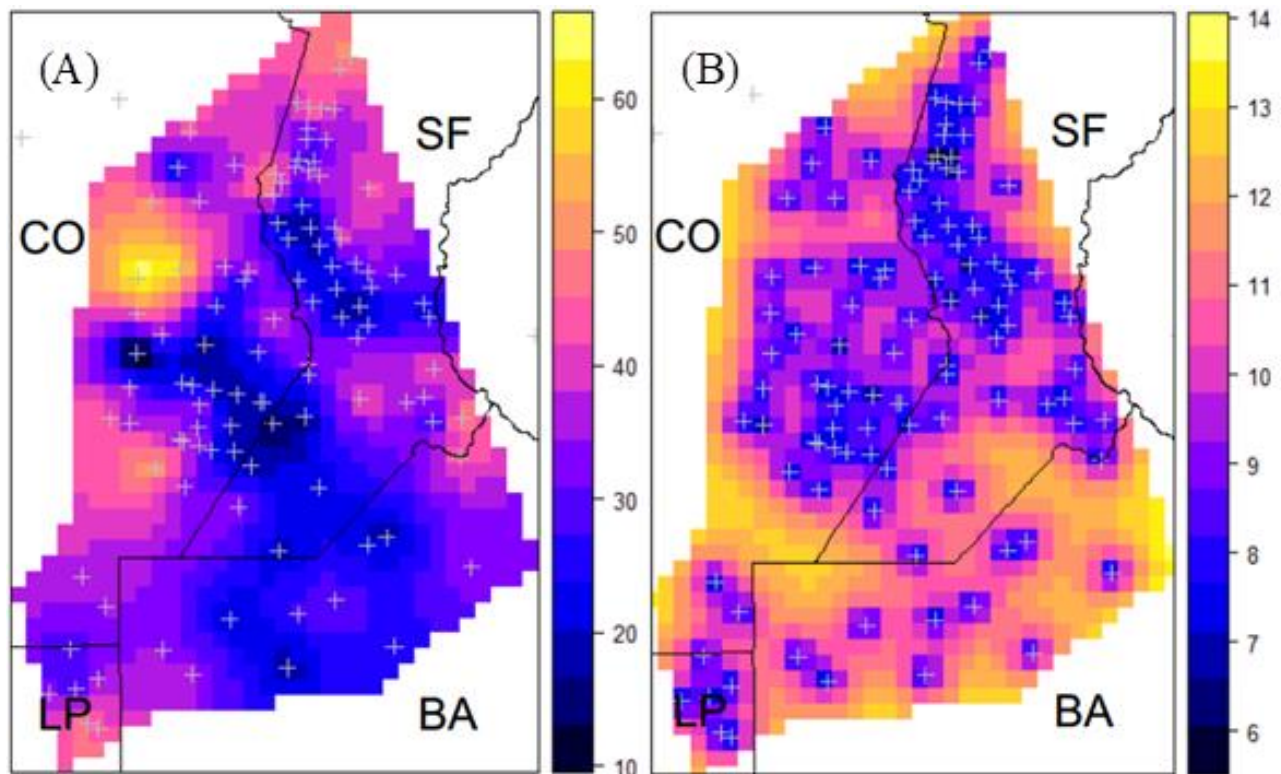


Fig. 2.5. Mapa de brecha de rendimiento (expresada como porcentaje del rendimiento potencial limitado por agua mediante máximos rendimiento de productores) para soja de primera interpolado por *kriging* ordinario (A) y su error de predicción estándar asociado (B) en la región de Central de Argentina. Diferentes códigos representan provincias argentinas, BA: Buenos Aires; CO: Córdoba; SF: Santa Fe y LP: La Pampa.

2.5. Discusión

Esta aproximación mediante observaciones de lotes de producción permitió una caracterización realista de la magnitud, los posibles determinantes y la dependencia espacial de la B_r de la soja en una de las regiones más productivas del mundo. La B_r de la soja fue cercana al 30% del $R_{pot.agua}$, pero varió de 0 a 68% y de 0 a 78% para soja de primera y de segunda, respectivamente. La magnitud de B_r estimada utilizando datos de productores fue similar a otros reportes para la región. Usando un enfoque de modelado de cultivos, Aramburu Merlos et al. (2015) estimaron una B_r de soja cercana al 25% para esta región. Esta estimación del 33,5% de B_r para soja de segunda no difirió de lo informado previamente en esta región para este tipo de cultivo (Andrade y Satorre, 2015). La importancia relativa del manejo y los factores ambientales que determinan las B_r fueron diferentes cuando se compararon soja de primera vs. de segunda. Esta diferencia probablemente explica la distribución espacial contrastante de B_r entre soja de primera y segunda en el Centro de Argentina. Este estudio amplía los conocimientos previos que identifican las condiciones ambientales y, lo que es más importante, las variables de manejo agronómico asociadas con la variación de B_r de soja. Esta información es fundamental para que los agricultores tomen decisiones para reducir la B_r .

El análisis de árbol de regresión es útil para identificar eficazmente variables relevantes asociadas a un fenómeno particular (Andrianasolo et al., 2014), presentando ventajas para explotar bases de datos de producción en proyectos de agricultura (Bosaz et al., 2019; Lobell et al., 2005; Matcham et al., 2020; Mourtzinis et al., 2018b). A pesar de la relativa baja proporción de variabilidad explicada por los árboles de regresión para ambos cultivos de soja en este capítulo, los valores de ajuste son similares a trabajos previos utilizando la misma aproximación (Bosaz et al., 2019; Lobell et al., 2005; Zheng et al., 2009). Adicionalmente, la proporción explicada de la variabilidad en las B_r por el modelo estadístico puede estar asociada al número de observaciones establecidos para cada nodo terminal. En general un mayor número de nodos terminales con pocas observaciones cada uno permite incrementar la variabilidad explicada por el modelo pero, como contrapartida, la visualización e interpretación de los resultados puede complejizarse demasiado. En este sentido, el número de observaciones dentro de cada nodo terminal, y por ende, el número de nodos terminales del modelo de árbol de regresión representó

un balance entre ajuste del modelo e interpretación y aplicabilidad de los resultados (Mourtzinis et al., 2018b).

Optimizar el manejo agronómico podría reducir B_r para soja de primera y segunda. Sin embargo, la importancia relativa de las variables de manejo agronómico para explicar la variación en B_r fue menor para soja de primera en comparación con soja de segunda, 66,5% frente al 90,8% de la variación explicada, respectivamente. Fechas de siembra tempranas se asociaron con reducida B_r en soja de primera. Esta relación también se describió en análisis previos en los Estados Unidos (Grassini et al., 2015a; Rattalino Edreira et al., 2017) y Brasil (Zanon et al., 2016). El cultivo antecesor fue el segundo factor de manejo más importante responsable de la variación en las B_r para soja de primera; lotes que incluyeron al maíz como cultivo antecesor mostraron una B_r reducida. Este resultado refuerza la importancia de la rotación con maíz para la productividad de la soja según lo informado en estudios previos (Marburger et al., 2016b; Mourtzinis et al., 2017b; Seifert et al., 2017). Para soja de segunda, la aplicación de fungicidas fue el factor de manejo más importante asociado con la variación de B_r . Por lo tanto, una medida de manejo protectora del rendimiento se volvió relevante debido a los efectos sobre el R_a (Bluck et al., 2015; Villamil et al., 2012). En relación con este punto, por otra parte, puede deberse a que en sojas de segunda el uso de ciertas medidas de manejo agronómico estén condicionadas por otros factores más allá de los evaluados. Por ejemplo, el uso o no de fungicidas podría estar asociado al hecho de que se apliquen fungicidas en forma preventiva en lotes de productividad mayor o incluso, que otras variables no contempladas en este capítulo estén condicionando la aplicación o no de fungicidas y por ende las B_r (*e.g.* inversión diferencial en el manejo de cultivo según tenencia de la tierra). Sobre este punto se propone una mejora en la aproximación en el punto 5.5.2 del Capítulo V. Por otro lado, la fertilización con P se asoció con reducciones de la B_r en lotes donde no se aplicaron fungicidas. Esta tendencia fue consistente con los aumentos de R_a observados en estudios realizados en Argentina (Calviño y Sadras, 1999) y en EE. UU. (Grassini et al., 2015a) en relación con el manejo de la fertilización con P. Más allá de estos resultados, una potencial limitante de este tipo de aproximaciones observacionales, es la aparición de relaciones de difícil de interpretación (*e.g.* importancia del fungicidas dónde no se aplicaron fertilizantes fosforados).

Estos resultados también contribuyen a desentrañar los principales factores ambientales que determinan la variabilidad de la B_r de soja. El tipo de suelo fue el principal factor asociado la B_r en soja de primera. Se observó una B_r reducida en lotes con tipos de suelo favorables, como Argiudoles y Hapludoles en comparación con los campos que tienen otros tipos de suelos. Se observaron resultados similares en el análisis de B_r realizado en sistemas de maíz regados de los EE. UU., donde menores valores de B_r se asociaron con tipos de suelos más productivos (Farmaha et al., 2016). A pesar de esta tendencia general, estudios previos indican que las propiedades del suelo pueden afectar el R_a y, por lo tanto, la magnitud de la B_r . Por ejemplo, Bacigaluppo et al. (2011) mostraron que el contenido de materia orgánica y la conductividad hidráulica saturada afectan el R_a de soja en Argiudoles del Centro de Argentina. Por lo tanto, las propiedades de suelo registradas *in situ* podrían contribuir a la puesta a punto de modelos predictivos que cuantifiquen la B_r en soja de primera. Para estos sistemas, temperaturas frescas durante noviembre se asociaron con una reducción de la B_r en siembras tempranas bajo suelos productivos de la zona. Esto podría estar relacionado con condiciones tempranas favorables durante el desarrollo del cultivo. Como se esperaba en los sistemas de secano, las precipitaciones se asociaron con reducciones en B_r tanto para soja de primera como de segunda. Por el contrario, elevadas precipitaciones durante marzo se asociaron con un aumento de la B_r para soja de primera. Este mes coincide con la madurez de cosecha en sojas de primera. Por lo tanto, los incrementos en las B_r podrían atribuirse a pérdidas de precosecha y enfermedades debido al exceso de agua durante la ventana de cosecha en la zona (Penalba et al., 2007).

La autocorrelación espacial local fue notablemente diferente entre soja de primera y segunda. Hubo una estructura de correlación espacial significativa que explicó aproximadamente el 80% de la variación de la B_r a distancias no mayores de 120 km para la soja de primera, mientras que no hubo autocorrelación espacial significativa para soja de segunda. La principal razón ambiental para este parche zonal o local en las B_r son las condiciones edáficas locales. Utilizando los datos de suelo disponibles para esta región (Cruzate et al., 2012), el tipo de suelo mostró un rango espacial de variación similar al observado para las B_r en el cultivo de soja de primera. La falta de autocorrelación espacial para la soja de segunda tiene dos posibles explicaciones sugeridas a partir de los datos. En primer lugar, la cantidad de campos muestreados fue menor en comparación con soja de primera. Aunque la cobertura espacial de muestreo fue muy similar entre ambos cultivos, el número lotes de soja de segunda muestreados fue

notablemente menor que el de primera. De hecho, el área de estudio espacial fue prácticamente la misma en ambos cultivos. En segundo lugar, la ausencia de estructura de autocorrelación en soja de la segunda podría estar relacionada con una mayor importancia relativa de las variables de manejo frente a las variables ambientales asociadas con la variación de las B_r . El manejo agronómico generalmente no sigue un patrón espacial claro, mientras que las variables ambientales siguen un patrón espacial más definido.

2.6. Conclusiones

Los resultados del presente capítulo mostraron valores de B_r cercanos a 30% del $R_{\text{pot.agua}}$. Sin embargo, las B_r variaron de 0 a 68% y de 0 a 78% para soja de primera y segunda, respectivamente. Hubo diferencias en los factores asociados a la variabilidad de las B_r entre ambos tipos de cultivos. La variabilidad de las B_r en soja de primera se asoció con variables ambientales y de manejo. En contraste, las variables de manejo explicaron >90% de la variabilidad de las B_r para soja de segunda. Por lo tanto, surgen diferentes estrategias productivas para cerrar las B_r para estas dos alternativas de producción de soja. La autocorrelación espacial local fue notablemente diferente entre ambos cultivos, con una estructura de correlación espacial significativa que explicó *ca.* 80% de la variación de B_r a distancias no mayores de 120 km para soja de primera. Por el contrario, no se encontró correlación espacial para soja de segunda. La aproximación presentada en este capítulo usando *ca.* 22.500 observaciones de agricultores permitieron caracterizar la magnitud, los posibles factores explicativos y la dependencia espacial de la B_r de soja en una de las regiones más productivas del mundo. Aunque en promedio la B_r es relativamente pequeña en comparación con otras regiones, todavía hay oportunidades para futuras mejoras en el rendimiento mediante el manejo agronómico.

Particularmente, tres aspectos de la investigación explicada en este capítulo justifican su aplicabilidad a otras regiones: (i) las oportunidades de mejora de rendimiento que se encontraron en este capítulo pueden adoptarse para otras regiones de producción de soja o sistemas agrícolas con adopción de tecnología similar y condiciones climáticas comparables; (ii) la interacción entre manejo y ambiente explorada puede ayudar a generar nuevas hipótesis sobre las causas potenciales de la magnitud de la B_r de soja en otras regiones de producción; y (iii) el presente enfoque utilizando y analizando datos a nivel de lotes de producción de agricultores demuestra ser un método válido que puede utilizarse para explorar B_r en otros cultivos.

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL MANEJO DE
INSUMOS EN LA REDUCCIÓN DE LAS BRECHAS
DE RENDIMIENTO DE SOJA EN SITUACIONES
ALTAMENTE PRODUCTIVAS**

III. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL MANEJO DE INSUMOS EN LA REDUCCIÓN DE LA BRECHAS DE RENDIMIENTO DE SOJA EN SITUACIONES ALTAMENTE PRODUCTIVAS

3.1. Resumen

Los agricultores de alta tecnología están interesados en explorar nuevas opciones de manejo para aumentar los R_a de soja. Se presume que la inclusión de un “tratamiento alto insumo” en los sistemas de alta tecnología puede reducir potencialmente las B_r , representando ganancias adicionales para los agricultores. Los objetivos fueron: (i) estimar el R_a , $R_{pot.agua}$ y la B_r en sistemas de soja de alto rendimiento; (ii) evaluar un tratamiento alto insumo como una opción de manejo para reducir la B_r ; (iii) identificar los factores ambientales y de manejo asociados a la respuesta de rendimiento a los insumos y (iv) determinar el resultado económico de incluir este tratamiento alto insumo en sistemas de soja de alto rendimiento. Se llevaron a cabo 27 experimentos en campos de producción comparando un sistema de manejo de insumos convencional vs. un novedoso tratamiento alto insumo para la Pampa Central Argentina. El tratamiento convencional fue el manejo comúnmente prescrito por los productores de la región. El tratamiento alto insumo incluyó insumos de uso no generalizado en la zona, como: fertilizantes de suelo con azufre (S) y Zn, semillas tratadas con insecticidas, fungicidas e inoculantes, productos para reducir el estrés, fertilizantes foliares con calcio (Ca) y boro (B) e insecticidas y fungicidas preventivos. Los insumos evaluados en este capítulo se deben fundamentalmente a disponibilidad en el mercado, y su potencial efecto sobre el R_a del cultivo de soja. El rendimiento del tratamiento alto insumo se denomina R_{ins} . El $R_{pot.agua}$ se estimó utilizando modelos de simulación de cultivo. Las B_r se calcularon como la diferencia entre $R_{pot.agua}$ y R_a . El promedio de R_a y $R_{pot.agua}$ fue de 4.571 y 5.100 kg ha⁻¹, respectivamente, con una B_r promedio del 12%. El R_{ins} promedio fue *ca.* 131 kg ha⁻¹ mayor que el R_a ($p < 0,001$), reduciendo la B_r en 2,6% ($p < 0,001$). La respuesta en rendimiento al uso de insumos se correlacionó positivamente con B_r , pH del suelo y negativamente con disponibilidad de P en el suelo. No se obtuvieron resultados económicos positivos con la inclusión del tratamiento alto insumo. Este estudio mostró bajos beneficios al incluir un tratamientos alto insumo para reducir la B_r en sojas de alto rendimiento donde las principales decisiones de manejo están actualmente optimizadas. Los aumentos de rendimiento futuros en este tipo de sistema deberán ser

traccionados por la mejora genética en el rendimiento potencial del cultivo de soja o por el uso de insumo con más chance de éxito basadas en evidencias científicas.

Palabras claves: estancamiento del rendimiento, alto insumo, adopción de tecnología, manejo de cultivos, ganancias, agricultores de alta tecnología.

Puntos destacados:

- La B_r de soja basada en modelos de simulación en situaciones de alto rendimiento fue del 12%
- El manejo de alto insumo redujo la B_r promedio a 9,4%
- La respuesta a los insumos se asoció a la B_r , pH y P del suelo.
- La utilización de insumos adicionales mostró resultados económicos negativos.
- El aumento de la producción en sistemas muy productivos dependerá de la mejora genética.

3.2. Introducción

Argentina es el tercer productor de soja a escala mundial, y su producción se realiza principalmente en condiciones de secano en la Pampa Central (Aramburu Merlos et al., 2015). Esta región ha mostrado aumentos de rendimiento durante los últimos años, impulsados por mejoras genéticas y de manejo agronómico (de Felipe et al., 2016; Satorre, 2011). El R_a está cerca de los niveles de rendimiento máximos en algunas áreas de la Pampa Central (Di Mauro et al., 2018/Capítulo II). En estas condiciones productivas de alto rendimiento, los futuros aumentos en R_a serían más difíciles de lograr, y la adopción de nuevas tecnologías agrícolas emerge como una alternativa para romper el estancamiento del R_a (Hatfield y Walthall, 2015; Lobell et al., 2009; Mueller et al., 2012). Los sistemas de soja de alto rendimiento en Argentina son conducidos principalmente por agricultores agrupados frecuentemente en asociaciones no gubernamentales que promueven y contribuyen con proyectos de investigación agrícola (Andrade y Satorre, 2015; Bosaz et al., 2019; Calviño y Sadras, 1999; Monzon et al., 2018). Estos agricultores de alta tecnología son responsables de una gran proporción de la producción de soja de Argentina y están preocupados por el estancamiento actual del R_a en sus sistemas de producción. Esta situación podría ser similar en diversos sistemas altamente productivos en todo el mundo (Ray et al., 2012; Van Rees et al., 2014). En este sentido, explorar alternativas de manejo para superar las tendencias actuales es relevante para ayudar a los agricultores en el diseño de esquemas de producción de cultivos (Van Rees et al., 2014).

El $R_{pot.agua}$ se define como el rendimiento de un genotipo adaptado que crece en condiciones de secano sin limitantes bióticas o nutricionales (Lobell et al., 2009). En los sistemas de cultivo de secano, se espera que se produzca un estancamiento cuando el R_a alcanza *ca.* 80% del $R_{pot.agua}$ (Cassman et al., 2010). El R_a de una población particular de productores agropecuarios refleja las prácticas de manejo de cultivos asociadas con sus habilidades y la aplicación de tecnología de insumos en un momento y región determinados (Sadras et al., 2015). Las diferencias entre $R_{pot.agua}$ y R_a se conocen comúnmente como B_r (Van Ittersum et al., 2013). Su cuantificación es crucial para evaluar la probabilidad de aumentar la productividad de los cultivos mediante mejoras en el manejo agronómico (Grassini et al., 2015a; Rattalino Edreira et al., 2017). A pesar de que los cultivos de soja en la Pampa Central se llevan a cabo en una amplia gama de condiciones ambientales y de manejo, reportes anteriores han estimado la B_r de soja

regional promedio sin distinción entre el acceso de los productores a la tecnología ni la productividad ambiental (Aramburu Merlos et al., 2015; Di Mauro et al., 2018/Capítulo II). En este sentido, una estimación específica de B_r para una población particular objetivo de productores o condiciones ambientales se vuelven relevantes para explorar posibles aumentos de producción a través de la optimización del manejo agronómico (Lollato et al., 2019; Mourtzinis et al., 2020; Rattalino Edreira et al., 2017).

Una gran proporción del R_a observado en los sistemas de secano de soja se explica por prácticas de manejo que definen la longitud del ciclo y la estructura del canopeo, como la fecha de siembra, el grupo de madurez, el espaciamiento entre hileras y la densidad de plantas (Andrade et al., 2019b; Gaspar et al., 2020; Mourtzinis et al., 2018b, 2017a). Una vez que estas importantes decisiones de manejo son optimizadas, para este capítulo se plantea la hipótesis de que los aumentos adicionales del R_a dependen del ajuste de opciones de manejo que mejoren la nutrición del cultivo y el crecimiento de las plantas (Van Rees et al., 2014). Hay muchas opciones en el mercado que ofrecen productos destinados a aumentar el R_a , como inoculantes, fertilizantes sólidos y foliares, o fitohormonas. Estudios previos han reportado una respuesta de rendimiento variable y errática a varios productos como semillas inoculadas, semillas tratadas con fungicidas e insecticidas, productos fertilizantes para la siembra, fertilizantes foliares, insecticidas y productos para reducir el estrés para ser aplicados en etapas reproductivas (Bender et al., 2015; de Bruin et al., 2010; Gaspar et al., 2014; Gregg et al., 2015; Leggett et al., 2017; Mourtzinis et al., 2019a; Ng et al., 2018; Seidel et al., 2015). Hasta el momento, el efecto de un manejo “alto insumo” no se ha probado en el contexto del análisis B_r en sistemas altamente productivos.

Varios estudios en los EE. UU. mostraron un efecto global positivo sobre el R_a de un tratamiento alto insumo en el cultivo de soja. Por ejemplo, Villamil et al. (2012) encontraron que un tratamiento alto insumo, el cual incluía insecticidas y fungicidas, aumentó el R_{ins} *ca.* 190 kg ha⁻¹ por sobre el R_a en 131 experimentos a campo en Illinois. Orłowski et al. (2016) en nueve estados de los EE. UU. encontraron una diferencia promedio de *ca.* 300 kg ha⁻¹ entre R_{ins} y R_a al evaluar un tratamiento completo alto insumo que comprendía tratamiento de semillas, fertilización nitrogenada, fungicida e insecticida. Marburger et al. (2016a) también observaron que un tratamiento completo alto insumo, el cual involucraba tratamiento de semillas, fertilizante

nitrogenado; hormonas y fertilizantes foliares, antioxidantes, fungicidas e insecticidas, produjeron *ca.* 230 kg ha⁻¹ más que R_a, en 19 localidades de EE. UU. Contrariamente, en Ohio, Bluck et al. (2015) mostraron que un tratamiento alto insumo consistente en inoculante, yeso, fertilizante con manganeso (Mn), insecticida y fungicida superó al R_a por *ca.* 335 kg ha⁻¹ en tan sólo 2 de 16 experimentos a campo. Mientras que en Wisconsin, Mourtzinis et al. (2016) mostraron que un tratamiento alto insumo que incluyó tratamiento de semillas, fertilizantes foliares, fungicidas e insecticidas tuvo un efecto inconsistente o mínimo sobre el R_a. Sin embargo, ninguno de los estudios mencionados anteriormente enmarcó las respuestas de rendimiento al uso de insumos dentro de un análisis B_r, lo que excluye cualquier idea sobre la probabilidad de respuesta en comparación con el manejo convencional.

El capítulo III de la presente tesis tiene cuatro objetivos principales. El primer objetivo fue estimar el R_a, R_{pot.agua} y la B_r en sistemas de producción de soja de alto rendimiento. El segundo objetivo fue evaluar un tratamiento alto insumo como una opción de manejo para reducir las B_r. El tercer objetivo fue identificar los factores ambientales y de manejo asociados con la respuesta de rendimiento al tratamiento con insumos. Finalmente, el cuarto objetivo fue determinar el resultado económico de incluir este tratamiento alto insumo en sistemas de soja de alto rendimiento en la región Central Argentina.

3.3. Materiales y Métodos

3.3.1. Experimentos de campo. Manejo y caracterización ambiental

Se realizaron experimentos en campos de productores durante las campañas 2014/2015 y 2015/2016 en la Pampa Central de Argentina. Los productores que se analizaron son miembros de organizaciones no gubernamentales, que típicamente producen utilizando altos niveles de adopción de tecnología. Dentro de cada localidad, los ensayos se plantearon en dos lotes de producción. Cada combinación de año, localidad y lote se consideró como un sitio, totalizando 27 sitios bajo análisis. En cada sitio, la siembra, la cosecha y la pulverización se manejaron con la tecnología disponible de los productores en condiciones de secano. El cultivar DM4612 (grupo de madurez IV intermedio) se evaluó en todos los sitios.

En cada sitio, se tomó al azar una muestra de suelo compuesta a 0,20 m de profundidad antes de la siembra. Se determinó el contenido de Carbono (Walkley y Black, 1934), Fósforo P-Bray I (Bray y Kurtz, 1945), pH (Reed y Cummings, 1945), capacidad de intercambio de cationes (CIC), Ca, Magnesio (Mg), potasio (K) mediante Acetato de Amonio (Sumner y Miller, 1996), Zn, Mn, cobre (Cu), hierro (Fe) (Ext. C / DTPA-espectrofotometría AA; Lindsay y Norvell, 1978) y B por Azometina (Keren, 1996). El contenido de carbono se convirtió en materia orgánica utilizando un factor de recuperación de 0,58 de acuerdo con Collino et al. (2015).

La caracterización física del suelo se realizó después de la cosecha de cada sitio entre las líneas de siembra, y evitando las huellas visibles de las operaciones de siembra, fumigación y cosecha. Se midió la resistencia a la penetración, la conductividad hidráulica saturada, la densidad aparente y la estabilidad estructural del suelo. La resistencia a la penetración se registró utilizando un penetrómetro digital (FieldScout SC 300) a intervalos de 0,025 m hasta los 0,45 m de profundidad en 20 estaciones ubicadas al azar en cada sitio, y luego se promedió por sitio. La conductividad hidráulica saturada del suelo se midió *in situ* a capacidad de campo del suelo utilizando 10 permeámetros de disco (Hillel, 1971; Perroux y White, 1988). La densidad aparente del suelo a 0,30 m de profundidad se determinó en dos sitios de muestreo dentro de lote siguiendo el método del cilindro (Blake y Hartge, 1986). Se tomaron dos muestras para estimar

la estabilidad estructural del suelo siguiendo el método de Le Bissonnais (1996). Este método fue validado para diferentes tipos de suelo en Argentina (Gabioud et al., 2011).

Se determinó la humedad de suelo al momento de la siembra (%) en cada sitio por el método gravimétrico (Klute, 1986) usando un barreno de suelo hasta 2 m. El contenido de agua en el suelo al momento de la siembra (mm) se estimó utilizando la humedad del suelo a la siembra y la densidad aparente (g cm^{-3}) y la profundidad del horizonte del suelo. El agua disponible en el suelo a la siembra se calculó utilizando el contenido de agua en el suelo de cada horizonte como la diferencia entre el contenido de agua observado y el límite inferior para ese horizonte particular. El límite inferior para cada tipo de suelo en estudio fue tomado de Andriani (2009). Se registró la presencia o no de napa hasta los 2 m de profundidad en cada sitio en evaluación según Gambin et al. (2016).

Las variables climáticas se estimaron combinando datos fenológicos y meteorológicos. Se registraron la radiación solar acumulada (MJ m^{-2}), la temperatura promedio del aire ($^{\circ}\text{C}$) y las precipitaciones acumuladas (mm). La precipitación diaria se registró en cada sitio. Se obtuvieron registros de radiación y temperatura de estaciones meteorológicas públicas cercanas (Andrade y Satorre, 2015; Mercau et al., 2007). Cuando faltó el dato radiación solar diaria, se obtuvieron los datos desde NASA-POWER (<http://power.larc.nasa.gov/>) (Aramburu Merlos et al., 2015). Las etapas de plena floración (R_2), inicio de llenado de granos (R_5) y madurez fisiológica (R_7) de acuerdo con la escala de Fehr y Caviness (1977) se estimaron mediante simulación con SIFESOJA (Peltzer, 2011) y se corroboraron con visitas en cada sitio. Los fechas simuladas para cada estadio fenológico presentan un buen ajuste con valores observados en una amplia gama de fechas de siembra y genotipos para la zona bajo estudio (Peltzer y Peltzer, 2013), lo que lo hace adecuado para investigación en Argentina (Collino et al., 2015). Las variables climáticas se calcularon para tres subperíodos dentro del ciclo del cultivo (Collino et al., 2015): (i) período vegetativo desde la siembra hasta R_2 ; (ii) período de establecimiento de granos de R_2 a R_5 , y (iii) período de llenado de granos de R_5 a R_7 .

3.3.2. Tratamientos de insumos

Se evaluó un tratamiento convencional y un tratamiento alto insumo en cada sitio. El tratamiento convencional consistió en los insumos más frecuentes utilizados por los agricultores en cada sitio y se consideró el manejo agronómico estándar para los agricultores de alta tecnología de esta región. En todos los sitios, el tratamiento alto insumo incluyó productos que generalmente no se aplican a escala comercial, y consistió en: (i) aplicación de S y Zn dentro de un fertilizante químico que incluía macronutrientes que el productor usualmente aplica en la siembra (24 kg N ha⁻¹; 80 kg P₂O₅ ha⁻¹; 20 kg S ha⁻¹; 2 kg Zn ha⁻¹), (ii) semillas tratadas con insecticidas, fungicidas, inoculantes [*Bradyrhizobium japonicum*] y *Rhizobacterias* promotoras del crecimiento de las plantas; (iii) un producto para reducir el estrés (cinetina, ácido giberélico y ácido 3-indol butírico) aplicado en R₃ (Fehr y Caviness, 1977), (iv) fertilización foliar (240 cm³ Ca ha⁻¹ y 15 cm³ B ha⁻¹) en R₃ y (v) insecticida preventivo (*Cloranthraniliprole* y *Dinotefuran*) también aplicado en R₃. Las dosis y volúmenes de aplicación de cada producto comercial siguieron las recomendaciones hechas por el fabricante. En ambos tratamientos, también se aplicaron fungicidas preventivos (estrobilurina y triazol) en R₃.

3.3.3. Análisis de brechas de rendimiento y respuesta en rendimiento al uso de insumos

El rendimiento (kg ha⁻¹) de cada tratamiento se estimó cosechando el área total de la parcela y se ajustó a 13,5% de humedad. Los rendimientos del tratamiento convencional y alto insumo se denominaron R_a y R_{ins}, respectivamente. La respuesta en rendimiento a los insumos se estimó como la diferencia entre R_{ins} y R_a.

Se hicieron simulaciones mediante modelos de cultivo para estimar R_{pot.agua} en cada sitio (Lollato et al., 2019). El R_{pot.agua} se estimó utilizando el modelo CROPGRO incluido en DSSAT v 4.6 (Jones et al., 2003). Este modelo fue ampliamente utilizado en estudios previos en Argentina que involucraron diferentes condiciones agroecológicas y de manejo (Aramburu Merlos et al., 2015; Mercau et al., 2007; Monzon et al., 2007). Debido a que no se contó con experimentos específicos para la calibración de los coeficientes genéticos del cultivar DM4612,

se utilizaron los coeficientes genéticos de tres bases experimentales diferentes para genotipos de similar ciclo y potencial de rendimiento. Para mayor solidez de las simulaciones del $R_{\text{pot.agua}}$, se corrieron tres estimaciones para cada sitio y luego se promediaron los tres valores del $R_{\text{pot.agua}}$ para cada uno. Los coeficientes provinieron de ensayos bien manejado de INTA Oliveros y de AACREA. Los coeficientes genéticos usados se presentan en Anexo Tabla 6.2.

A su vez, el método de estimación del $R_{\text{pot.agua}}$ es diferente al del capítulo II dado que el objetivo en esta sección es estimar el máximo rendimiento de esa campaña particular, de manera de evaluar las chances de aumento del R_a mediante la adición de insumos en cada uno de los 27 ambientes evaluados (Lollato et al., 2019). En este sentido, las aproximaciones de máximos rendimiento de productor no son aconsejables dado el escaso número de observaciones de acuerdo con Lobell et al. (2009).

Los datos del suelo y de clima necesarios para las simulaciones de cultivos se obtuvieron de diferentes fuentes de datos disponibles (Grassini et al., 2015b). El tipo de suelo se obtuvo de la plataforma web GeoINTA (<http://www.geointa.inta.gob.ar/>). Los archivos de clima necesarios para las simulaciones de cultivos se realizaron combinando registros climáticos diarios de cada sitio.

La B_r se estimó en cada sitio como la diferencia entre $R_{\text{pot.agua}}$ y R_a , expresada como porcentaje de $R_{\text{pot.agua}}$ (Lobell et al., 2009; Van Ittersum et al., 2013). La reducción de la B_r mediante el tratamiento de alto insumo se estimó como la diferencia entre $R_{\text{pot.agua}}$ y R_{ins} , expresada como porcentaje de $R_{\text{pot.agua}}$.

3.3.4. *Diseño experimental y análisis estadístico*

El diseño experimental en cada sitio fue un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones, excepto Bo_14H y Bo_14M que tenían dos repeticiones en cada tratamiento, y VT_14H y VT_14M que tenían dos repeticiones en el tratamiento convencional. El tamaño de la parcela fue de 15 m de ancho y 200 m de largo. El rendimiento y la B_r se analizaron siguiendo un modelo lineal de efectos mixtos utilizando el paquete *lme4* en el software R (Bates et al., 2010). Los sitios, repeticiones, tratamientos, la interacción tratamiento x sitio fueron los efectos

principales del modelo estadístico. El modelo incluyó repeticiones anidadas dentro del sitio. El tratamiento se consideró como efecto fijo; y las repeticiones, el sitio y la interacción tratamiento x sitio como efectos aleatorios. Se realizó un análisis de correlación entre la respuesta en rendimiento al uso de insumos con variables de manejo y ambiente en los sitios bajo estudio.

3.3.5. Análisis económico

Se realizó un análisis económico para cuantificar los ingresos adicionales generados en respuesta al uso del tratamiento alto insumo. El análisis económico se realizó para diferentes escenarios que variaron según el precio de los granos y el costo de los insumos. Se consideraron un total de 7 escenarios posibles: relación actual del precio del grano-costo del tratamiento alto insumo, 30% de aumento en el costo del tratamiento alto insumo, 30% de aumento en el precio del grano; disminución del 30% en el costo del tratamiento alto insumo, disminución del 30% en el precio del grano y sus combinaciones. También fue cuantificado las diferencias entre R_{ins} y R_a requeridas para cubrir los costos asociados (es decir, el punto de equilibrio) y el retorno de la inversión del tratamiento alto insumo (Orlowski et al., 2016).

Tanto el tratamiento convencional como el de alto insumo tuvieron aplicación de fungicidas en R_3 , por lo tanto, se supuso que los productos adicionales involucrados en el tratamiento alto insumo se mezclaron en tanque y no hubo un costo de aplicación adicional. Del mismo modo, la fertilización en la siembra no implicó un costo operativo adicional ya que los productores bajo estudio generalmente fertilizan la soja. Los precios (USD) por cada insumo involucrado en el tratamiento alto insumo se obtuvieron de la industria. El precio de venta de granos (USD) se obtuvo de la Bolsa de Comercio de Rosario (<http://www.bcr.com.ar>) que define el precio de referencia de la soja. Los resultados del análisis económicos están expresados en USD corrientes.

3.4. Resultados

3.4.1. Sistemas productivos explorados

El cultivo antecesor, la fecha de siembra, la densidad de plantas y el espacio entre hileras fueron diferentes dependiendo de las decisiones tomadas por cada productor en cada sitio (Tabla 3.1). El cultivo antecesor fue soja o maíz. Las fechas de siembra variaron del 22 de octubre al 28 de noviembre. El espacio entre hileras varió entre 0,36 y 0,52 m. La densidad de plantas varió de 22 a 44 pl m⁻². Los suelos fueron predominantemente Argiudoles, pero en algunos sitios estaban presentes Hapludoles, y Argialboles (Tabla 3.2). El rango de condiciones ambientales explorado, tanto para variables climáticas como parámetros físicos y químicos de suelo puede observarse en la Tabla 3.2.

Tabla 3.1. Descripción del manejo en cada sitio experimental en campos de productores de alta tecnología en la Pampa Central durante las campañas 2014/15 (2014) y 2015/2016 (2015).

Año	Localidad	Sitio	Cultivo antecesor	Fecha de Siembra	Densidad de plantas (pl m ⁻²)	Espaciamiento entre surcos (m)
2014	Bouquet	Bo_14A	Maíz	15 nov	42	0,35
		Bo_14M	Maíz	15 nov	42	0,35
	Carlos Pellegrini	CP_14A	Maíz	24 oct	29	0,42
		CP_14M	Soja	24 oct	29	0,42
	Corral de Bustos	CB_14A	Maíz	8 nov	38	0,52
		CB_14M	Soja	8 nov	38	0,52
	Estación Iturraspe	EI_14A	Maíz	14 nov	46	0,35
		EI_14M	Maíz	14 nov	46	0,35
	General Baldissera	GB_14A	Soja	14 nov	38	0,42
		GB_14M	Maíz	14 nov	38	0,42
	Rafaela	Ra_14A	Soja	26 nov	34	0,35
		Ra_14M	Soja	26 nov	34	0,35
	Teodelina	Te_14M	Maíz	22 nov	35	0,40
	Venado Tuerto	VT_14A	Soja	14 nov	34	0,35
		VT_14M	Soja	14 nov	34	0,35
2015	Bouquet	Bo_15A	Maíz	21 oct	44	0,52
		Bo_15M	Maíz	21 oct	44	0,52
	Casalegno	Ca_15A	Soja	2 nov	25	0,36
		Ca_15M	Soja	2 nov	27	0,36
	Colonia Italiana	CI_15A	Maíz	6 nov	33	0,52
		CI_15M	Maíz	6 nov	25	0,52
	Estación Iturraspe	EI_15A	Maíz	27 oct	33	0,42
		EI_15M	Maíz	27 oct	33	0,42
	Rafaela	Ra_15A	Soja	14 nov	22	0,38
		Ra_15M	Soja	14 nov	26	0,38
	Teodelina	Te_15A	Maíz	5 nov	25	0,40
		Te_15M	Soja	28 nov	25	0,40

Tabla 3.2. Rango explorado de variables climáticas y de parámetros fisicoquímicos de suelo en 27 sitios evaluados en la Pampa Central Argentina. Las siglas S, R₂, R₅ y R₇, corresponden a siembra, plena floración, inicio de llenado de semillas y madurez fisiológica, respectivamente, de acuerdo con la escala de Fehr y Caviness (1977).

Variable	Tipo	Unidad	Rango	Variable	Tipo	Unidad	Rango
Presencia napa ^a	Suelo		Si/No	pH	Suelo/química		5,1 - 5,7
Agua útil S ^a	Suelo	mm	343-484	Materia orgánica	Suelo/química	%	2-1 - 3,2
Conductividad hidráulica	Suelo/física	mm h ⁻¹	8,9 – 31,3	Nitratos	Suelo/química	ppm	12 - 34
Estabilidad Estructural	Suelo/física		1,13 – 1,90	P	Suelo/química	ppm	7 - 44
Densidad aparente	Suelo/física	g cm ⁻³	1,01 – 1,38	Ca	Suelo/química	cmol kg ⁻¹	6,1 – 9,7
Temperatura S-R ₂	Clima	°C	21,2 – 24,1	Mg	Suelo/química	cmol kg ⁻¹	1,5 – 2,7
Temperatura R ₂ -R ₅	Clima	°C	22,9 – 27,3	K	Suelo/química	cmol kg ⁻¹	0,8 – 2,2
Temperatura R ₅ -R ₇	Clima	°C	21,3 – 26,2	Zn	Suelo/química	mg kg ⁻¹	0,6 – 1,4
Radiación S-R ₂	Clima	MJ m ⁻²	189 – 1.648	Mn	Suelo/química	mg kg ⁻¹	31 – 74
Radiación R ₂ -R ₅	Clima	MJ m ⁻²	96 - 745	Cu	Suelo/química	mg kg ⁻¹	0,9 – 2,4
Radiación R ₅ -R ₇	Clima	MJ m ⁻²	144 – 1.140	Fe	Suelo/química	mg kg ⁻¹	34 – 123
Precipitaciones S-R ₂	Clima	mm	134 - 343	B	Suelo/química	mg kg ⁻¹	0,4 – 0,8
Precipitaciones R ₂ -R ₅	Clima	mm	36 - 285	Saturación de bases	Suelo/química	%	65 - 97
Precipitaciones R ₅ -R ₇	Clima	mm	144- 356	CIC	Suelo/química	cmol kg ⁻¹	11 – 15
Disponibilidad hídrica ^b	Clima	mm	626 – 1.226	Resistencia a la penetración	Suelo/física	KPa	1.800 – 3.400
Tipo de suelo	Suelo		Argiudol, Hapludol, Argialbol				

^a, hasta los 2 m de profundidad; ^b agua útil a la siembra más precipitaciones durante el ciclo del cultivo.

3.4.2. Análisis de brechas de rendimientos y respuesta al uso de insumos.

En general, el $R_{\text{pot.agua}}$ promedio fue de 5.633 y 4.656 kg ha^{-1} en 2014 y 2015, respectivamente (Fig. 3.1). El $R_{\text{pot.agua}}$ mínimo fue de 3.818 y 3.842 kg ha^{-1} en Ca_15H y Ca_15M, respectivamente, mientras que el $R_{\text{pot.agua}}$ máximo fue de 6.203 kg ha^{-1} en GB_14H y GB_14M (Figura 3.1). Por su parte, el R_a promedio a través de los sitios fue *ca.* 4.570 kg ha^{-1} (Tabla 3.3) con un R_a mínimo y máximo de 2.838 y 5.767 kg ha^{-1} en Ca_15H y CP_14H, respectivamente (Fig. 3.1). La B_r promedio fue de *ca.* 12% del $R_{\text{pot.agua}}$ (Tabla 3.3), variando desde 0 a 30% (Fig. 3.1).

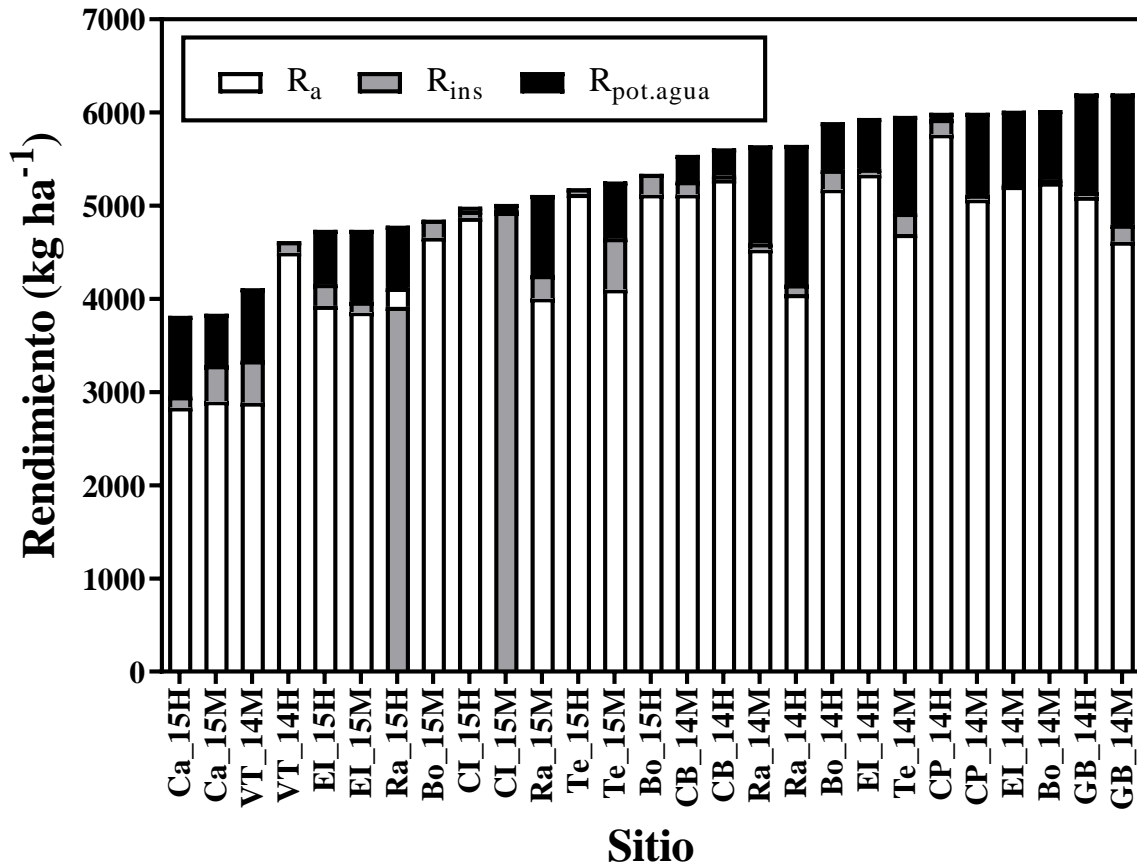


Fig. 3.1. Rendimiento potencial limitado por agua ($R_{\text{pot.agua}}$), rendimiento del tratamiento alto insumo (R_{ins}) y rendimiento de tratamiento de insumos convencional (R_a) de productores de alta tecnología en diferentes sitios de la región Central de Argentina. Los sitios corresponden a diferentes combinaciones de año x localidad x lote. Los sitios dónde se muestra las barras grises por delante de las blancas son sitios dónde el R_{ins} fue menor al R_a .

El R_{ins} promedio a través de los sitios evaluados fue de aproximadamente 4.700 kg ha^{-1} (Tabla 3.3). El R_{ins} mínimo y máximo fue de 2.956 y 5.932 kg ha^{-1} , en Ca_15H y CP_14H, respectivamente (Fig. 3.1). A través de todos los sitios, el R_{ins} fue en promedio 131 kg ha^{-1} mayor que R_a ($p < 0,001$; Tabla 3.3); sugiriendo que la diferencia promedio entre R_{ins} y R_a fue $3,6\%$ con respecto a R_a . Este resultado destaca que los sistemas de soja bajo análisis mostraron una reducida B_r explotable, sin embargo, la reducción de las B_r mediante el tratamiento alto insumo fue del $2,6\%$ da través de todos los sitios ($p < 0,001$; Tabla 3.3).

Tabla 3.3. Modelos de efectos mixtos para rendimiento y brecha de rendimiento en experimentos en campos de productores tecnificados de la región Central de Argentina bajo condiciones de alto rendimiento.

<i>Efectos Aleatorios</i>	Rendimiento		Brecha de Rendimiento	
	Varianza	DE	Varianza	DE
Repetición	27.519,0	165.9	14,6	3,8
Sitio	546.222,0	739.1	134,9	11,6
Tratamiento x Sitio	2.152,0	46.4	1,8	1,4
Residual	2.6732,0	163.5	10,6	3,3
	Estimador	EE	Estimador	EE
<i>Efectos Fijos</i>	(kg ha^{-1})	(kg ha^{-1})	(%)	(%)
Intercepto	4.570,7***	145,0	11,9***	2,3
Tratamiento	131,2***	29,4	-2,6***	0,6

DE, desvío estándar; EE, error estándar, *** $p < 0,001$

La variación asociada con el sitio tuvo la mayor contribución a la variación total del rendimiento (89% ; datos no presentados). La interacción tratamiento x sitio explicó una proporción de la variación explicada por el modelo ($< 1\%$; datos no presentados). Sin embargo, las diferencias $R_{ins} - R_a$ mostraron un amplio rango de variación a través de los sitios en evaluación (Figura 3.1). Para el conjunto de observaciones, el 95% mostró efectos sobre

rendimiento asociados con el tratamiento alto insumo, y el 5% restante no mostró diferencias entre R_{ins} y R_a . Las observaciones con valores negativos fueron del 23% del total de datos, con diferencias de $R_{ins} - R_a$ de aproximadamente -150 kg ha^{-1} . Por otro lado, el 72% de las observaciones mostraron diferencias positivas entre R_{ins} y R_a , con un promedio de respuesta al tratamiento alto insumo de 230 kg ha^{-1} .

3.4.3. Factores condicionantes de la respuesta al uso de insumos

Los coeficientes de correlación de Pearson entre la respuesta en rendimiento al tratamiento alto insumo y las variables de manejo, suelo y clima permitieron encontrar algunas variables específicas del sitio que podrían maximizar la respuesta al uso de insumos evaluados. Los coeficiente de Pearson explorados variaron entre $-0,26$ a $0,30$ (Fig. 3.3). En general, se encontraron mayores asociaciones entre $R_{ins}-R_a$ para variables de suelo que de manejo o climáticas (Fig. 3.3). Los parámetros del suelo como pH ($p<0,01$) y P ($p<0,05$) se correlacionaron positiva y negativamente, respectivamente, con las diferencias entre $R_{ins}-R_a$ (Fig. 3.3). A pesar de esta tendencia general, la magnitud de los coeficientes de correlación de pH y P sugiere que este tipo de covariables no podrían explicar totalmente las diferencias de $R_{ins}-R_a$.

A su vez, el $R_{pot.agua}$ no se correlacionó con las diferencias entre R_{ins} y R_a (Fig. 3.4A; B). Contrariamente, las diferencias $R_{ins}-R_a$ se correlacionaron con la magnitud de las B_r de cada sitio (Fig. 3.4A; B). A través de los sitios, $R_{ins}-R_a$ aumentó *ca.* 3 kg ha^{-1} por cada unidad porcentual de B_r ($p<0,05$; $R^2=0,19$; Fig. 3.4C); representando un aumento del rendimiento del 0,25% con respecto a R_a ($p<0,001$; $R^2=0,28$; Fig. 3.4D). Estos resultados sugieren que el efecto del tratamiento alto insumo sobre el R_a está asociado a la magnitud de B_r , independientemente de $R_{pot.agua}$ del sitio.

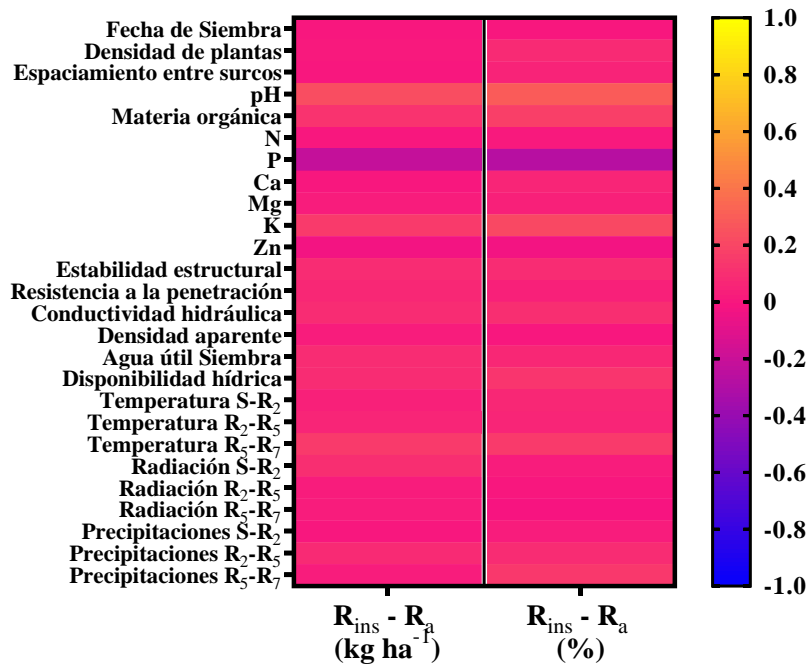


Fig. 3.3. Mapa de calor con los coeficientes de correlación de Pearson entre la respuesta en rendimiento al tratamiento alto insumo y las variables de manejo y ambientales de 27 sitios de alto rendimiento de la región Central Argentina. La respuesta en rendimiento al tratamiento alto insumo se calculó como la diferencia entre el rendimiento del tratamiento alto insumo (R_{ins}) y el rendimiento del tratamiento convencional (R_a) para cada sitio. R_2 , R_5 y R_7 corresponden a etapas fenológicas según Fehr y Caviness (1977)

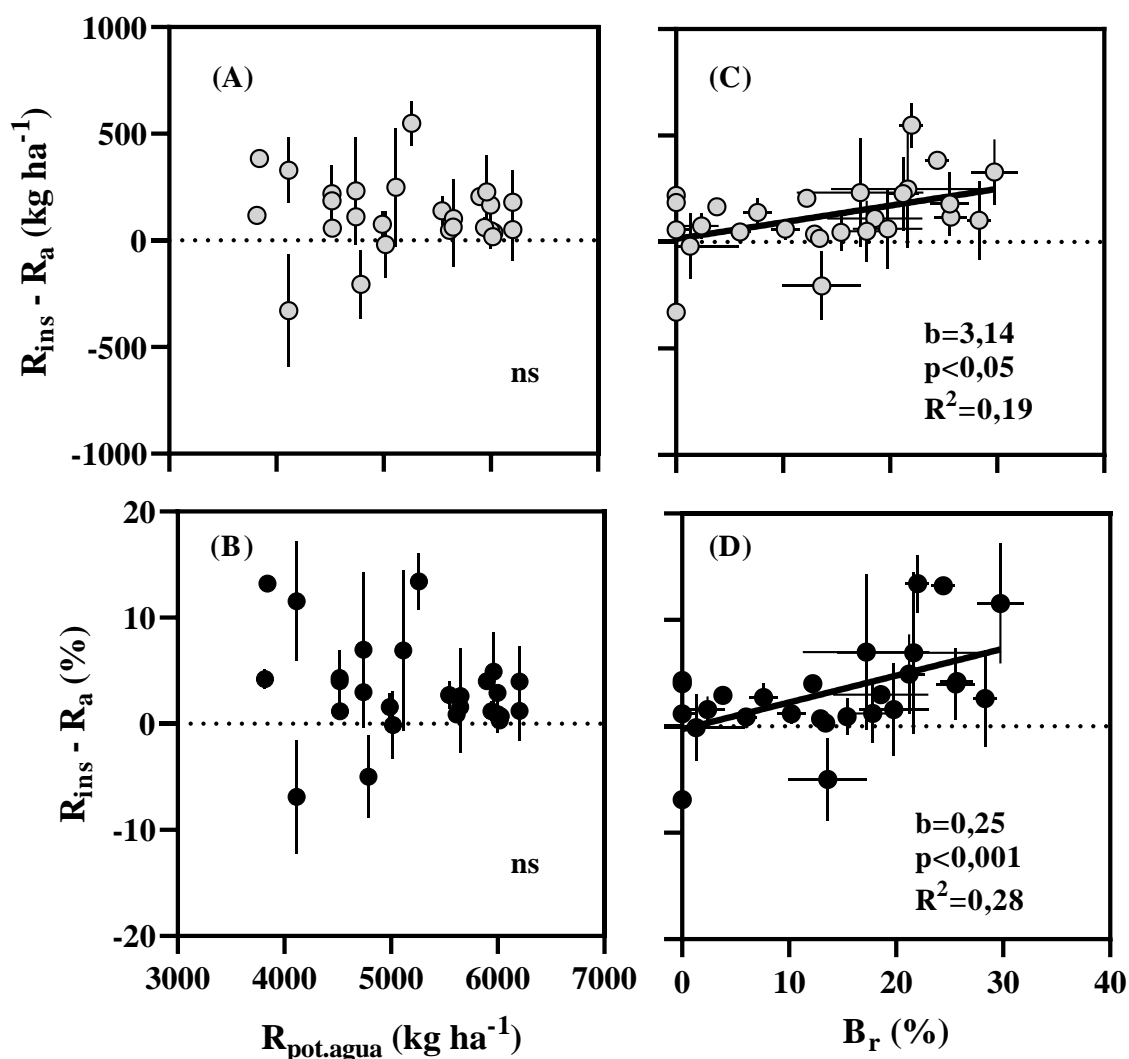


Fig. 3.4. Relaciones entre la respuesta al uso de insumos en términos absoluto (A y C) y relativo (B y D) al tratamiento convencional con el rendimiento potencial limitado por agua ($R_{\text{pot.agua}}$) y la brecha de rendimiento (B_r) en 27 ambientes de la región Central Argentina. ns; no significativo.

3.4.4. Resultado económico del tratamiento con insumos

Bajo el escenario económico actual (2020), la adopción del tratamiento alto insumo en evaluación mostró un resultado económico negativo de USD 94 ha^{-1} (Tabla 3.4). Para cubrir los costos de incluir el tratamiento alto insumo, R_{ins} debería ser 445 kg ha^{-1} más que R_a (Tabla 3.4). Bajo el escenario económico actual, R_{ins} debería ser 758 kg ha^{-1} más que R_a para obtener el

retorno de la inversión por usar el tratamiento alto insumo (Tabla 3.4). En general, se observaron resultados negativos en diferentes escenarios proyectados al cambiar los costos de los insumos y los precios de los granos (Tabla 3.4). Incluso en el escenario más favorable (es decir, un aumento del 30% en el precio del grano y una reducción del 30% en los costos de los insumos), con la respuesta en rendimiento observada, el análisis económico mostró un resultado negativo de USD 42 ha⁻¹ (Tabla 3.4).

Tabla 3.4. Resultado económico de la adopción de un tratamiento alto insumo bajo el escenario económico actual y en diferentes relaciones esperadas de costo de insumo / precio de venta de granos. El punto de equilibrio y el retorno de la inversión se calcularon como la diferencia requerida entre los rendimientos del tratamiento alto insumo (R_{ins}) y el tratamiento convencional (R_a) para cubrir el costo de los insumos y el retorno de la inversión del uso del tratamiento alto insumo, respectivamente.

	$R_{ins}-R_a$ (kg ha ⁻¹)	Escenario actual	Costo Insumos ^a		Precio grano ^a		Costo insumos/Precio grano ^a	
			+30%	-30%	+30%	-30%	+30% y -30%	-30% y +30%
			(USD ha ⁻¹)					
Promedio en experimentos	131	-94	-134	-54	-82	-106	-146	-42
Punto de equilibrio	445	0	-40	40	40	-40	-80	80
Retorno de la inversión	758	94	54	134	162	26	-14	202

^a Cambios en el costo de los insumos y el precio del grano en relación con el escenario actual.

3.5. Discusión

El enfoque abordado en este capítulo, que combina experimentos de campo, modelado de cultivos y análisis económico permitió una evaluación exhaustiva de las posibilidades de aumentar los niveles actuales de R_a de soja mediante la adición de insumos en sistemas de alto rendimiento. La adopción de sistemas de alto insumo aumentó el R_a , y el aumento del rendimiento se asoció a la magnitud de la B_r y a ciertas variables edáficas específicas del sitio. Sin embargo, la adopción del tratamiento alto insumo mostró un valor económico limitado para los productores de alta tecnología de la región evaluada. De esta manera, la inclusión del tratamiento alto insumo no sería una práctica atractiva para los productores evaluados en la región.

El $R_{\text{pot.agua}}$ se considera como punto de referencia para la productividad de los cultivos en condiciones de secano (Lobell et al., 2009). El $R_{\text{pot.agua}}$ se puede estimar utilizando diferentes enfoques, lo que puede conducir a diferentes magnitudes (Lobell et al., 2009). En este estudio, el $R_{\text{pot.agua}}$ promedio fue de 5.100 kg ha⁻¹. Esta estimación del $R_{\text{pot.agua}}$ utilizando modelos de cultivos fue consistente con reportes anteriores que utilizaron el enfoque alternativo de rendimiento máximo de los productores implementado en la misma región (Di Mauro et al., 2018/Capítulo II). Por el contrario, las estimaciones de $R_{\text{pot.agua}}$ de este capítulo fueron más altas en comparación con las estimaciones de modelos de cultivos regionales, probablemente asociadas con un mayor suministro de agua y una siembra más temprana explorada en estos experimentos (Aramburu Merlos et al., 2015; Grassini et al., 2015a). Los $R_{\text{pot.agua}}$ explorados en este capítulo son comparables con condiciones de altos rendimiento explorados en otras regiones de producción del mundo (Adams et al., 2018a; Grassini et al., 2015a; Purcell y Van Roekel, 2019; Van Roekel y Purcell, 2014).

El R_a de una población específica de productores agropecuarios refleja las prácticas de manejo de cultivos asociadas con sus habilidades y la aplicación de tecnología de insumos (Sadras et al., 2015). El presente capítulo involucró el estudio de un grupo de productores de alta tecnología, representativo de la agricultura moderna, el cual se puede encontrar en varias regiones altamente productivas del mundo (Van Rees et al., 2014). El R_a promedio en este estudio bajo manejo convencional fue de 4.571 kg ha⁻¹, más alto que el reportado previamente para esta región (Andrade y Satorre, 2015; Aramburu Merlos et al., 2015; Bosaz et al., 2019; Di

Mauro et al., 2018/Capítulo II). Un R_a mayor era esperable en la población de productores evaluados en este estudio, dado que los sistemas de alta tecnología generalmente muestran incrementos en el R_a respecto al promedio regional (Monzon et al., 2018). Además, este resultado puede explicarse por condiciones específicas de los sitios evaluados en este capítulo. En este sentido, una combinación de disponibilidad hídrica, tipo de suelo, siembras tempranas, radiación acumulada durante el ciclo de cultivo, rotación de cultivos y cultivar permitió condiciones de alto rendimiento en este estudio (Di Mauro et al., 2018/Capítulo II; Grassini et al., 2015a; Rattalino Edreira et al., 2020, 2017; Seifert et al., 2017).

El análisis de B_r es crítico para evaluar las causas que existen detrás de reducciones del rendimiento y para delinear estrategias para mejorar el rendimiento (Sadras et al., 2015). Para este capítulo, la B_r observada en base a los niveles de $R_{pot.agua}$ y R_a explorados para estos sistemas de alta tecnología fue del 12%, y esta magnitud fue relativamente baja en comparación con informes anteriores para la Pampa Central (Aramburu Merlos et al., 2015; Di Mauro et al., 2018/Capítulo II; Licker et al., 2010) y a otras regiones de producción como Brasil (Sentelhas et al., 2015) o incluso EE. UU. (Grassini et al., 2015a; Rattalino Edreira et al., 2017). A pesar la reducida magnitud de la B_r , los resultados del presente capítulo sugieren que la adición de insumos puede ayudar a los productores a aumentar marginalmente los rendimientos en sus explotaciones comerciales, de manera similar a los hallazgos anteriores en estudios de altos insumos realizados en EE. UU. (Bluck et al., 2015; Marburger et al., 2016a; Orłowski et al., 2016; Villamil et al., 2012).

Sin embargo, pocos estudios exploraron las causas potenciales de la respuesta en rendimiento a la adición de insumos con la intención de predecir la respuesta esperada dada cierta información del ambiente o manejo agronómico. Este estudio amplía el conocimiento actual de los posibles condicionantes que afectan la respuesta en rendimiento de la soja a la aplicación de insumos. Estudios anteriores diseccionaron respuestas a los insumos basadas en áreas geográficas (Orłowski et al., 2016), sin distinción sobre variables informativas específicas del sitio de producción (por ejemplo, propiedades del suelo), muchas de las cuales exhiben variabilidad de lote a lote dentro de una región determinada. Estos resultados sugieren que existen condicionantes de suelo que limitan la respuesta al uso de insumos, como pH y P, los cuales también fueron documentados como variables relevantes que afectan los rendimientos de

soja en otras regiones productoras (Adams et al., 2018a; Kaspar et al., 2004; Smidt et al., 2016; Sucunza et al., 2018; Villamil et al., 2012). La identificación de las propiedades del suelo como predictores de la respuesta a los insumos puede estar asociada al hecho de que el tratamiento alto insumos evaluado se diseñó principalmente para corregir posibles déficits nutricionales para los sistemas de soja en el centro de Argentina (Sainz Rozas et al., 2013). En este sentido, es ampliamente conocido que el P es necesario para lograr altos rendimientos de soja (Balboa et al., 2018; Bender et al., 2015; Gaspar et al., 2017), y por lo tanto, la respuesta en rendimiento debería estar asociada con el nutriente más limitante del suelo o con factores que afectan su disponibilidad para los cultivos.

La respuesta en rendimiento de la soja a los insumos se correlacionó con la B_r a pesar de que el rango explorado fue bajo. Este hecho puede dar algunos indicios de que las B_r del cultivo de soja están asociadas a aspectos nutricionales, dado que el paquete de insumos evaluado en este capítulo estuvo principalmente compuesto por productos destinados a mejorar la nutrición del cultivo de soja. Los estudios previos de tratamientos alto insumo en soja no cuantificaron la B_r para evaluar la probabilidad de que R_a pueda aumentar mediante la adición de insumos. El enfoque de este capítulo resaltó que la cuantificación de la B_r es crítica para contextualizar la probabilidad de un aumento de R_a mediante la adición de insumos. Más allá de la respuesta de rendimiento observada, el tratamiento alto insumo mostró beneficios económicos limitados para los productores de alta tecnología. La relación entre niveles no explotables de B_r y resultados económicos negativos por la adición de insumos fue informada anteriormente. Lobell et al. (2009) sugirieron que B_r inferiores al 20% no son explotables a través del manejo de insumos, dado que los productores agropecuarios buscan maximizar las ganancias, no los rendimientos. Estos resultados sugieren limitadas oportunidades para mayores aumentos del R_a en sistemas de soja de alto rendimiento manejados de manera óptima por los productores de alta tecnología. Los hallazgos de este capítulo refuerzan la idea de que el aumento de la productividad para los agricultores de alta tecnología dependerá principalmente del aumento del rendimiento potencial genético de los cultivares de soja (Cooper et al., 2020).

3.6. Conclusiones

Los resultados de este capítulo mostraron que los productores de soja de alta tecnología están por encima de la magnitud de B_r considerada como explotable. El $R_{\text{pot.agua}}$ y R_a de este tipo de sistemas fue en promedio de 5.100 y 4.700 kg ha⁻¹, respectivamente. Esto se tradujo en B_r explotables reducidas las cuales fueron en promedio *ca.* 12% del $R_{\text{pot.agua}}$. Sin embargo, la inclusión de un tratamiento con insumos no frecuentemente aplicados por los agricultores de la región ayudó a reducir aún más la B_r . El tratamiento alto insumo, redujo la B_r *ca.* 3%, pero mostrando una rentabilidad económica limitada para este tipo de sistemas productivos. La respuesta de rendimiento al uso de insumos no se correlacionó con $R_{\text{pot.agua}}$, pero se asoció a la magnitud de B_r , pH y P del suelo. Este capítulo resalta tres cuestiones importantes: (i) la relevancia de cuantificar las B_r para contextualizar las posibilidades de aumento de R_a a través de un tratamientos alto insumo; (ii) la importancia de caracterizar los sitios de producción de soja para comprender las respuestas erráticas frecuentes al uso de ciertos insumos, y (iii) la recomendación sobre el uso de insumos para el cierre de las B_r requiere una evaluación económica para su adopción a escala comercial.

**EXPLORANDO OPCIONES DE MANEJO PARA
EL CIERRE DE BRECHAS DE RENDIMIENTO DE
SOJA EN AMBIENTES CON DISPONIBILIDAD
HÍDRICA CONTRASTANTE⁴**

⁴ El contenido de este capítulo fue publicado en: **Di Mauro, G.**; Borrás, L.; Rugeroni, P.; Rotundo, J.L. 2019. Exploring soybean management options for environments with contrasting water availability. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 205, 274-282.

IV. EXPLORANDO OPCIONES DE MANEJO PARA EL CIERRE DE BRECHAS DE RENDIMIENTO DE SOJA EN AMBIENTES CON DISPONIBILIDAD HÍDRICA CONTRASTANTE

4.1. Resumen

La soja se cultiva comúnmente en condiciones de secano, siendo la disponibilidad hídrica la principal limitante. Se evaluó el rendimiento de diferentes manejos agronómicos en ambientes con disponibilidad hídrica contrastante para cuantificar posibles penalidades entre los manejos agronómicos para reducir la brecha B_r y la tolerancia a estrés hídrico y para identificar las variables ecofisiológicas relacionadas. Se diseñaron cuatro tratamientos a través de combinaciones específicas de cultivar, espaciamiento entre hileras y densidad de plantas. Se clasificaron como estrategias de tolerancia a estrés o de rendimiento potencial, y se evaluaron bajo dos ambientes contrastantes de disponibilidad hídrica. Los ambientes oscilaron entre 349 y 954 mm de disponibilidad total de agua. Los ambientes con estrés hídrico rindieron 72 y 59% del ambiente regado en cada año, similar a los niveles frecuentes de estrés hídrico de la soja para esta región de producción. Los tratamientos de manejo mostraron diferencias significativas para rendimiento ($p < 0,05$), pero la interacción de manejo x disponibilidad de agua no ($p = 0,42$). Ninguna opción de manejo ayudó a reducir los efectos negativos del estrés hídrico. Los mayores rendimientos se lograron utilizando un espaciamiento entre hileras de 0,25 m, una densidad de plantas de 60 pl m^{-2} y un genotipo de alto potencial de rendimiento. Las variaciones en el rendimiento se explicaron por las diferencias en el número de granos cosechados por unidad de área ($R^2 = 0,75$; $p < 0,001$) y la captura total aparente de N a madurez ($R^2 = 0,93$; $p < 0,001$) en todos los ambientes. Debido a que las estrategias de manejo específicamente adaptadas para hacer frente a la escasez de agua mostraron un valor limitado, los productores deben apuntar a posibles opciones de manejo que busquen cerrar las B_r .

Palabras claves: rendimiento, estrategia de manejo, tolerancia a estrés, rendimiento potencial, captura total de N.

Puntos destacados:

- Ninguna opción de manejo ayudó a reducir los efectos negativos del estrés hídrico.
- Los mayores rendimientos se lograron con una estrategia de rendimiento potencial
- Las variaciones en el rendimiento se explicaron por el número de granos por unidad de área y la captura total aparente de N.
- Los agricultores deben buscar maximizar la productividad mediante el manejo.

4.2. Introducción

La agricultura mundial debe aumentar la producción actual para satisfacer la demanda futura de alimentos y biocombustibles (Godfray et al., 2010). Alcanzar este objetivo de manera sustentable requiere aumentar la productividad de los cultivos por unidad de área (Cassman, 1999), cerrando potenciales B_r . La clave para aumentar la productividad de los cultivos es comprender los principales factores limitantes del rendimiento. Los conceptos teóricos útiles para desentrañar los factores limitantes de cualquier sistema de producción son la comprensión del rendimiento potencial, el $R_{\text{pot.agua}}$ o nutrientes y el R_a (Van Ittersum y Rabbinge, 1997). Evans (1993) define al rendimiento potencial como el rendimiento de un genotipo adaptado que crece en condiciones favorables sin limitaciones de agua, nutrientes, plagas o enfermedades. Está determinado por la radiación solar, el dióxido de carbono y la eficiencia del uso de la radiación del cultivo. El $R_{\text{pot.agua}}$ o nutrientes es menor que el potencial debido a la disponibilidad subóptima de agua o nutrientes. El R_a es el rendimiento cosechado, asociado con la presencia de adversidades bióticas.

Estos niveles de rendimiento se modifican por decisiones agronómicas comunes (Van Ittersum y Rabbinge, 1997). El rendimiento potencial varía con la fecha de siembra, el genotipo, el espaciamiento entre hileras y la densidad de plantas. El $R_{\text{pot.agua}}$ o nutrientes puede aumentar al eliminar estas restricciones ambientales mediante el riego y la fertilización (Licker et al., 2010; Mueller et al., 2012). El R_a puede aumentar controlando los factores bióticos reductores, como las malezas y las plagas. La estrategia para el cierre de B_r está asociada al tipo de ambiente productivo. En este sentido, el R_a puede aumentar mediante estrategias para aumentar el rendimiento potencial en ambientes favorables (Grassini et al., 2011), o mediante estrategias para mitigar el estrés de los cultivos en ambientes desfavorables (Passioura, 2006).

El principal factor que determina la productividad del cultivo en los sistemas de secano es la disponibilidad hídrica (Boyer, 1982). La soja se cultiva en condiciones de secano en la mayoría de las regiones de producción. En Argentina, a pesar de la abundante disponibilidad de agua, pueden ocurrir períodos aleatorios de estrés hídrico asociados con el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (Ropelewski y Halpert, 1996) y a otros fenómenos climáticos. La variabilidad en las precipitaciones provoca una variación sustancial en el rendimiento de la soja a lo largo de los años (Aramburu Merlos et al., 2015; Podestá et al., 1999; Sinclair et al., 1992). En general,

los déficits hídricos durante las etapas reproductivas afectan el rendimiento de la soja más que los déficits durante los vegetativos (Ashley y Ethridge, 1978; Brown et al., 1985; Doss et al., 1974). Las variaciones en el número de granos y el peso individual de los granos se utilizan para comprender los mecanismos detrás de las diferencias de rendimiento frente a diferentes momentos, niveles de estrés y manejo de cultivos (Board y Tan, 1995; Ruffo et al., 2015).

Adaptar el manejo de los cultivos a la fluctuación de la disponibilidad de agua año a año es fundamental para mejorar la productividad de los cultivos. Se pueden identificar opciones de manejo contrastantes asociadas con diferentes patrones de consumo de agua. Una "estrategia de tolerancia a estrés" es común que busque conservar el agua durante las primeras etapas vegetativas y es particularmente útil en ambientes con sequía terminal. El agua conservada al principio del ciclo del cultivo se puede usar más tarde durante etapas reproductivas más relevantes. Una estrategia contrastante puede ser una "estrategia de rendimiento potencial" dirigida a maximizar la captura de radiación y el uso del agua durante todo el ciclo. Estas estrategias se pueden implementar a través de simples opciones de manejo agronómico, como el grupo de madurez, el espaciamiento entre hileras o cambios en la densidad de plantas (Egli, 1993; Holshouser y Whittaker, 2002; Wegerer et al., 2015). Ambas opciones son interesantes de evaluar en la región Central Argentina, dónde se presentan períodos aleatorios de sequía, sin un claro patrón estacional.

En su expresión más simple el rendimiento puede describirse como el producto entre la biomasa total acumulada y el índice de cosecha (Gifford y Evans, 1981). De esta forma, la producción de biomasa, y por ende, el rendimiento de la soja puede entenderse a través de marcos teóricos asociados a la captura y eficiencia de utilización de recursos. En condiciones limitadas por agua, la productividad del cultivo puede estar limitada por el agua y la disponibilidad de N (Hooper y Johnson, 1999), lo que reduce la biomasa aérea debido a reducciones en la fotosíntesis y la menor fijación simbiótica de N₂ (Sinclair et al., 2007). En ambientes regados, se puede obtener una mayor captura total de N mediante combinaciones de fijación de N₂ y absorción directa del suelo (Santachiara et al., 2017b). Además, los cultivares de soja con rendimiento superior implican no solo una mayor captura total de N, sino también combinaciones de una mayor eficiencia de uso de N e índice de cosecha (Rotundo et al., 2014). El marco teórico asociado a la captura de N puede ayudar a explicar las diferencias de

rendimiento asociadas a opciones de manejo bajo condiciones hídricas contrastantes (Ciampitti y Salvagiotti, 2018; Evans, 2013; Rotundo et al., 2014; Salvagiotti et al., 2008), dado el efecto de la disponibilidad hídrica sobre la fijación biológica de N y la fotosíntesis del cultivo

La decisión entre estrategias de manejo de tolerancia a estrés y de rendimiento potencial se basa en escenarios meteorológicos bien documentados y pronósticos climáticos extendidos (Bert et al., 2007, 2006; Chapman y De la Vega, 2002). Sin embargo, una estrategia de rendimiento potencial puede tener un impacto negativo desproporcionado en el rendimiento en un escenario con déficit hídrico. Una estrategia de tolerancia a estrés puede determinar un rendimiento potencial más bajo en un escenario con amplia disponibilidad hídrica (Blum, 2009). Actualmente, la información es limitada con respecto a posibles penalidades/beneficios en rendimiento entre estrategias de tolerancia a estrés y estrategias de rendimiento potencial en ambientes con disponibilidad de agua contrastante. Los objetivos del capítulo IV de la presente tesis fueron: (i) evaluar el rendimiento de diferentes opciones de manejo en ambientes con disponibilidad hídrica contrastante, (ii) probar posibles penalidades/beneficios en rendimiento entre opciones de manejo contrastantes y (iii) identificar las variables fisiológicas relacionadas con los componentes de rendimiento y la captura total de N para explicar la respuesta de los cultivos. Para abordar estos objetivos, se evaluaron cuatro tratamientos de manejo en ambientes con disponibilidad hídrica contrastante.

4.3. Materiales y métodos

4.3.1. Detalles experimentales

Los experimentos a campo se realizaron durante dos campañas agrícolas (2013/2014 y 2014/2015, referidas como años 1 y 2, respectivamente) en Campo Experimental Villarino ubicado en Zavalla, Argentina (33° 01 'S, 60° 53' O). Los cultivos antecesores fueron pastura natural y soja para los años 1 y 2, respectivamente. El tipo de suelo fue franco arcilloso limoso Argiudol vertico, serie Roldán. Aunque los experimentos se realizaron en un solo sitio, esta localidad es altamente representativa de la región, ya que los suelos Argiudoles son un tipo de suelo muy frecuente en la principal área de producción de soja en el centro de Argentina (Di Mauro et al., 2018/Capítulo II; Capítulo III). Las fechas de siembra fueron el 5 de diciembre y el 27 de noviembre para los años 1 y 2, respectivamente. Las fechas de siembra de los experimentos del Capítulo IV pueden ser consideradas como tardías para la región bajo estudio (Di Mauro et al., 2018/ Capítulo II, Capítulo III). El retraso en la siembra de los experimentos en ambos años se debió fundamentalmente a cuestiones operativas del ensayo (*i.e.* construcción del *Rain-out shelter* año 1, y disponibilidad de mano de obra para la siembra manual del experimento, año 2) y no por una decisión particular de evaluar ese tipo de ambientes. Ambos experimentos se sembraron en exceso y se ralearon manualmente hasta alcanzar las densidades de plantas deseadas en V_1 (Fehr y Caviness, 1977).

Las semillas se inocularon con bacterias simbióticas fijadoras de N_2 [*Bradyrhizobium japonicum*] y se trataron con insecticidas y fungicidas. Durante el ciclo de cultivo, las malezas, los insectos y las enfermedades se controlaron adecuadamente según fue necesario siguiendo prácticas agronómicas locales.

4.3.2. Tratamientos de manejo y disponibilidad hídrica

Se diseñaron cuatro tratamientos de manejo a través de combinaciones específicas de cultivar, espaciamiento entre hileras y densidad de plantas (Tabla 4.1). Los tratamientos de manejo se clasificaron en: (i) tolerancia a estrés o (ii) estrategias de rendimiento potencial de acuerdo con patrones de consumo de agua esperables. Una estrategia de tolerancia al estrés busca

conservar el agua durante las primeras etapas vegetativas. El agua conservada al comienzo del ciclo del cultivo puede usarse más tarde durante etapas reproductivas más relevantes. Contrariamente, una estrategia de rendimiento potencial está dirigida a maximizar la captura de radiación y el uso del agua a lo largo del ciclo del cultivo. Las estrategias de tolerancia a estrés involucraron cultivares del grupo de madurez IV intermedio y largo, con un espaciamiento entre hileras de 0,50 m y densidades de plantas estándar (por ejemplo, 25 o 40 pl m⁻²; Masino et al., 2018). Las estrategias de rendimiento potencial tuvieron cultivares de grupos de madurez IV intermedio y III largo, espaciamiento entre hileras de 0,25 m y 60 pl m⁻². En base al Capítulo II, dónde se analizó una gran base de datos de lotes de producción de soja en la región central Argentina, los grupos de madurez, el espaciamiento entre hileras y la densidad de plantas evaluados en este estudio son representativas de las prácticas de manejo más frecuentes para la región (Di Mauro et al., 2018/Capítulo II).

Tabla 4.1. Descripción de los diferentes tratamientos de manejo evaluados en dos ambientes con disponibilidad hídrica contrastante durante dos campañas agrícolas.

Tratamiento de manejo	Grupo de madurez	Cultivar	Densidad de plantas (pl m ⁻²)	Espaciamiento entre surcos (m)
Tolerancia a estrés I	IV	SPS 4x99	25	0,50
Tolerancia a estrés II	IV	SPS 4x4	40	0,50
Rendimiento potencial I	III	SPS 3x9	60	0,25
Rendimiento potencial II	IV	SPS 4x4	60	0,25

Los cuatro tratamientos de manejo se evaluaron en ambientes con estrés hídrico y con buena disponibilidad hídrica. El ambiente con estrés hídrico se realizó mediante *Rain-out shelter* automático. El *shelter* es una estructura con techo de fibra de vidrio y paredes laterales montadas sobre rieles que se cierran automáticamente durante los eventos de lluvia. La altura del techo es de 3 m y las paredes laterales terminan a 0,50 m sobre el suelo. La entrada de agua superficial y subsuperficial se evita mediante una cubierta de plástico enterrada desde 0,20 m sobre el nivel del suelo hasta 2 m de profundidad. Las parcelas eran de cinco surcos y 3 m de largo. El área efectiva para la experimentación dentro del *shelter* fue de 300 m² (10 x 30 m).

El ambiente con buena disponibilidad hídrica fue regado y se localizó a 10 m del ambiente con estrés hídrico, teniendo una superficie de 10 x 30 m. Las parcelas también eran de cinco surcos y 3 m de largo. Ambos ambientes tenían un sistema de riego por goteo para manejar la disponibilidad hídrica del cultivo.

4.3.3. Condiciones climáticas y caracterización ambiental

El agua disponible en el suelo al momento de la siembra (mm) se determinó gravimétricamente usando un barreno de suelo hasta 2 m para cada ambiente (Bacigaluppo et al., 2011; Coyos et al., 2018; Santachiara et al., 2017a). Diez muestras de suelo fueron tomadas cada 0,20 m hasta 2 m de profundidad. En el muestreo de humedad de suelo no se detectó presencia de napa freática hasta los 2 m de profundidad, por lo cual se consideró que el experimento no tuvo influencia de napa (Gambin et al., 2016, Vitantonio-Mazzini et al., 2021). El contenido de agua en el suelo se estimó utilizando la humedad del suelo a la siembra (%) y la densidad aparente (g cm^{-3}) y la profundidad del horizonte del suelo. El agua disponible en el suelo a la siembra se calculó utilizando el contenido de agua en el suelo de cada horizonte como la diferencia entre el contenido de agua observado y el límite inferior para ese horizonte particular.

Se registraron los riegos aplicados y las precipitaciones diarias. La disponibilidad de agua (mm) se estimó como la suma del contenido de agua disponible en el suelo al momento de la siembra, las precipitaciones durante el ciclo del cultivo (desde la siembra hasta la madurez fisiológica) y el riego (desde la siembra hasta la madurez fisiológica). La temperatura media diaria del aire ($^{\circ}\text{C}$) se registró en una estación meteorológica ubicada a 400 m de las parcelas experimentales.

4.3.4. Mediciones de plantas

Las etapas fenológicas del cultivo: R₁ (inicio de floración), R₅, R₇ y R₈ (madurez de la cosecha) se registraron cada dos días en cada parcela, siguiendo la escala de Fehr y Caviness (1977).

En R₈, dos metros de los tres surcos centrales de cada parcela se cortaron manualmente, se embolsaron y se secaron a 65 °C en una estufa de aire forzado para obtener la biomasa total aérea (kg ha⁻¹). Después del pesaje, las muestras se trillaron y las semillas se pesaron para calcular el rendimiento (kg ha⁻¹). Se guardó material no grano de cada muestra después de la trilla. El rendimiento se ajustó a un contenido de humedad del 0%. El peso individual de los granos (mg grano⁻¹) se calculó a partir de una submuestra de 200 granos. El número de grano por unidad de superficie (granos m⁻²) se estimó como el rendimiento dividido por el peso individual de los grano. El índice de cosecha se estimó como la relación entre el rendimiento y la biomasa aérea a madurez de cosecha.

Las muestras de biomasa de granos y no grano se molieron por separado y se analizaron para determinar la concentración total de N usando el procedimiento Kjeldahl (McKenzie y Wallace, 1954). La captura total aparente de N se calculó como el promedio ponderado del contenido de N en la biomasa (grano y no grano). La eficiencia del uso de nitrógeno se estimó como la relación entre la biomasa aérea total y la captura total aparente de N siguiendo a Rotundo et al. (2014).

4.3.5. Diseño experimental y análisis estadístico

Los experimentos en ambos años se organizaron en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones dentro de cada ambiente (con estrés hídrico y buena disponibilidad hídrica). El modelo para el análisis de la varianza incluyó al año, al ambiente hídrico, los bloques anidados dentro del año y el ambiente hídrico, y el tratamiento de manejo como factores principales. El análisis se llevó a cabo utilizando el software SAS (SAS Institute, 1999). Se verificaron la normalidad de los residuales y la homogeneidad de las varianzas, y no se observaron desviaciones. Las medias individuales se compararon mediante la diferencia mínima significativa con un nivel de probabilidad de 0,05 (Steel y Torrie, 1986). Se utilizó el análisis de regresión lineal para estimar la relación entre el rendimiento y las variables fisiológicas.

4.4. Resultados

4.4.1. Fenología, condiciones climáticas y caracterización ambiental

La temperatura del aire durante el ciclo de cultivo difirió entre años (Fig. 4.1). La temperatura media diaria del aire fue 4 y 2 °C más alta en el año 1 que en el año 2 desde la siembra a R₁ y desde R₁ a R₅, respectivamente. Por el contrario, durante el período R₅ a R₇, la temperatura del aire para el año 1 fue 2 °C más baja con respecto al año 2. Esto coincide con el ligero retraso en la fecha de siembra del año 1.

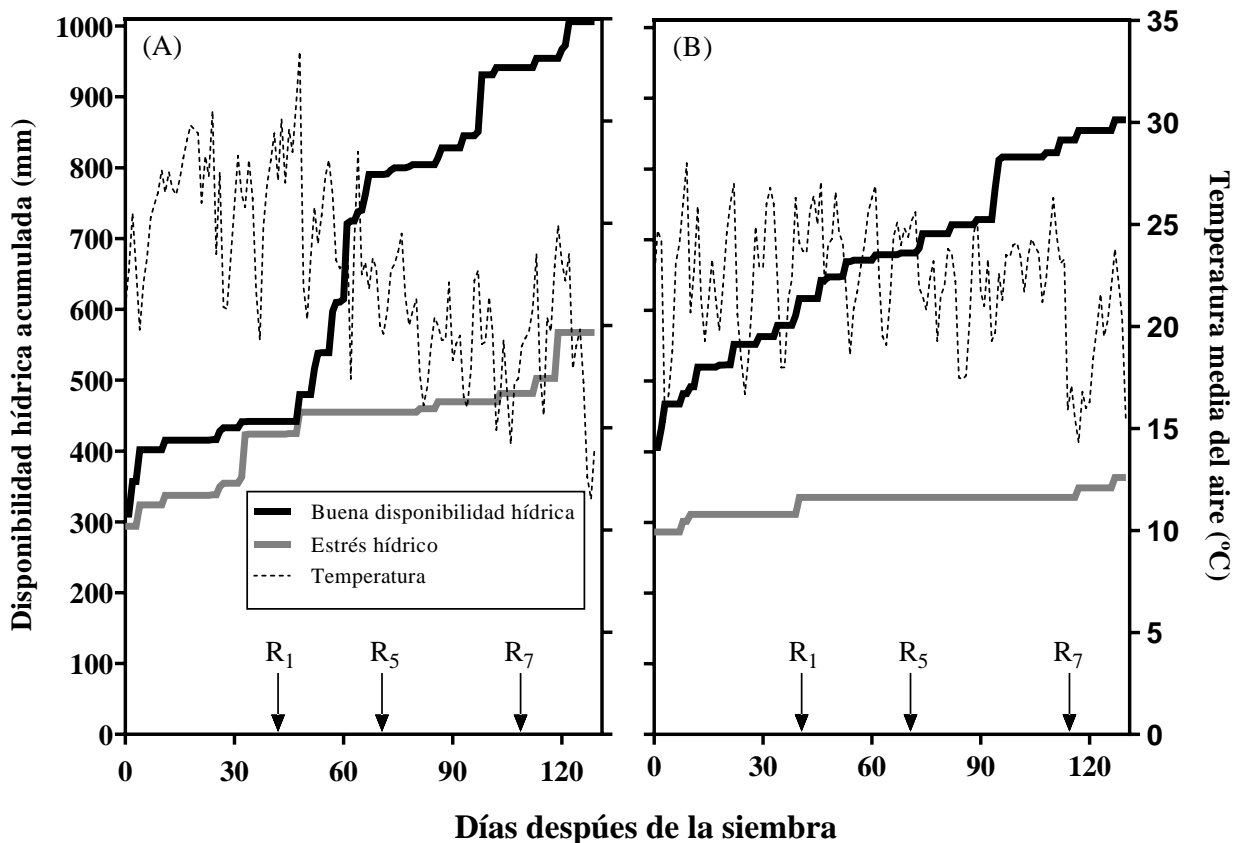


Fig. 4.1. Condiciones meteorológicas durante los experimentos del año 1 (A) y año 2 (B). Las líneas grises sólidas representan la disponibilidad de agua acumulada del ambiente con estrés hídrico y las líneas negras sólidas representan la disponibilidad de agua acumulada del ambiente con buena disponibilidad hídrica. La temperatura media diaria del aire se muestra como línea negra punteada de poco grosor. R₁: inicio de floración, R₅: inicio del llenado de granos, R₇: madurez fisiológica.

Se exploraron cuatro escenarios (año x combinaciones de ambiente hídrico) con disponibilidad hídrica acumulada en diferentes etapas de cultivo (Fig. 4.1). En el año 1, la diferencia en el agua del suelo en la siembra entre los ambientes fue pequeña (*ca.* 17 mm). Por el contrario, en el año 2, la disponibilidad de agua en el suelo al momento de la siembra de los ambientes con estrés hídrico y con buena disponibilidad hídrica fue de 286 y 406 mm, respectivamente. En el año 1 se acumularon un total de 130 mm en ambos ambientes desde la siembra hasta R₁. Durante el mismo período en el año 2, se acumularon 49 y 210 mm para los ambientes con estrés hídrico y con buena disponibilidad hídrica, respectivamente. Después de R₃ se magnificaron las diferencias en la disponibilidad de agua acumulada entre ambientes. En el año 1 de R₃ a R₇, 113 y 527 mm se acumularon para los ambientes con estrés hídrico y con buena disponibilidad hídrica, respectivamente. En el año 2 de R₃ a R₇ se acumularon 14 y 208 mm en los ambientes con estrés hídrico y con buena disponibilidad hídrica, respectivamente. En resumen, a lo largo de los años y ambientes, se exploraron escenarios climáticos contrastantes, con una disponibilidad total de agua que osciló entre 349 y 954 mm (*ca.* 173% de variación; Fig. 4.1).

4.4.2. Rendimiento y componentes numéricos

El efecto año ($p < 0,05$), ambiente hídrico ($p < 0,001$) y al tratamiento de manejo ($p < 0,05$) fueron significativos para rendimiento. El efecto de la interacción año x ambiente y manejo x año también fueron significativos para rendimiento ($p < 0,05$; Tabla 4.2). En promedio, a través de los tratamientos de manejo, los rendimientos de los ambientes con buena disponibilidad hídrica fueron de 3.902 y 4.592 kg ha⁻¹ en los años 1 y 2, respectivamente (Tabla 4.2). El ambiente con estrés hídrico produjo 72 y 59% de rendimiento respecto al ambiente con buena disponibilidad en los años 1 y 2, respectivamente (Tabla 4.2).

Las diferencias de rendimiento entre los tratamientos de manejo variaron entre los años (interacción año x manejo significativa, $p < 0,05$; Tabla 4.2). En el año 1 no se observaron diferencias significativas en el rendimiento para ningún tratamiento de manejo. Por el contrario, el año 2 mostró diferencias significativas en relación con las opciones de manejo del cultivo, los rendimientos oscilaron entre *ca.* 3.000 (tolerancia a estrés II) y *ca.* 4.200 kg ha⁻¹ (rendimiento

potencial II). En promedio, en ambos años, los rendimientos de las opciones de manejo evaluadas variaron de ca. 3.200 a ca. 4.000 kg ha⁻¹ (25% de variación; Tabla 4.2).

La interacción entre el manejo del cultivo y el ambiente hídrico no fue significativa ($p=0,42$), mostrando que ninguna opción de manejo particular fue mejor en los escenarios de estrés hídrico (Tabla 4.2). A pesar de esto, se observó una mayor variación en el rendimiento asociada con el manejo en el ambiente con buena disponibilidad hídrica en comparación con el ambiente con estrés. Esto implicó una variación del 33 vs. 19% de variación en el rendimiento entre el tratamiento de manejo que más y menos rindió, en ambientes regados y con estrés; respectivamente.

Las diferencias de rendimiento entre años se explicaron por los cambios en el peso individual de los granos ($p < 0,01$; Tabla 4.2), y las diferencias de rendimiento entre los ambientes se asociaron con cambios en el número de granos por unidad de superficie ($p < 0,001$; Tabla 4.2) y el peso individual de los granos ($p < 0,01$; Tabla 4.2). A través de las opciones de manejo, las diferencias extremas de rendimiento entre los tratamientos de tolerancia a estrés II y rendimiento potencial II se explicaron completamente por las diferencias en el número de granos por unidad de superficie ($p < 0,05$; Tabla 4.2). En general, las variaciones en el rendimiento se explicaron más por las diferencias en el número de granos cosechados por unidad de superficie ($R^2=0,75$; $p < 0,001$) en comparación con el peso individual de los granos ($R^2=0,19$; $p < 0,01$).

Tabla 4.2. Rendimiento, número de granos y peso de granos de diferentes tratamientos de manejo evaluados bajo disponibilidad hídrica contrastante durante dos campañas. Los valores se expresan a un contenido de humedad del 0% y corresponden a madurez de cosecha. Diferentes letras representan diferencias significativas ($p < 0,05$).

Año	Ambiente hídrico	Manejo	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	Número de granos (granos m ⁻²)	Peso individual de grano (mg grano ⁻¹)
Año 1			3.359 a	2.409	139,6 b
Año 2			3.738 a	2.512	147,8 a
	Con estrés		2.770 b	1.987 b	139,9 b
	Buena disponibilidad		4.246 a	2.891 a	146,8 a
		Tolerancia a estrés I	3.496 ab	2.396 ab	145,3 a
		Tolerancia a estrés II	3.165 b	2.154 b	145,9 a
		Rendimiento potencial I	3.504 ab	2.552 a	137,0 b
		Rendimiento potencial II	3.963 a	2.714 a	145,5 a
Año 1 [†]	Con estrés		2.817 b	2.025	140,0 a
	Buena disponibilidad		3.902 a	2.793	139,2 a
Año 2 [†]	Con estrés		2.714 b	1.940	140,7 b
	Buena disponibilidad		4.592 a	2.989	153,6 a
Año 1 [†]		Tolerancia a estrés I	3.462 a	2.361	143,4 a
		Tolerancia a estrés II	3.298 a	2.302	143,3 a
		Rendimiento potencial I	2.993 a	2.343	128,8 b
		Rendimiento potencial II	3.685 a	2.631	140,0 a
Año 2 [†]		Tolerancia a estrés I	3.530 bc	2.431	144,2 a
		Tolerancia a estrés II	3.005 c	1.976	149,1 a
		Rendimiento potencial I	4.118 ab	2.803	146,9 a
		Rendimiento potencial II	4.241 a	2.797	150,9 a
Año (A)			*	ns	**
Ambiente Hídrico (AH)			***	***	**
Manejo (M)			*	**	*
A x AH			*	ns	*
A x M			*	ns	*
AH x M			ns	ns	ns
A x AH x M			ns	*	ns

* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; ns: no significativo. † Letras diferentes significan diferencias significativas ($p < 0,05$) dentro de cada año.

4.4.3. Captura total aparente de N, eficiencia de uso de N e índice de cosecha.

Las variaciones de rendimiento a lo largo de los años se asociaron con la captura total aparente de N, y fue de 275 y 244 kg N ha⁻¹ para los años 1 y 2, respectivamente ($p < 0,05$; Tabla 4.3). Las variaciones de rendimiento entre los ambientes con estrés hídrico y con buena disponibilidad hídrica también se asociaron con la captura total aparente de N ($p < 0,001$; Tabla 4.3). Los efectos del manejo del cultivo sobre el rendimiento, especialmente cuando se comparan los tratamientos de tolerancia a estrés II y rendimiento potencial II, también se explicaron por las diferencias en la captura total aparente de N. El tratamiento rendimiento potencial II fue capaz de capturar aproximadamente 65 kg N ha⁻¹ más que el tratamiento de tolerancia a estrés II ($p < 0,05$; Tabla 4.3). Todas las variaciones de rendimiento estuvieron fuertemente correlacionadas con los niveles de captura total aparente de N ($R^2 = 0,93$, $p < 0,001$), independientemente del tratamiento específico. A su vez, la captura total aparente de N estuvo fuertemente correlacionada con la biomasa total aérea en madurez comercial ($p < 0,001$, $R^2 = 0,94$. Anexo Fig. 6.3).

En general, tanto la eficiencia de uso de N como el índice de cosecha no se vieron afectados por los tratamientos. La eficiencia en el uso del N fue de 26,7 kg kg⁻¹ en promedio en todos los tratamientos, y no se vio afectada significativamente por ningún factor experimental ($p > 0,05$; Tabla 4.3). El índice de cosecha solo se vio afectado por los niveles de disponibilidad hídrica. Fue de 0,55 kg kg⁻¹ en el ambiente con estrés hídrico, y se redujo a 0,50 kg kg⁻¹ en el ambiente con buena disponibilidad hídrica ($p < 0,01$; Tabla 4.3). Las variaciones de rendimiento a lo largo de años, ambientes y las opciones de manejo no se relacionaron con diferencias en la eficiencia del uso de N o el índice de cosecha.

Tabla 4.3. Captura total aparente de N, eficiencia en el uso de N e índice de cosecha de diferentes tratamientos de manejo evaluados bajo disponibilidad hídrica contrastante durante dos campañas. Los valores se expresan a un contenido de humedad del 0% y corresponden a madurez de cosecha. Diferentes letras representan diferencias significativas ($p < 0,05$).

Año	Ambiente hídrico	Manejo	Captura total aparente de N (kg ha ⁻¹)	Eficiencia en el uso de N (kg kg ⁻¹)	Índice de cosecha (kg kg ⁻¹)
Año 1			244 b	26,2	0,53
Año 2			275 a	27,2	0,51
	Con estrés		190 b	26,6	0,55 a
	Buena disponibilidad		320 a	26,9	0,50 b
		Tolerancia a estrés I	247 bc	27,2	0,54
		Tolerancia a estrés II	225 c	27,7	0,51
		Rendimiento potencial I	276 ab	25,7	0,50
		Rendimiento potencial II	290 ab	26,2	0,53
Año 1 [†]	Con estrés		194 b	26,2	0,52
	Buena disponibilidad		289 a	26,3	0,54
Año 2 [†]	Con estrés		185 b	26,9	0,55
	Buena disponibilidad		351 a	27,5	0,48
Año 1 [†]		Tolerancia a estrés I	215 a	27,2	0,53
		Tolerancia a estrés II	229 a	27,1	0,54
		Rendimiento potencial I	228 a	25,8	0,49
		Rendimiento potencial II	268 a	24,8	0,56
Año 2 [†]		Tolerancia a estrés I	252 b	27,2	0,54
		Tolerancia a estrés II	219 b	28,5	0,49
		Rendimiento potencial I	316 a	25,7	0,52
		Rendimiento potencial II	311 a	27,6	0,50
Año (A)			*	ns	ns
Ambiente Hídrico (AH)			***	ns	**
Manejo (M)			**	ns	ns
A x AH			**	ns	ns
A x M			*	ns	ns
AH x M			ns	ns	ns
A x AH x M			ns	ns	ns

* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; ns: no significativo. † Letras diferentes significan diferencias significativas ($p < 0,05$) dentro de cada año.

4.5. Discusión

El objetivo principal del presente capítulo fue evaluar el rendimiento y las posibles compensaciones de diferentes opciones de manejo en ambientes con disponibilidad hídrica contrastante. A lo largo de los ambientes y años, la diferencia entre los tratamientos de manejo que más y menos rindieron fue de *ca.* 800 kg ha⁻¹. Esta diferencia fue de *ca.* 400 kg ha⁻¹ en el año 1, y aumentó a *ca.* 1.200 kg ha⁻¹ en el año 2. La opción de manejo de mayor rendimiento consistió en un grupo de madurez intermedio (IV intermedio), con un espaciamiento entre hileras estrecho (0,25 m), y alta densidad de plantas (60 pl m⁻²). El principal resultado de este capítulo es que no hubo una interacción con cambio de rango entre los tratamientos de manejo cuando se compararon las condiciones con buena disponibilidad hídrica o con estrés hídrico. Por lo tanto, la hipótesis de la existencia de estrategias de manejo específicamente diseñadas para enfrentar la escasez de agua no está respaldada con las opciones de manejo probados en el presente capítulo.

Es esperable que la interacción con cambio de rango entre manejo y disponibilidad hídrica se expresen solo en condiciones de estrés hídrico muy intenso que podrían no lograrse en la mayoría de las condiciones de cultivo (Blum, 2005). Algunos autores proponen que dicha interacción se produce a niveles de rendimiento cercanos al 30% del rendimiento potencial del cultivo (Blum y Pnuel, 1990; Ceccarelli y Grando, 1991). En este capítulo, los ambientes con estrés hídrico produjeron 72 y 59% de ambiente con buena disponibilidad hídrica en los años 1 y 2, respectivamente. Estos valores están lejos del 30% propuesto. Los ambientes de estrés por sequía que producen <30% del rendimiento de situaciones bien provistas de agua, representarían ambientes que no son tan frecuentes para la producción de soja en la región central Argentina (Aramburu Merlos et al., 2015).

Los datos de la Agencia de Datos y Estimaciones Agrícolas de Argentina (www.siaa.gov.ar) pueden ayudar a describir las reducciones de rendimiento esperadas debido a escasez de agua. Un supuesto subyacente es que la variación del rendimiento de un año a otro para un cultivo de secano como la soja en el centro de Argentina se explica por la disponibilidad de agua (Boyer, 1982; Sinclair et al., 1992). Para ello, usando las localidades de referencia del Capítulo II, se calculó el rendimiento máximo de cada provincia mediante una regresión por quintiles para los datos de rendimiento históricos (1971-2016). Si se considera esta magnitud como un estimador del rendimiento para situaciones con mejor nivel hídrico para esa región

(rendimiento potencial alcanzable, Egli y Hatfield, 2014b; Lobell et al., 2009). El rendimiento para cada combinación departamento-año se considera en esta sección y aproximación como el rendimiento limitado por agua. De esta forma para cada observación (combinación departamento-año), fue posible estimar la diferencia entre el rendimiento potencial alcanzable (*i.e.* mejores situaciones hídricas) y el rendimiento actual (*i.e.* rendimiento con limitante hídrica), como una medida de la limitante hídrica que puede experimentar la zona bajo análisis. La distribución de frecuencia del porcentaje de rendimiento limitado de agua se muestra en la Fig. 4.2. El rendimiento limitado por agua para esta región húmeda es siempre más alto que el 30% declarado como el umbral para explorar interacciones con cambio de rango. De hecho, los niveles de estrés observados con frecuencia en la región están cerca de los valores que fueron obtenidos en los ambientes hídricos experimentales de este capítulo. En conclusión, los niveles de estrés hídrico que afecten el 30% del rendimiento potencial son muy raros en la Región Central de Argentina. A su vez, la aproximación planteada es una simplificación que pretende a modo general tratar de contextualizar los niveles de limitante hídrica principalmente asociado a lluvias en la región. Es conocido que datos a nivel de departamental presentan niveles de variabilidad menores a los de escala de lote o ensayo como los explorados en esta tesis. A su vez, es reconocido que la variación en rendimiento para una región puede estar asociada a variaciones en otros factores que afectan la productividad del cultivo (Capítulo II).

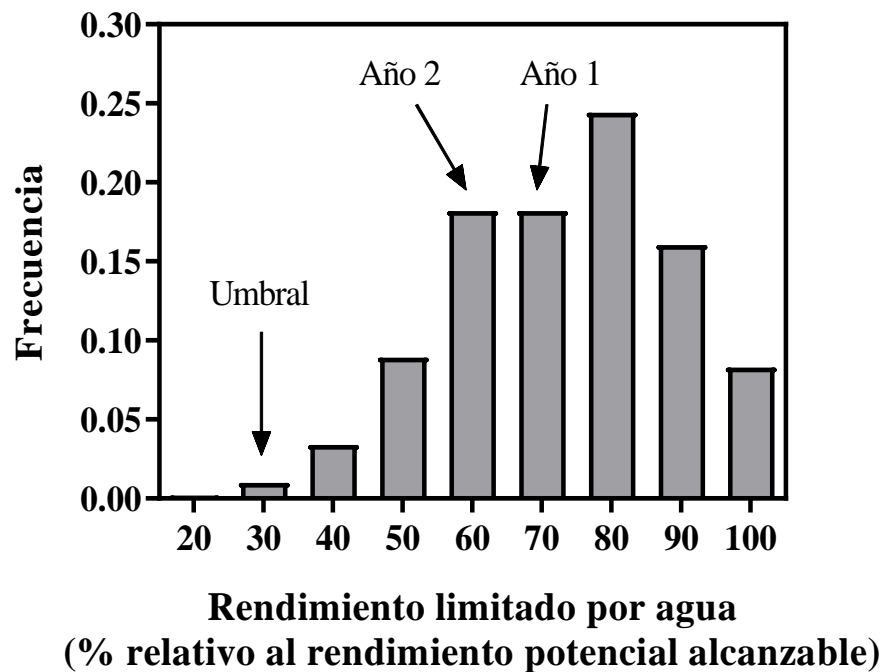


Fig. 4.2. Distribución de frecuencia del rendimiento potencial limitado por agua (% del rendimiento potencial alcanzable) para el período 1971-2016 del área de producción de soja más importante en la Argentina Central. El valor de umbral corresponde al punto esperado de interacción con cambio de rango manejo x disponibilidad hídrica (Blum, 2005). Los años 1 y 2 corresponden a los niveles de estrés hídrico impuestos por los tratamientos de agua durante cada experimento.

Son pocos los estudios previos que evaluaron en forma directa opciones de manejo agronómico de soja en ambientes hídricos contrastantes. Ball et al. (2000) evaluaron diferentes densidades de plantas y espaciamiento entre hileras en condiciones regadas y no regadas durante dos años en Arkansas. No encontraron efectos sobre el rendimiento de la interacción manejo x ambiente. En dichos ensayos, los cultivos no regados produjeron 57 y 79% de los tratamientos irrigados. Elmore (1998) evaluó los efectos del espaciamiento entre hileras, densidad de plantas y cultivares en ambientes con diferente disponibilidad hídrica en Nebraska. Los resultados mostraron que la densidad de plantas y el espaciamiento entre hileras ayudaron a maximizar el rendimiento, pero no interactuaron con la disponibilidad hídrica (interacción con cambio de rango). En este caso, los ambientes de secano rindieron un 63% con respecto a los regados. Wegerer et al. (2015) evaluaron diferentes grupos de madurez de soja en condiciones de riego completo y restringido en Arkansas. Tampoco mostraron interacción con cambio de rango entre

manejo y la disponibilidad de agua, y la reducción de los ambientes restringidos en agua produjo un 65% que el rendimiento del riego completo. Finalmente, Reicosky et al. (1985) no encontraron interacción disponibilidad de agua x espaciamiento entre hileras, en donde los cultivos no irrigados rindieron el 66% de los irrigados. Como tal, la mayoría de estos estudios tampoco tuvieron una interacción con cambio de rango entre manejo y disponibilidad hídrica al evaluar niveles de estrés hídrico similares a los explorados en este capítulo.

El segundo objetivo del presente capítulo fue comprender los mecanismos asociados con las respuestas observadas en rendimiento a distintos tratamientos de manejo. En base a Rotundo et al. (2014) el rendimiento de la soja se puede separar en tres procesos principales: captura total de N a madurez fisiológica, la eficiencia del uso de N para la producción de biomasa y la proporción de biomasa total que se particiona a granos (también llamada índice de cosecha). Los resultados del presente capítulo mostraron que la eficiencia del uso de N y el índice de cosecha no se asociaron con cambios en el rendimiento en los tratamientos de manejo agronómico. De hecho, los valores observados aquí fueron similares a los observados en otros trabajos (Rotundo et al., 2014). La captura total aparente de N fue el principal proceso fisiológico evaluado que explicó la variación del rendimiento entre los tratamientos. Se acepta ampliamente que la captura total de N es un proceso clave relacionado con el rendimiento, y la fuente principal de N para la soja es el N₂ fijado biológicamente (Salvagiotti et al., 2008). Los resultados del capítulo IV de la presente tesis mostraron que la absorción total aparente de N en el tratamiento regado fue cerca de 330 kg ha⁻¹. En condiciones de buena disponibilidad hídrica, Santachiara et al. (2017b) mostraron que el 67% del N total provino de la fijación biológica de N₂ en esos ambientes. La captura promedio total de N en los ambientes con estrés hídricos evaluados aquí fue de 190 kg ha⁻¹, pero no se conoce el cambio relativo en N proveniente de la absorción directa del suelo o de la fijación biológica. Según estudios previos, esto puede asociarse a tasas reducidas de fijación biológica de N bajo este tipo de ambientes (Sinclair et al., 2007).

Finalmente, la jerarquía en la toma de decisiones agronómicas surge como algo esencial para aumentar la producción de soja. Los resultados del presente capítulo sugieren que la densidad de plantas, el espaciamiento entre hileras y la selección de genotipos son decisiones jerárquicas de segundo orden en el diseño de manejos estratégicos frente a un posible contexto climático. Esto también se vio reflejado en el Capítulo II de esta tesis, donde la fecha de siembra

fue el factor de manejo más determinante de la magnitud de las B_r en soja de primera, por sobre grupo de madurez, densidad de plantas o espaciamiento entre surcos. A su vez, Bert et al. (2007) proponen que el pronóstico climático, junto con la fecha de siembra, son variables jerárquicas de primer orden para buscar rendimientos potenciales o para manejar escenarios con estrés hídrico. Estas herramientas permitirían adecuar patrones de desarrollo fenológico mediante los cuales los períodos críticos de los cultivos críticos para la generación de rendimiento ocurran en situaciones con mejor balance hídrico. Por ejemplo, un sistema de manejo exitoso para la soja de secano que demuestra este concepto es el Sistema de Producción Temprana de Soja (ESPS, por sus siglas en inglés) que se usa actualmente en la zona sur de Estados Unidos (Heatherly y Spurlock, 1999). Bowers (1995) demostró que fechas de siembra tempranas y grupos de madurez cortos, usados en ESPS, en comparación con el sistema convencional de siembra tardía y grupos más largos dieron como resultado rendimientos más altos y estables a lo largo de los años. Los ESPS alcanzan los requerimientos máximos de agua cuando todavía se producen lluvias a principios del verano, evitando el efecto negativo de la sequía a finales del verano. En comparación con las estrategias que incluyen combinaciones de fecha de siembra y grupo de madurez, el objetivo de este capítulo fue identificar estrategias de manejo para mitigar los efectos del estrés hídrico una vez que ya se haya definido la fecha de siembra. De esta manera, el presente capítulo buscó generar información acerca de cómo diferentes estructuras de cultivo pueden alterar la productividad frente a cambios en el escenario hídrico esperado (buena vs. mala disponibilidad hídrica), pero una vez establecida la fecha de siembra, principal variable de manejo agronómico determinantes de las B_r en el cultivo de soja de primera (Di Mauro et al., 2018/ Capítulo II).

Para estas condiciones, la estrategia de escape a la sequía se define por la siembra temprana o tardía, asegurando la captura máxima de radiación y proporcionando altos niveles de rendimiento en los años evaluados. Este objetivo se logra con un espaciamiento entre hileras de 0,25 m, una densidad de plantas de 60 pl m^{-2} y un genotipo con alto potencial de rendimiento. Una vez que se determina la fecha de siembra, no hay una penalización de rendimiento para elegir una estrategia de rendimiento potencial para esta región. En este sentido, el manejo agronómico tiene impacto bajo diferentes escenarios climáticos y, por lo tanto, es importante en años con expectativas de alto o bajo rendimiento (Aramburu Merlos et al., 2015).

4.6. Conclusiones

El objetivo principal del presente capítulo fue cuantificar posibles penalidades entre los manejos agronómicos para reducir la B_r y la tolerancia a estrés hídrico. La opción de manejo de mayor rendimiento consistió en un grupo de madurez intermedio (IV intermedio), con un espaciamiento entre hileras estrecho (0,25 m), y alta densidad de plantas (60 pl m^{-2}). El principal resultado es que no hubo una interacción con cambio de rango entre los tratamientos de manejo cuando se compararon las condiciones con buena disponibilidad hídrica o con estrés hídrico. Por lo tanto, la hipótesis de la existencia de estrategias de manejo específicamente diseñadas para enfrentar la escasez de agua no está respaldada con las opciones de manejo probadas en el presente capítulo. A su vez, no se observaron beneficios/penalidades en rendimiento al evaluar diferentes opciones de manejo en ambientes con disponibilidad hídrica contrastante. Por otro lado, las variaciones en el rendimiento se explicaron por las diferencias en el número de granos cosechados por unidad de área y la captura total aparente de N a madurez. Debido a que las estrategias de manejo específicamente adaptadas para hacer frente al estrés hídrico mostraron un valor limitado, las posibles opciones de manejo que busquen cerrar las B_r serían aconsejables para los productores agropecuarios.

**DISCUSIÓN GENERAL Y CONSIDERACIONES
FINALES**

V. DISCUSIÓN GENERAL Y CONSIDERACIONES FINALES

5.1. Resumen

Esta tesis doctoral se centró en cuantificar las B_r de soja en la zona Central de Argentina, explorar los factores que las determinan, y explorar potenciales reducciones a través de prácticas de manejo agronómico. Se presentaron algunos potenciales factores y causas de su magnitud, así como alternativas de manejo que puedan orientar el proceso de mejora de productividad de soja en condiciones de alta productividad y bajo ambientes con disponibilidad hídrica contrastante. Las aproximaciones utilizadas en esta tesis doctoral aportan otros aspectos relevantes para el cálculo de la magnitud de la B_r de soja para la región Central Argentina como: (i) la cuantificación de B_r mediante máximos rendimientos de agricultores usando registros lote a lote; (ii) su diferenciación según soja de primera y segunda, (iii) la estimación de B_r usando modelos de simulación para una población particular de agricultores bajo condiciones de alta productividad; y (iv) el estudio de las B_r usando varios métodos de estimación. En lo relacionado a los factores determinantes de las B_r , se estimó la importancia relativa de factores de manejo agronómico y ambiente, como determinantes de su variación regional. Finalmente, mediante enfoques experimentales, se probó la efectividad para potenciales incrementos en el R_a mediante opciones de manejo agronómico como el uso de insumos y la estructura del cultivo. Los resultados obtenidos no sólo constituyen avances sobre el comportamiento ecofisiológico del cultivo de soja, sino que la implementación de estos resultados resultará de gran utilidad para los productores y asesores al momento de diseñar opciones para el manejo de soja en sus sistemas de producción. Las futuras líneas de investigación propuestas para complementar los hallazgos de esta tesis podrían recaer sobre: (i) el uso de base de datos y técnicas estadísticas alternativas para desentrañar factores asociados a B_r y al uso de insumos, (ii) evaluación de prácticas agronómicas para el cierre de B_r no exploradas en esta tesis, y (iii) el uso de otras aproximaciones para la estimación de los rendimientos potenciales en la región.

Palabras claves: brecha de rendimiento, soja, manejo agronómico, ambiente, Argentina.

Puntos destacados:

- El estudio de B_r de soja en la región Central Argentina fue abordado desde diferentes aproximaciones.
- Las hipótesis originales planteadas fueron contrastadas con los resultados obtenidos.
- Una serie de potenciales nuevos proyectos de investigación fueron propuestos.

5.2. Introducción

Los incrementos necesarios en la producción global de alimentos deben lograrse mayormente en tierras ya cultivadas. En las últimas décadas, una parte importante de los esfuerzos para aumentar la producción global de alimentos se basaron en las mejoras genéticas para incrementar la productividad de cultivos individuales (de Felipe et al., 2016; Ortez et al., 2018), sin embargo, resulta necesario complementar estos avances con la correcta planificación de las prácticas de manejo agronómico en los sistemas de producción de granos (Matcham et al., 2020) y el entendimiento de aquellos factores ambientales que regulan la productividad de los cultivos (Andrade y Satorre, 2015). Esta tesis doctoral se centró en estimar las B_r de soja en la zona Central de Argentina, explorar los factores que las determinan, y explorar potenciales reducciones a través de prácticas de manejo agronómico.

5.3. Integración de resultados y aportes al conocimiento científico

En los capítulos componentes de esta tesis se estudiaron diferentes aspectos asociados a la B_r del cultivo de soja. Los resultados obtenidos constituyen avances importantes en la comprensión de la variabilidad de las B_r en la región, y su potencial reducción en los sistemas de producción actuales. Esto se logró combinando diferentes escalas de análisis y aproximaciones. Primero se evaluaron los factores determinantes de la variabilidad de las B_r abarcando la región Central Argentina mediante un enfoque observacional y utilizando técnicas de minería de datos. De esta manera, se determinó la magnitud de las B_r , los factores responsables de su variabilidad y se exploró su estructura espacial dentro de la región (Capítulo II). Luego se dilucidaron algunas estrategias de manejo que podrían reducir su magnitud mediante aproximaciones experimentales, complementando el enfoque anterior. Una de ellas involucró experimentos a campo y modelos de simulación de cultivos, dónde se evaluaron las posibilidades de cierre de B_r mediante el uso de insumos y sus posibles condicionantes técnicos y económicos en ambientes de altos rendimientos de la región (Capítulo III). Por otra parte, se analizó al manejo de la estructura del cultivo como determinante de la productividad en ambientes con suministro hídrico variable, así como se evaluaron los mecanismos fisiológicos detrás de estrategias de manejo exitosas en cada ambiente (Capítulo IV). Los resultados obtenidos no sólo constituyen avances sobre el

comportamiento ecofisiológico del cultivo de soja, sino que la implementación de estos resultados sería de utilidad para agricultores y asesores al momento de diseñar opciones para el manejo de soja en los sistemas de producción.

5.3.1. Magnitud regional de las brechas de rendimiento de soja

Argentina posee una amplia diversidad en sus sistemas de producción de soja a través de sus regiones agroclimáticas y variaciones en las opciones de manejo, lo que resulta en un amplio rango de niveles de R_a y B_r , tanto a escala espacial como temporal. El término B_r es ampliamente usado en la bibliografía, pudiendo adquirir diferentes significados y por ende, aplicaciones. Una definición simplificada, hace referencia a la diferencia entre dos niveles de rendimiento para una escala determinada de estudio (Sadras et al., 2015). Existen diversos métodos para estimar B_r , y su aplicabilidad depende tanto de la escala de interés como de la información disponible para su determinación (Grassini et al., 2015b; Hall et al., 2013; Lobell et al., 2009).

Un avance importante en el estudio de B_r mediante modelos de simulación en Argentina lo constituyeron las investigaciones de Aramburu Merlos et al. (2015), mejorando notablemente las estimaciones globales previas (Foley et al., 2011; Licker et al., 2010; Mueller et al., 2012; Neumann et al., 2010). Las aproximaciones utilizadas en esta tesis doctoral aportan otros aspectos relevantes para el cálculo de la magnitud de la B_r de soja para la región Central Argentina como: (i) la cuantificación de B_r mediante máximos rendimientos de agricultores usando registros lote a lote; (ii) su diferenciación según soja de primera o segunda, y (iii) la necesidad de contextualizar el tipo de productores agropecuarios en el análisis de B_r .

La aproximación del Capítulo II mediante observaciones de lotes de producción permitió la caracterización de la magnitud la B_r de la soja en la región Central de Argentina. La B_r de la soja fue cercana al 30% del $R_{pot.agua}$, pero varió de 0 a 68% y de 0 a 78% para soja de primera y de segunda, respectivamente. La base de datos analizada en el Capítulo II consistió en una gran cantidad de lotes de producción con un registro preciso de los niveles de R_a alcanzados como de las prácticas de manejo utilizadas. Por lo cual, la magnitud del R_a correspondió al rendimiento efectivamente cosechado y registrado en cada situación particular, y bajo un amplio rango de condiciones productivas. En este sentido, el uso de registros de producción de agricultores lote a

lote mejora las estimaciones de R_a y por ende de B_r de los sistemas de cultivo para una región determinada. A su vez, un aporte novedoso del Capítulo II a la cuantificación de las B_r es la discriminación entre sojas de primera y segunda. Dado que los registros públicos para el cálculo del R_a no discriminaron entre estos dos sistemas de cultivo, las estimaciones previas de B_r se realizaron para un único cultivo general de soja (Aramburu Merlos et al., 2015) y son escasos los reportes de su cuantificación diferencial para cultivos simples y dobles en Argentina.

5.3.2. Factores ambientales y de manejo agronómico condicionando la variación regional de las brechas de rendimiento

Se necesita un entendimiento profundo de qué variables ambientales o de manejo pueden limitar los rendimientos de los cultivos para identificar oportunidades de mejora en los R_a , reduciendo las B_r en los sistemas de producción (Lollato et al., 2019, 2017; Patrignani et al., 2014; Rattalino Edreira et al., 2017; Tiftonnell et al., 2008). El contenido de esta tesis amplía los conocimientos previos que identifican factores asociados a la variación en las B_r , tales como las condiciones ambientales y, lo que es más importante dada la factibilidad de decisión por parte del productor, las variables de manejo agronómico para la región Central Argentina.

Los factores de manejo agronómico relevantes en la determinación de las B_r sugeridos por el análisis del Capítulo II fueron fundamentalmente: fecha de siembra, cultivo antecesor, el uso de fungicidas y fertilizantes fosforados. Mientras que las variables ambientales más relevantes fueron: precipitaciones, temperaturas y tipo de suelo, en concordancia con otros reportes previos. En términos relativos, la importancia de los factores ambientales fue mayor en soja de primera que en soja de segunda. Más allá de la identificación particular de variables de manejo o ambiente para cada sistema de cultivo de soja, un hallazgo relevante del Capítulo II radica en que la importancia relativa del manejo agronómico/ambiente ayudó a entender el patrón de variación de las B_r dentro de la región bajo estudio. La autocorrelación espacial local fue notablemente diferente entre soja de primera y segunda. La presencia un patrón espacial detectable para soja de primera y no para soja de segunda podría estar relacionada con una mayor importancia relativa de las variables ambientales frente a las variables de manejo asociadas con la variación de B_r en soja de primera. El manejo agronómico generalmente no suele seguir un

patrón espacial claro, mientras que las variables ambientales siguen un patrón espacial más definido.

5.3.3. Opciones de manejo para el cierre de las brechas de rendimiento

El cierre de B_r requiere la optimización del manejo agronómico en cada ambiente productivo, ya que los niveles de rendimiento teóricos pueden ser modificados mediante distintas opciones de manejo (Van Ittersum and Rabbinge, 1997). Una clasificación amplia de estas opciones puede agruparse en: (i) la implementación de tecnologías de insumos como inoculantes, fertilizantes, fungicidas o insecticidas entre otros; y/o (ii) el uso de tecnologías de procesos como fecha de siembra, densidad, largo de ciclo o espaciamiento entre surcos, por ejemplo. Ambos tipos fueron abordados parcialmente en el Capítulo III y IV de esta tesis doctoral.

Los resultados del Capítulo III mostraron que los productores de soja de alta tecnología están trabajando cerca del $R_{pot.agua}$, con valores promedios de B_r incluso menores que los detectados en el Capítulo II para toda la región. Los experimentos del Capítulo II se concentraron en subzonas dentro de la región Central Argentina con valores cercanos al 10% de B_r identificadas en el Capítulo II. La estimación de B_r usando modelos de simulación del Capítulo III en condiciones de alto rendimiento fueron similares a las del Capítulo II estimada con una aproximación alternativa, para esta subzona particular.

A su vez, estos resultados remarcan que una vez que se optimizan las principales decisiones de manejo, un ajuste del manejo agronómico mediante el uso de múltiples insumos tendientes a mejorar la nutrición de los cultivos, y a potenciar el crecimiento del cultivo de soja ayudó marginalmente a los productores de alta tecnología a incrementar los R_a . Sin embargo, esto se tradujo en una reducción marginal de las B_r , cercana al 3%, lo cual es un valor relativamente bajo cuando se lo compara con el efecto de otras prácticas de manejo. En la presente tesis, además, se buscaron evidencias para poder realizar modelos exploratorios para guiar recomendación del uso de insumos, tanto técnica como económicamente. En este sentido, y dado la magnitud no explotables de las B_r en estos sistemas bajo análisis, la recomendación del uso de insumos a escala de producción comercial no sería económicamente factible. A pesar de esto, la magnitud de la respuesta en rendimiento al uso de insumos estuvo condicionada por la

magnitud de las B_r , sugiriendo que en situaciones productivas dónde existe más margen de mejora en los R_a , los insumos tendrían más efectividad. Adicionalmente, se encontraron algunos predictores de suelo relacionados a la respuesta al uso de insumos, como P y pH, mejorando la caracterización de patrones regionales al uso de insumos previamente informados en otros países. Estos hallazgos expanden el conocimiento actual en lo relacionado al uso de insumos y su respuesta errática, remarcando la importancia de cuantificar las B_r en los sistemas de producción para contextualizar posibles mejoras en los R_a , y su recomendación a escala comercial.

Por otra parte, en el Capítulo IV se exploraron una serie de estrategias de manejo que involucraron diferentes estructuras de cultivo tendientes a maximizar (estrategias de rendimiento potencial) o regular el consumo de agua (estrategias de tolerancia a estrés), tratando de cuantificar posibles penalidades en rendimiento frente a variaciones en el escenario hídrico. El principal hallazgo de esta tesis relacionado a las B_r y la tolerancia a estrés hídrico es que la opción de manejo de mayor rendimiento consistió en una estrategia de rendimiento potencial a través de distintas disponibilidades hídricas. La misma consistió en un cultivar IV intermedio de madurez, espaciamiento entre hileras de 0,25 m y 60 pl m⁻². Esto sugirió que no existe interacción con cambio de rango entre los tratamientos de manejo cuando se compararon las condiciones con buena disponibilidad hídrica o con estrés hídrico. Por su parte, otro objetivo del Capítulo IV fue identificar procesos fisiológicos que expliquen las variaciones en el rendimiento a través de diferentes manejos y ambientes hídricos. Las variaciones en rendimiento se explicaron fundamentalmente por diferencias en el número de granos cosechadas por unidad de área y la captura total aparente de N a madurez.

5.4. Contraste de hipótesis asociados a los objetivos específicos de la presente tesis doctoral

Durante el desarrollo de esta tesis se han presentado y analizado evidencias según los objetivos planteados, permitiendo responder a las hipótesis originales. A continuación, se resaltan los resultados del contraste de cada hipótesis formulada en el Capítulo I de la presente tesis.

El objetivo específico 1 de la presente tesis evaluar la magnitud de las brechas de rendimiento en el cultivo de soja producida en secano en la región Central Argentina. La

hipótesis 1, asociada a dicho objetivo, fue que “las brechas de rendimiento del cultivo de soja en región Central Argentina se encuentran dentro del rango de valores explotables”. La predicción correspondiente “las B_r medias de soja son mayores a 20%”. *Los resultados del Capítulo II no presentan evidencias suficientes para rechazar la Hipótesis 1, dado el cumplimiento de su predicción.*

El objetivo específico 2 fue identificar variables ambientales y de manejo agronómico asociadas con la variabilidad en las brechas de rendimiento en el cultivo de soja producida en secano en la región Central Argentina. La hipótesis 2, asociada a dicho objetivo, fue que “las variables de manejo agronómico son más relevantes que las ambientales en la determinación de la variabilidad de las brechas de rendimiento de soja, y su importancia relativa no varía entre cultivos de primera y de segunda”. La predicción correspondiente fue que “las variables de manejo agronómico explican más del 50% de la variabilidad de las brechas de rendimiento, y su importancia relativa es igual para soja de primera como de segunda”. *Los resultados del Capítulo II presentaron evidencias suficientes para rechazar la Hipótesis 2, dado el cumplimiento parcial de su predicción.* La importancia de las variables de manejo fue mayor al 50%, sin embargo, fue diferente para soja de primera (65%) y de segunda (90%).

El *objetivo específico 3* fue explorar la distribución espacial de las brechas de rendimiento de soja producida en secano en la región Central Argentina. La hipótesis 3, asociada a dicho objetivo, fue que “la zona Central de Argentina presenta subzonas con valores diferenciales de brechas de rendimiento de soja de primera y segunda”. La predicción correspondiente a dicho capítulo fue “existe un patrón espacial detectable dentro de la región Central Argentina, con zonas de menor magnitud de brechas de rendimiento (<20%) y zonas con valores mayores (>60%), tanto para soja de primera como de segunda”. *Los resultados del Capítulo II mostraron suficientes evidencias para rechazar la Hipótesis 3, dado el cumplimiento parcial de su predicción.* El patrón espacial fue sólo detectable para soja de primera no así para soja de segunda.

El *objetivo específico 4* estimar el efecto de la aplicación de un paquete insumos de uso no generalizado sobre la reducción de las brechas de rendimiento y el resultado económico. La hipótesis 4, asociada a dicho objetivo, fue “las brechas de rendimiento pueden disminuirse mediante un paquete de insumos de uso no generalizado, representando una ganancia económica

adicional para los productores”. Las predicciones asociadas fueron: (i) “reducción de al menos 10% de la brechas de rendimiento por aplicación de insumos de uso no generalizado”, (ii) “costos de producción menores al ingreso adicional por el uso del paquete de insumos”. *Los resultados del Capítulo III mostraron suficientes evidencias para rechazar la Hipótesis 4, debido al incumplimiento de sus predicciones.* El paquete de insumos redujo la B_r en tan sólo un 3%, representado a su vez resultados económicos negativos para los productores bajo estudio.

El *objetivo específico 5* fue explorar la relación entre la respuesta a la aplicación de insumos de uso no generalizado con variables del sitio en la región Central Argentina. La hipótesis 5, asociada a dicho objetivo, fue “la respuesta al uso de insumos está relacionada con la magnitud del rendimiento potencial limitado por agua, brecha de rendimiento y condicionada por variables que caracterizan al sitio de producción.”. Las correspondientes predicciones fueron (i) “existe correlación positiva entre la respuesta al uso de insumos y el rendimiento potencial limitado por agua”, (ii) “existe correlación positiva entre la respuesta al uso de insumos y la brecha de rendimiento”, y (iii) “variables químicas de suelo están asociadas la magnitud de la respuesta al uso de insumos a través de diferentes sitios de producción” *Los resultados del Capítulo III mostraron suficientes evidencias para rechazar la Hipótesis 5, dado el incumplimiento parcial de una de sus predicciones.* No se observó correlación positiva entre la respuesta al uso de insumos y el rendimiento potencial limitado por agua en las situaciones analizadas.

El *objetivo específico 6* fue cuantificar posibles beneficios/penalidades entre los manejos agronómicos para reducir la B_r y la tolerancia a estrés hídrico. La hipótesis 6, asociada a dicho objetivo, fue que “planteos ofensivos formulados para alcanzar rendimientos potenciales tienen penalidades en ambientes con estrés hídrico”. Las predicciones para esta hipótesis fueron: (i) “en ambientes no limitantes en disponibilidad hídrica, son mayores los rendimientos en planteos tendientes a obtener rendimientos potenciales que en planteos tolerantes a estrés hídrico”, y (ii) “en ambientes con estrés hídrico, son mayores los rendimientos en planteos tolerantes a estrés hídrico que en planteos tendientes a obtener rendimientos potenciales” *Los resultados del Capítulo IV mostraron suficientes evidencias para rechazar la Hipótesis 6, debido al incumplimiento de sus predicciones.* Un planteo tendiente a obtener rendimientos potenciales

mostró los mayores rendimientos tanto en ambientes no limitantes en disponibilidad hídrica como en ambientes con estrés hídrico.

El *objetivo específico 7* fue explorar variables fisiológicas relacionadas con los componentes de rendimiento y la captura total de N para explicar posibles penalidades entre los manejos agronómicos para reducir la brecha de rendimiento y la tolerancia a estrés hídrico. La hipótesis 7, asociada a dicho objetivo, fue “diferencias de rendimiento entre planteos productivos en distintos ambientes están asociados a diferencias en captura total aparente de N y número de granos”. La predicción correspondiente fue “rendimientos superiores están asociados a elevados valores de captura total aparente de N y número de granos”. *Los resultados del Capítulo IV no presentaron suficientes evidencias para rechazar la Hipótesis 7, debido al cumplimiento de su predicción.*

5.5. Implicancias para futuras investigaciones

A pesar de los avances logrados en el entendimiento de las B_r del cultivo de soja, numerosos aspectos de interés no han sido totalmente dilucidados y/o al mismo tiempo surgen nuevos interrogantes, aproximaciones o temas a resolver en posibles investigaciones futuras. Algunos de estos temas se plantean a continuación, así como algunas potenciales aproximaciones para ponerlos a prueba.

5.5.1. Ensayos multiambientales para explorar factores genéticos, de manejo y ambientales que determinan las brechas de rendimiento de soja.

Evaluar los factores determinantes de áreas con rendimientos contrastante puede considerarse como un paso necesario para contribuir con el diseño de sistemas agrícolas sostenibles (Adams et al., 2018a). Identificar las causas de la variabilidad en la productividad de los cultivos puede realizarse explotando bases de datos de distinto tipo y aproximaciones (Sadras et al., 2015). En Argentina, por ejemplo, el enfoque pueden variar desde lotes de producción (Capítulo II) hasta ensayos multiambientales (Bacigaluppo et al., 2011). Analíticamente, los ensayos multiambientales pueden explorarse de múltiples maneras que van desde técnicas de

minería de datos sin grandes exigencias en el tipo de datos/supuestos estadísticos como los árboles de regresión (Munaro et al., 2020; Rotili et al., 2020), hasta técnicas más exigentes en los requerimientos de los datos como la aproximación inferencial multimodelo (Gambin et al., 2016; Garibaldi et al., 2017)

En Argentina, existen numerosos ensayos multiambientales en donde un set de genotipos comerciales es evaluado bajo múltiples condiciones de manejo y ambiente (Bacigaluppo et al., 2011; Carrera et al., 2011). En los últimos años, dicho tipo de experimentos han comenzado a ser analizadas mediante la aproximación de inferencia multimodelo, contribuyendo al entendimiento de los factores que regulan los R_a , guiando recomendaciones de manejo para el cierre de B_r en maíz (Casali et al., 2018; Coyos et al., 2018; Gambin et al., 2016; Vitantonio-Mazzini et al., 2020). El uso de dicha aproximación estadística se mantiene explotada de manera insuficiente para el cultivo de soja. Con esta línea de trabajo, se propone complementar el conocimiento aportado en el Capítulo II mediante otro tipo de estructura de datos y técnica analítica para desentrañar los factores que afectan las B_r del cultivo de soja de la región. Por otro lado, el uso de ensayos multiambientales permitirá cuantificar y explorar la interacción genotipo x ambiente x manejo para el cierre de B_r (Cooper et al., 2021), lo cual puede no haber sido totalmente evaluada en el Capítulo II de la presente tesis doctoral, dado el recambio varietal observado para el período de tiempo bajo análisis.

5.5.2. Exploración de factores socioeconómicos para el análisis de brechas de rendimiento de soja

En el Capítulo II de la presente tesis se determinó la importancia relativa de distintos factores ambientales y de manejo conducentes a niveles contrastantes de B_r de soja en la región Central Argentina. Esto constituyó un avance en la identificación de las causas de las B_r en los sistemas de producción. Los hallazgos encontrados relacionados a opciones de manejo agronómico expande al conocimiento relacionado a factores determinantes de las B_r de soja en Argentina, las cuales habían incluido principalmente el análisis de variables climáticas (Andrade y Satorre, 2015; Aramburu Merlos et al., 2015). Los productores bajo análisis en el Capítulo II y III corresponden a productores tecnificados de Argentina. Este tipo de productores presenta un

nivel de asesoramiento técnico y empresarial medio-alto, por lo cual, quizás los resultados obtenidos deben ser contextualizados.

En este sentido, un factor no explorado en el Capítulo II es la evaluación de factores socioeconómicos en la determinación de las B_r (Monjardino et al., 2019; Van Dijk et al., 2016). Los agricultores argentinos persiguen numerosos objetivos al llevar adelante un cultivo, los cuales pueden agruparse en socioeconómicos y ambientales (Arora et al., 2016). Si bien ambos tipos de objetivos son importantes, los agricultores tienden a priorizar los objetivos económicos por sobre los sociales o los ambientales (Arora et al., 2016). El análisis de B_r debe contemplar y evaluar este y otro tipo de factores dado que los agricultores buscan maximizar el retorno económico de la inversión en los cultivos y no sólo la producción física por unidad de superficie (Lobell et al., 2009). Numerosos son los tipos y variables que afectan la toma de decisiones de manejo en los sistemas de producción variando desde aspectos netamente técnicos hasta económicos (Bert et al., 2007, 2006). En este sentido, algunas de las variables de manejo relevantes en la determinación de las B_r encontradas en el Capítulo II pueden estar siendo afectadas por factores socioeconómicos no explorados mediante dicha aproximación, y dado su posible efecto, su identificación puede ser relevante. De esta manera se propone incorporar este tipo de aspectos en futuros análisis de B_r en la región Central Argentina. Algunos de ellos podrían ser: tenencia de la tierra, tipo de empresa, aversión al riesgo y nivel de gerenciamiento, tamaño de la explotación, nivel de endeudamiento, entre otros, que puedan estar condicionando el manejo de las explotaciones y por ende, la magnitud de las B_r (Tittonell y Giller, 2013).

5.5.2. Diseño de opciones de manejo para el cierre de brechas de rendimiento en paralelo con elevada concentración de proteína en las semillas de soja.

La harina de soja, el subproducto de la extracción del aceite de las semillas, de alto valor utilizado principalmente para la alimentación animal. Los mercados mundiales exigen harina de soja con una alta concentración de proteína (Guinn, 2002). Sin embargo, los déficits de proteínas de semillas se observan con frecuencia en diferentes regiones productoras de soja (Assefa et al., 2018; Bosaz et al., 2019; Rotundo et al., 2016), lo que impide la producción de harina alta en proteínas requerida por los mercados internacionales. Actualmente, Argentina enfrenta estos

costos y problemas adicionales debido a las constantes reducciones de la concentración de proteína de soja, especialmente en la región Central Argentina (Bosaz et al., 2019). Al menos parte de los aumentos del rendimiento de la soja durante las últimas décadas están asociados con la dilución de la proteína de la semilla en cultivares de alto rendimiento (de Felipe et al., 2016). Los resultados del Capítulo II muestran que la zona Central Argentina donde se alcanzan reducidas B_r es similar a aquella que también experimenta reducidas concentraciones de proteína (Bosaz et al., 2019).

De esta manera, el desafío es lograr altos rendimientos en los campos de agricultores compatibles con los requisitos de calidad adecuados para las necesidades de la industria. En este sentido, estudios recientes han explorado rendimientos cercanos a los potenciales conjuntamente con elevadas concentraciones de proteína (Cafaro La Menza et al., 2019, 2017). Por lo tanto, sería interesante evaluar la efectividad de prácticas de manejo para el cierre de B_r y la calidad del producto cosechado. Sin embargo, opciones de manejo que incrementen tanto rendimiento como proteína son difíciles de identificar y cuantificar (Favoretto, 2019). Generar esta información puede ser clave para el diseño de estrategias de manejo que complementen el cierre de B_r de soja con los requerimientos proteicos para el uso de sus subproductos derivados, potenciando la competitividad de los sistemas sojeros de la región. Una potencial aproximación es plantear experimentalmente combinaciones de estrategias de manejo, evaluando zonas/genotipos con niveles contrastantes de proteína y rendimiento.

5.5.3. Exploración de fechas de siembra y elección de ciclo en ambientes hídricos contrastantes.

El crecimiento y rendimiento del cultivo de soja es altamente dependiente de la disponibilidad hídrica (Grassini et al., 2015a), ya que mermas por déficit hídrico provoca reducciones variables que dependen de la dinámica de las precipitaciones durante el ciclo del cultivo (Capítulo IV). Las mayores reducciones se dan como diferencias en la disponibilidad hídrica que ocurren en etapas fenológicas que definen los componentes que determinan el rendimiento (Cárcova et al., 2003). Para el caso de soja, dado la importancia del número de granos sobre el rendimiento en ambientes con disponibilidad hídrica variables (Capítulo IV), el período más sensible al estrés es alrededor de R_3 - R_5 (Kantolic et al., 2003). En el Capítulo IV se

discutieron cuestiones relacionadas al encontrar opciones de manejo como densidad de siembra, espaciamiento entre surcos y elección de genotipo, que contribuyan a alcanzar altos rendimientos en ambientes contrastantes, sin modificaciones en la fecha de siembra del cultivo.

Sin embargo, el patrón de desarrollo fenológico de un cultivo es uno de los caracteres más importantes desde el punto de vista a su adaptación al ambiente, y es particularmente crítico en situaciones con marcados estreses abióticos como el déficit hídrico (Gastaldi et al., 2020; Passioura, 1996). Se pueden explorar patrones de desarrollo apropiados para sortear períodos con mayor riesgo de sequía. De esta forma, los cultivos pueden escapar de situaciones de estrés cuando por su patrón de desarrollo, alcanzan períodos críticos en épocas con menor riesgo de sequía. Esta estrategia es válida en ambientes con marcado patrón estacional, o dónde la probabilidad de ocurrencia puede determinarse.

De esta manera, la elección del genotipo y la fecha de siembra son dos factores relevantes dado su efecto sobre el desarrollo del cultivo de soja. Se han documentado algunos reportes dónde son evaluadas diferentes fechas de siembra a través de un amplio gradiente de precipitaciones (Riglos et al., 2019). Así mismo, la elección de la fecha de siembra y del genotipo son dos prácticas modificables por los agricultores ante pronósticos climáticos extendidos (Bert et al., 2007). Ambas decisiones no son sólo relevantes para sortear períodos de estrés, sino que además afectan el rendimiento potencial del cultivo, por lo cual, importantes para la determinación de las B_r en los sistemas de producción de la región (Manlla, 2018). Estas prácticas en forma combinada no fueron exploradas en el Capítulo IV, por lo cual sería interesante su evaluación. Esto podía lograrse mediante la combinación de experimentos a campo (Capítulo IV) complementados con experimentos *in silico* que permitirían extender el patrón interanual climático de la región (Carcedo y Gambin, 2019; Gastaldi et al., 2020; Rotili et al., 2020). Esto complementarían los hallazgos del Capítulo IV, guiando a los agricultores en la toma de decisiones frente a escenarios hídricos contrastantes (Nóia Júnior et al., 2020).

5.5.4. Evaluación de genotipos tolerantes al estrés hídrico para el cierre de brechas de rendimiento en ambientes limitantes.

En el Capítulo IV de la presente tesis doctoral, se evaluaron determinadas opciones de manejo tales como el arreglo espacial y la elección de genotipos bajo ambientes con disponibilidad hídrica contrastante. La elección de los genotipos intervinientes en dichos ensayos se basó fundamentalmente en su ciclo y adaptación local dónde se realizaron los experimentos (Santachiara et al., 2017a), además de ser considerados dada su buena participación en el mercado. En este sentido, una nueva generación de genotipos estará próximamente disponible para los agricultores, los cuales poseen características que los hacen adecuados para ambientes con disponibilidad hídrica limitada (Gonzalez et al., 2020; Ribichich et al., 2020).

En este sentido, una potencial línea de trabajo podría consistir en complementar los aportes del Capítulo IV de la presente tesis, evaluando genotipos “tolerantes a sequía” bajo diferentes estructuras de cultivo (densidad de siembra x espaciamiento entre surcos) y ambientes hídricos. Dada la importancia de las opciones de manejo para alcanzar elevados R_a (Capítulo IV), este proyecto podría contribuir a guiar la recomendación agronómica para el uso de esta nueva genética disponible para el cierre de las B_f en los sistemas de producción, para la cual la información es actualmente limitada.

5.5.5. Exploración del efecto del exceso hídrico sobre el rendimiento de soja para el diseño de estrategias de manejo

El Capítulo IV de la presente tesis se evaluaron diferentes opciones de manejo en ambientes con disponibilidad hídrica variable. Mediante experimentos se trató de evaluar las condiciones hídricas frecuentes en la región Central, simulando años o ambientes restrictivos y con buena disponibilidad hídrica. A pesar de la representatividad de los ambientes evaluados en el Capítulo IV, en dichos experimentos no se contemplaron ambientes restrictivos por exceso hídrico, comúnmente conocidos como ambientes con anegamiento o inundación. En la actualidad, muchos ambientes de producción de granos de la región Central Argentina pueden mostrar períodos variables de anegamiento dado por exceso de lluvias en suelos con baja capacidad de infiltración y/o con napa freática muy cercana a la superficie. La mayor frecuencia

durante estos últimos años de ambientes anegados temporariamente, no sólo se debe al régimen de precipitaciones (Boulanger et al., 2005), sino además a cambios en el uso de la tierra y la gran proporción de área sembrada con el cultivo de soja año tras año produciendo además un ascenso de la napa freática hacia la superficie (Mercau et al., 2016; Nosetto et al., 2015, 2012).

Los efectos negativos del anegamiento temporal sobre el rendimiento del cultivo de soja han sido cuantificados (Rhine et al., 2010; Scott et al., 1989). En la región Central Argentina, se han reportado investigaciones cuantificando el efecto del anegamiento sobre cultivos forrajeros (Berhongaray et al., 2019) y cultivos invernales de grano (Ploschuk et al., 2020), siendo escasas investigaciones relacionadas al cultivo de soja. A su vez, no existen reportes acerca de opciones de manejo del cultivo de soja tendientes a mitigar o evadir los efectos negativos del anegamiento temporal (por ejemplo: elección de genotipos, densidad, o fechas de siembra). Menos aún, se conoce si existen compensaciones en rendimiento entre dichas opciones de manejo frente a condiciones ambientales cambiantes. Estos trabajos podrían generar información de manejo para ambientes que presentan elevadas probabilidades de períodos de anegamiento temporario durante el ciclo del cultivo.

5.5.6. Análisis síntesis del efecto del uso de insumos sobre el rendimiento de soja.

En el Capítulo III se desplegó y evaluó una red de ensayos tendientes a cuantificar posibles incrementos de los R_a a través del uso de un paquete de insumos bajo diferentes condiciones ambientales y de manejo en la región Central Argentina. Dado lo errático de las respuestas del cultivo de soja a la adición de insumos, un complemento a los hallazgos del Capítulo III puede ser conducir un análisis síntesis o meta-análisis con reportes de experimentos (Assefa et al., 2017; Long et al., 2017; Miguez y Bollero, 2005; Mourtzinis et al., 2018a). Los meta-análisis están diseñados para integrar información de diversos estudios y condiciones para evaluar los efectos de un tratamiento en un conjunto de variables independientes, siendo ampliamente utilizados en investigación agrícola (Favoretto, 2019; Rotundo y Westgate, 2009; Santachiara et al., 2019; Thilakarathna y Raizada, 2017). Los meta-análisis pueden ser particularmente informativos porque proporcionan una estimación cuantitativa de los tamaños del efecto, así como son considerados sumamente adecuados para lidiar con respuestas erráticas

de un tratamiento experimental vs un testigo. Esto podría ayudar a concluir acerca de la respuesta al uso de insumos en el cultivo de soja, cuantificando el efecto global del uso de insumos. La explotación de este tipo de técnicas analíticas puede ayudar a encontrar condiciones ambientales y prácticas de manejo eficientes para el cierre de B_r de los cultivos (Slattery et al., 2013; Zhang et al., 2020).

5.5.7. Agricultura de precisión como aproximación para la evaluación de paquetes de insumos que permitan el cierre de brechas de rendimiento

El análisis de B_r mediante aproximaciones relacionadas a la agricultura de precisión son actualmente escasos (Sadras et al., 2015). La adopción de la agricultura de precisión es un fenómeno que viene en crecimiento entre los productores de Argentina (Lowenberg-DeBoer y Erickson, 2019), aunque existe controversias acerca si la agricultura de precisión puede reemplazar totalmente la aproximación de experimentos tradicional en proyectos de investigación (Borges et al., 2019). Sin embargo, el uso de aproximaciones que exploran la variabilidad a nivel de sitio/lote se está explotando para seleccionar genotipos de rendimiento superior a través de un amplio rango ambiental, sin incrementar en el número de ensayos o campañas agrícolas en evaluación (Peralta et al., 2018). Estos proyectos a escala de lote de producción, están principalmente impulsados por avances en el diseño de experimentos y técnicas de análisis que los hacen factibles (Alesso et al., 2019; Córdoba et al., 2016). La disponibilidad de monitores de rendimiento en cosechadoras desde principios de la década de 1990 significa que ahora hay disponibles series de tiempo largas (más de 10 años) de datos de rendimiento en muchos sistemas de producción. Estos datos dentro del lote son muy valiosos ya que proporcionan una medida objetiva y específica del sitio de la producción. Dada la disponibilidad actual de estos datos temporales específicos del sitio, existen enfoques estadístico para calcular y analizar B_r específica del sitio (Leroux et al., 2019).

E el Capítulo III se exploraron paquetes de insumos relacionados fundamentalmente a la nutrición del cultivo y su contribución al cierre de las B_r en sistemas de producción de soja de altos rendimientos. La efectividad para incrementar los R_a del paquete de insumos evaluado dependió de ciertas covariables del sitio, que podrían presentar variabilidad espacial dentro de un

lote de producción particular (Smidt et al., 2016). Con estos resultados, un proyecto interesante podría ser evaluar distintos paquetes o insumos en su efectividad en el cierre de las B_r pero utilizando diseños experimentales que permitan explorar la variabilidad espacial metro a metro en un lote. Esto permitiría aumentar considerablemente el número y confiabilidad de las respuestas, así como el rango de productividad y condiciones ambientales exploradas (Peralta et al., 2018), mejorando posibles recomendaciones para el cierre de B_r a través del uso de insumos.

Existen reportes en Estados Unidos, dónde dicha metodología fue evaluada para generar información acerca modelos de recomendación de fertilización nitrogenada en maíz y la delimitación de zona con alta probabilidad de respuesta para guiar a los agricultores (Bullock et al., 2019). Esta aproximación puede ser fácilmente adaptable al modelo de experimentación de soja en Argentina dada la creciente adopción de tecnologías como el mapeo de rendimientos y suelos, y la fertilización con dosis variable (Lowenberg-DeBoer y Erickson, 2019), así como la activa participación de agricultores tecnificados en proyectos de investigación (Monzon et al., 2018).

5.5.8. Desarrollo de una “Red de concursos de Máximos Rendimientos” para explorar rendimientos potenciales en la región.

En la presente tesis doctoral se exploraron diferentes formas de estimación de rendimientos potenciales de acuerdo a Lobell et al. (2009). En este sentido se usaron estimaciones que incluyeron el uso de máximos rendimientos de agricultores (Capítulo II), experimentos controlados con riego (Capítulo IV) y modelos de simulación de cultivos (Capítulo III). Una alternativa válida para complementar dichas formas de estimación es el uso de concursos de máximos rendimientos, frecuentes en EE.UU (Adams et al., 2017; Lollato et al., 2019; Van Roekel y Purcell, 2014) y actualmente no explotados en Argentina para soja. Mediante esta aproximación a los valores de rendimiento potencial, los sistemas de cultivos ganadores de concursos son dignos de estudios adicionales (Fischer y Edmeades, 2010) pudiendo conducir a la identificación de prácticas de manejo novedosas que permitan la reducción de la B_r (Lollato et al., 2019). Las estimaciones en concursos de rendimiento, no exploradas para soja en Argentina, podrían permitir explorar procesos fisiológicos para apuntar a los esfuerzos de

mejoramiento o el ajuste a los límites de los parámetros utilizados en modelos de simulación (Fischer y Edmeades, 2010). Estos modelos son de amplio uso actual en investigación aplicada en nuestro país para soja (Aramburu Merlos et al., 2015; Cafaro La Menza et al., 2017; Monzon et al., 2018), por lo cual, calibrarlos en base a condiciones ambientales y de cultivo locales resulta relevante (Mercau et al., 2007; Purcell y Van Roekel, 2019).

5.9. Referencias

- Adams, T.C., Brye, K.R., Purcell, L.C., Ross, J., Gbur, E.E., Savin, M.C., 2017. Soil property predictors of soybean yield using yield contest sites. *J. Crop Improv.* 31, 816–829. <https://doi.org/10.1080/15427528.2017.1372326>
- Adams, T.C., Brye, K.R., Purcell, L.C., Ross, W.J., Gbur, E.E., Savin, M.C., 2018a. Soil property differences among high- and average-yielding soya bean areas in Arkansas, USA. *Soil Use Manag.* 34, 72–84. <https://doi.org/10.1111/sum.12397>
- Adams, T.C., Brye, K.R., Purcell, L.C., Ross, W.J., Gbur, E.E., Savin, M.C., 2018b. Physiological Plant Response Differences among High- and Average-Yield Soybean Areas in Arkansas. *Crop. forage turfgrass Manag.* 4, 1–10. <https://doi.org/10.2134/cftm2017.07.0047>
- Alesso, C.A., Cipriotti, P.A., Bollero, G.A., Martin, N., 2019. Experimental Designs and Estimation Methods for On-Farm Research: A Simulation Study of Corn Yields at Field Scale. *Agron. J.* 111, 2724–2735. <https://doi.org/10.2134/agronj2019.03.0142>
- Andrade, F.H., 2016. Los desafíos de la agricultura, IPNI-Int. ed. Acassuso, Argentina.
- Andrade, J.F., Poggio, S.L., Ermácóra, M., Satorre, E.H., 2017. Land use intensification in the Rolling Pampa, Argentina: Diversifying crop sequences to increase yields and resource use. *Eur. J. Agron.* 82, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.09.013>
- Andrade, J.F., Rattalino Edreira, J.I., Mourtzinis, S., Conley, S.P., Ciampitti, I.A., Dunphy, J.E., Gaska, J.M., Glewen, K., Holshouser, D.L., Kandel, H.J., Kyvergya, P., Lee, C.D., Licht, M.A., Lindsey, L.E., McClure, M.A., Naeve, S., Nafziger, E.D., Orłowski, J.M., Ross, J., Staton, M.J., Thompson, L., Specht, J.E., Grassini, P., 2019. Assessing the influence of row spacing on soybean yield using experimental and producer survey data. *F. Crop. Res.* 230, 98–106. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.10.014>
- Andrade, J.F., Satorre, E.H., 2015. Single and double crop systems in the Argentine Pampas: Environmental determinants of annual grain yield. *F. Crop. Res.* 177, 137–147. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.03.008>
- Andrianasolo, F.N., Casadebaig, P., Maza, E., Champolivier, L., Maury, P., Debaeke, P., 2014. Prediction of sunflower grain oil concentration as a function of variety, crop management and environment using statistical models. *Eur. J. Agron.* 54, 84–96. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.12.002>
- Andriani, J., 2009. Constantes hídricas de los principales suelos agrícolas del sur de Santa Fe, Para mejorar la producción. Oliveros.
- Aramburu Merlos, F., Monzon, J.P., Mercáu, J.L., Taboada, M., Andrade, F.H., Hall, A.J., Jobbágy, E., Cassman, K.G., Grassini, P., 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *F. Crop. Res.* 184, 145–154. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.10.001>
- Arora, P., Peterson, N.D., Bert, F., Podesta, G., 2016. Managing the triple bottom line for sustainability: A case study of argentine agribusinesses. *Sustain. Sci. Pract. Policy* 12. <https://doi.org/10.1080/15487733.2016.11908154>
- Ashley, D.A., Ethridge, W.J., 1978. Irrigation effects on vegetative and reproductive development of three soybean cultivars. *Agron. J.* 70, 467–471.
- Assefa, Y., Bajjalieh, N., Archontoulis, S., Casteel, S., Davidson, D., Kovács, P., Naeve, S., Ciampitti, I.A., 2018. Spatial Characterization of Soybean Yield and Quality (Amino Acids, Oil, and Protein) for United States. *Sci. Rep.* 8, 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32895-0>
- Assefa, Y., Prasad, P.V.V., Foster, C., Wright, Y., Young, S., Bradley, P., Stamm, M., Ciampitti, I.A., 2017. Major Management Factors Determining Spring and Winter Canola Yield in North America. *Crop Sci.* 51, 1–16. <https://doi.org/10.2135/cropsci2017.02.0079>
- Bacigaluppo, S., Bodrero, M.L., Balzarini, M., Gerster, G.R., Andriani, J.M., Enrico, J.M., Dardanelli, J.L., 2011. Main edaphic and climatic variables explaining soybean yield in Argiudolls under no-tilled systems. *Eur. J. Agron.* 35, 247–254. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.07.001>
- Bai, J., Chen, X., Dobermann, A., Yang, H., Cassman, K.G., Zhang, F., 2010. Evaluation of nasa satellite-and model-derived weather data for simulation of maize yield potential in China. *Agron. J.* 102, 9–16. <https://doi.org/10.2134/agronj2009.0085>
- Balboa, G.R., Archontoulis, S. V., Salvagiotti, F., Garcia, F.O., Stewart, W.M., Francisco, E., Vara Prasad, P.V., Ciampitti, I.A., 2019. A systems-level yield gap assessment of maize-soybean rotation under high- and low-management inputs in the Western US Corn Belt using APSIM. *Agric. Syst.* 174, 145–154. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2019.04.008>
- Balboa, G.R., Sadras, V.O., Ciampitti, I.A., 2018. Shifts in soybean yield , nutrient uptake , and nutrient stoichiometry: A historical synthesis-analysis. *Crop Sci.* 12, 1–44. <https://doi.org/10.2135/cropsci2017.06.0349>
- Ball, R.A., Purcell, L.C., Vories, E.D., 2000. Optimizing soybean plant population for a short-season production system in the southern USA. *Crop Sci.* 40, 757–764. <https://doi.org/10.2135/cropsci2000.403757x>
- Bandara, A.Y., Weerasooriya, D.K., Conley, S.P., Bradley, C.A., Allen, T.W., Esker, P.D., 2020. Modeling the relationship between estimated fungicide use and disease-associated yield losses of soybean in the United States I: Foliar fungicides vs foliar diseases. *PLoS One* 15, e0234390. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0234390>
- Bastidas, A.M., Setiyono, T.D., Dobermann, A., Cassman, K.G., Elmore, R.W., Graef, G.L., Specht, J.E., 2008. Soybean sowing date: The vegetative, reproductive, and agronomic impacts. *Crop Sci.* 48, 727–740. <https://doi.org/10.2135/cropsci2006.05.0292>
- Bates, D.M., Maechler, M., Bolker, B., Walker, S., 2010. Fitting linear mixed-effects models using lme4. *J. Stat. Softw.* 67, 1–48.

- <https://doi.org/10.1177/009286150103500418>
- Beal Cohen, A.A., Seifert, C.A., Azzari, G., Lobell, D.B., 2019. Rotation Effects on Corn and Soybean Yield Inferred from Satellite and Field-level Data. *Agron. J.* 111, 2940–2948. <https://doi.org/10.2134/agronj2019.03.0157>
- Bender, R.R., Haegerle, J.W., Below, F.E., 2015. Nutrient uptake, partitioning, and remobilization in modern soybean varieties. *Agron. J.* 107, 563–573. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0435>
- Berhongaray, G., Basanta, M., Jauregui, J.M., 2019. Water table depth affects persistence and productivity of alfalfa in Central Argentina. *F. Crop. Res.* 235, 54–58. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.02.018>
- Bert, F.E., Podestá, G.P., Satorre, E.H., Messina, C.D., 2007. Use of climate information in soybean farming on the Argentinean pampas. *Clim. Res.* 33, 123–134. <https://doi.org/10.3354/cr033123>
- Bert, F.E., Satorre, E.H., Toranzo, F.R., Podestá, G.P., 2006. Climatic information and decision-making in maize crop production systems of the Argentinean Pampas. *Agric. Syst.* 88, 180–204. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2005.03.007>
- Beza, E., Silva, J.V., Kooistra, L., Reidsma, P., 2017. Review of yield gap explaining factors and opportunities for alternative data collection approaches. *Eur. J. Agron.* 82, 206–222. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.06.016>
- Bhatia, V.S., Singh, P., Wani, S.P., Chauhan, G.S., Rao, A.V.R.K., Mishra, A.K., Srinivas, K., 2008. Analysis of potential yields and yield gaps of rainfed soybean in India using CROPGRO-Soybean model. *Agric. For. Meteorol.* 148, 1252–1265. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.03.004>
- Bivand, R., Keitt, T., Rowlingson, B., Pebesma, E., 2016. rgdal: Bindings for the geospatial data abstraction library. R Packag. version 1.
- Bivand, R.S., Pebesma, Edzer J, Gómez-Rubio, V., Pebesma, Edzer Jan, 2008. *Applied spatial data analysis with R*. Springer.
- Blake, G.R., Hartge, K.H., 1986. Bulk density. *Methods soil Anal. Part 1 Phys. Mineral. methods* 5, 363–375.
- Bluck, G.M., Lindsey, L.E., Dorrance, A.E., Metzger, J.D., 2015. Soybean yield response to Rhizobia inoculant, gypsum, manganese fertilizer, insecticide, and fungicide. *Agron. J.* 107, 1757–1765. <https://doi.org/10.2134/agronj15.0094>
- Blum, A., 2009. Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. *F. Crop. Res.* 112, 119–123. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.03.009>
- Blum, A., 2005. Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential - Are they compatible, dissonant, or mutually exclusive? *Aust. J. Agric. Res.* 56, 1159–1168. <https://doi.org/10.1071/AR05069>
- Blum, A., Pnuel, Y., 1990. Physiological attributes associated with drought resistance of wheat cultivars in a Mediterranean environment. *Aust. J. Agric. Res.* 41, 799–810. <https://doi.org/10.1071/AR9900799>
- Board, J.E., Tan, Q., 1995. Assimilatory capacity effects on soybean yield components and pod number. *Crop Sci.* 35, 846–851.
- Borges, A., González-Reymundez, A., Ernst, O., Cadenazzi, M., Terra, J., Gutiérrez, L., 2019. Can spatial modeling substitute for experimental design in agricultural experiments? *Crop Sci.* 59, 44–53. <https://doi.org/10.2135/cropsci2018.03.0177>
- Bosaz, L.B., Gerde, J.A., Borrás, L., Cipriotti, P.A., Ascheri, L., Campos, M., Gallo, S., Rotundo, J.L., 2019. Management and environmental factors explaining soybean seed protein variability in central Argentina. *F. Crop. Res.* 240, 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.05.007>
- Boulanger, J.P., Leloup, J., Penalba, O., Rusticucci, M., Lafon, F., Vargas, W., 2005. Observed precipitation in the Paraná-Plata hydrological basin: Long-term trends, extreme conditions and ENSO teleconnections. *Clim. Dyn.* 24, 393–413. <https://doi.org/10.1007/s00382-004-0514-x>
- Bowers, G.R., 1995. An Early Soybean Production System for Drought Avoidance. *J. Prod. Agric.* 8, 112. <https://doi.org/10.2134/jpa1995.fpage>
- Boyer, 1982. *Plant Productivity and Environment*. Science (80-.). 218, 443–448.
- Bray, R.H., Kurtz, L.T., 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59, 39–46.
- Brown, E.A., Caviness, C.E., Brown, D.A., 1985. Response of selected soybean cultivars to soil moisture deficit. *Agron. J.* 77, 274–278.
- Bullock, D.S., Boemgen, M., Tao, H., Maxwell, B., Luck, J.D., Shiratsuchi, L., Puntel, L., Martin, N.F., 2019. The data-intensive farm management project: Changing agronomic research through on-farm precision experimentation. *Agron. J.* 111, 2736–2746. <https://doi.org/10.2134/agronj2019.03.0165>
- Cafaro La Menza, N., Monzon, J.P., Specht, J.E., Grassini, P., 2017. Is soybean yield limited by nitrogen supply? *F. Crop. Res.* 213, 204–212. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.08.009>
- Cafaro La Menza, N., Monzon, J.P., Specht, J.E., Lindquist, J.L., Arkebauer, T.J., Graef, G., Grassini, P., 2019. Nitrogen limitation in high-yield soybean: Seed yield, N accumulation, and N-use efficiency. *F. Crop. Res.* 237, 74–81. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.04.009>
- Caldiz, D.O., Haverkort, A.J., Struik, P.C., 2002. Analysis of a complex crop production system in interdependent agro-ecological zones: A methodological approach for potatoes in Argentina. *Agric. Syst.* 73, 297–311. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(01\)00085-3](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(01)00085-3)
- Calviño, P. a., Sadras, V.O., 1999. Interannual variation in soybean yield: Interaction among rainfall, soil depth and crop management. *F. Crop. Res.* 63, 237–246. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(99\)00040-4](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(99)00040-4)
- Calviño, P.A., Sadras, V.O., Andrade, F.H., 2003. Quantification of environmental and management effects on the yield of late-sown soybean. *F. Crop. Res.* 83, 67–77. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(03\)00062-5](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(03)00062-5)
- Carcedo, A.J.P., Gambin, B.L., 2019. Sorghum drought and heat stress patterns across the Argentinean temperate central region. *F. Crop. Res.*

- 241, 107552. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.06.009>
- Cárcova, J., Abeledo, G., López Pereira, M., 2003. Análisis de la generación del rendimiento: crecimiento, partición y componentes, in: Satorre, E.H., Benech Arnold, R.L., Slafer, G.A., De La Fuente, E.B., Miralles, D.J., Otegui, M.E., Savin, R. (Eds.), *Producción de Cultivos de Granos. Bases Funcionales Para Su Manejo*. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina, pp. 75–95.
- Carrera, C., Martínez, M.J., Dardanelli, J., Balzarini, M., 2011. Environmental variation and correlation of seed components in nontransgenic soybeans: Protein, oil, unsaturated fatty acids, tocopherols, and isoflavones. *Crop Sci.* 51, 800–809. <https://doi.org/10.2135/cropsci2010.06.0314>
- Casali, L., Rubio, G., Herrera, J.M., 2018. Drought and temperature limit tropical and temperate maize hybrids differently in a subtropical region. *Agron. Sustain. Dev.* 58, 49.
- Casanova, D., Goudriaan, J., Bouma, J., Epema, G.F., 1999. Yield gap analysis in relation to soil properties in direct-seeded flooded rice. *Geoderma* 91, 191–216. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(99\)00005-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(99)00005-1)
- Cassman, K.G., 1999. Ecological intensification of cereal production systems: yield potential, soil quality, and precision agriculture. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 96, 5952–5959. <https://doi.org/DOI.10.1073/pnas.96.11.5952>
- Cassman, K.G., Grassini, P., Van Wart, J., 2010. Crop Yield Potential, Yield Trends, and Global Food Security in a Changing Climate, in: C., R., Hillel D. (Eds.), *Handbook of Climate Change and Agroecosystems: Impacts, Adaptation, and Mitigation*. London. <https://doi.org/10.1142/p970>
- Caviglia, O.P., Sadras, V.O., Andrade, F.H., 2013. Modelling long-term effects of cropping intensification reveals increased water and radiation productivity in the South-eastern Pampas. *F. Crop. Res.* 149, 300–311. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.05.003>
- Caviglia, O.P., Sadras, V.O., Andrade, F.H., 2004. Intensification of agriculture in the south-eastern Pampas: I. Capture and efficiency in the use of water and radiation in double-cropped wheat-soybean. *F. Crop. Res.* 87, 117–129. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2003.10.002>
- Ceccarelli, S., Grando, S., 1991. Selection environment and environmental sensitivity in barley. *Euphytica* 57, 157–167.
- Chapman, S.C., De la Vega, A.J., 2002. Spatial and seasonal effects confounding interpretation of sunflower yields in Argentina. *F. Crop. Res.* 73, 107–120. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(01\)00185-X](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(01)00185-X)
- Ciampitti, I.A., Salvagiotti, F., 2018. New insights into soybean biological nitrogen fixation. *Agron. J.* 110, 1185–1196. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.06.0348>
- Ciampitti, I.A., Vyn, T.J., 2014. Understanding global and historical nutrient use efficiencies for closing maize yield gaps. *Agron. J.* 106, 2107–2117. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0025>
- Collino, D.J., Salvagiotti, F., Peticari, a., Piccinetti, C., Ovando, G., Urquiaga, S., Racca, R.W., 2015. Biological nitrogen fixation in soybean in Argentina: relationships with crop, soil, and meteorological factors. *Plant Soil* 392, 239–252. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2459-8>
- Cooper, M., Tang, T., Gho, C., Hart, T., Hammer, G., Messina, C., 2020. Integrating genetic gain and gap analysis to predict improvements in crop productivity. *Crop Sci.* 60, 582–604. <https://doi.org/10.1002/csc2.20109>
- Cooper, M., Voss, K.P., Carlos, F., Tom, D.M., Graeme, T., 2021. Tackling $G \times E \times M$ interactions to close on-farm yield-gaps: creating novel pathways for crop improvement by predicting contributions of genetics and management to crop productivity. *Theor. Appl. Genet.* <https://doi.org/10.1007/s00122-021-03812-3>
- Corassa, G.M., Amado, T.J.C., Schwalbert, R., Carter, P.R., Ciampitti, I.A., 2018. Optimum soybean seeding rates by yield environment in Southern Brazil. *Agron. J.* 110, 2430–2438. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.04.0239>
- Córdoba, M.A., Bruno, C.I., Costa, J.L., Peralta, N.R., Balzarini, M.G., 2016. Protocol for multivariate homogeneous zone delineation in precision agriculture. *Biosyst. Eng.* 143, 95–107. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.12.008>
- Coyos, T., Borrás, L., Gambin, B.L., 2018. Site-Specific Covariates Affecting Yield Response to Nitrogen of Late-Sown Maize in Central Argentina. *Agron. J.* 110, 1544–1553. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.09.0520>
- Cressie, N., Hawkins, D.M., 1980. Robust estimation of the variogram: I. *J. Int. Assoc. Math. Geol.* 12, 115–125. <https://doi.org/10.1007/BF01035243>
- Cruzate, G.A., Bancho, S., Pizarro, M.J., Mercuri, P.A., 2012. Geointa, una infraestructura de datos espaciales de suelos., in: Congreso Latinoamericano de La Ciencia Del Suelo. 19. Congreso Argentino de La Ciencia Del Suelo. Mar del Plata, Argentina.
- De'Ath, G., Fabricius, K.E., 2000. Classification and regression trees: A powerful yet simple technique for ecological data analysis. *Ecology* 81, 3178–3192. <https://doi.org/10.2307/177409>
- de Bruin, J.L., Pedersen, P., Conley, S.P., Gaska, J.M., Naeve, S.L., Kurle, J.E., Elmore, R.W., Giesler, L.J., Abendroth, L.J., 2010. Probability of yield response to inoculants in fields with a history of soybean. *Crop Sci.* 50, 265–272. <https://doi.org/10.2135/cropsci2009.04.0185>
- de Felipe, M., Borrás, L., Truong, S.K., McCormick, R.F., Rotundo, J.L., 2020. Physiological processes associated with soybean genetic progress in Argentina. *Agrosystems, Geosci. Environ.* 3, e20041. <https://doi.org/10.1002/agg2.20041>
- de Felipe, M., Gerde, J.A., Rotundo, J.L., 2016. Soybean genetic gain in maturity groups III to V in Argentina from 1980 to 2015. *Crop Sci.* 56, 3066–3077. <https://doi.org/10.2135/cropsci2016.04.0214>
- de Oliveira Silva, A., Ciampitti, I.A., Slafer, G.A., Lollato, R.P., 2020. Nitrogen utilization efficiency in wheat: A global perspective. *Eur. J. Agron.* 114, 126008. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126008>

- De Paepe, J.L., Alvarez, R., 2016. Wheat yield gap in the pampas: Modeling the impact of environmental factors. *Agron. J.* 108, 1367–1378. <https://doi.org/10.2134/agronj2015.0482>
- Di Mauro, G., Borrás, L., Rugeroni, P., Rotundo, J.L., 2019. Exploring soybean management options for environments with contrasting water availability. *J. Agron. Crop Sci.* 205, 274–282. <https://doi.org/10.1111/jac.12321>
- Di Mauro, G., Cipriotti, P.A., Gallo, S., Rotundo, J.L., 2018. Environmental and management variables explain soybean yield gap variability in Central Argentina. *Eur. J. Agron.* 99, 186–194. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.04.012>
- Doss, B.D., Pearson, R.W., Rogers, H.T., 1974. Effect of soil water stress at various growth stages on soybean yield. *Agron. J.* 66, 297–299.
- Duan, L., Xie, H., Li, Z., Yuan, H., Guo, Y., Xiao, X., Zhou, Q., 2020. Use of partial least squares regression to identify factors controlling rice yield in Southern China. *Agron. J.* <https://doi.org/10.1002/agj2.20161>
- Edmeades, G.O., Fisher, R.A., Byerlee, D., 2010. Can we feed the world in 2050? *Proc. New Zeal. Grassl. Assoc.* XXXIV–XLII. <https://doi.org/10.33584/jnzc.2010.72.2800>
- Egli, D.B., 1993. Cultivar maturity and potential yield of soybean. *F. Crop. Res.* 32, 147–158. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(93\)90027-K](https://doi.org/10.1016/0378-4290(93)90027-K)
- Egli, D.B., Hatfield, J.L., 2014a. Yield and yield gaps in central U.S. corn production systems. *Agron. J.* 106, 2248–2254. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0348>
- Egli, D.B., Hatfield, J.L., 2014b. Yield Gaps and Yield Relationships in Central U.S. Soybean Production Systems. *Agron. J.* 106, 560–566. <https://doi.org/10.2134/agronj2013.0364>
- Elmore, R.W., 1998. Soybean cultivar responses to row spacing and seeding rates in rainfed and irrigated environments. *J. Prod. Agric.* 11, 326–331.
- Ernst, O.R., Kemanian, A.R., Mazzilli, S.R., Cadenazzi, M., Dogliotti, S., 2016. Depressed attainable wheat yields under continuous annual no-till agriculture suggest declining soil productivity. *F. Crop. Res.* 186, 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.11.005>
- Espe, M.B., Cassman, K.G., Yang, H., Guilpart, N., Grassini, P., Van Wart, J., Anders, M., Beighley, D., Harrell, D., Linscombe, S., McKenzie, K., Mutters, R., Wilson, L.T., Linquist, B.A., 2016. Yield gap analysis of US rice production systems shows opportunities for improvement. *F. Crop. Res.* 196, 276–283. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.07.011>
- Evans, J.R., 2013. Improving photosynthesis. *Plant Physiol.* 162, 1780–93. <https://doi.org/10.1104/pp.113.219006>
- Evans, L.T., 1993. Crop evolution, adaptation and yield. Cambridge university press.
- Faé, G.S., Kemanian, A.R., Roth, G.W., White, C., Watson, J.E., 2020. Soybean yield in relation to environmental and soil properties. *Eur. J. Agron.* 118, 126070. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126070>
- FAOSTAT, 2021. <http://www.fao.org/faostat/es/>. Accedido el 10 mayo 2021.
- Farmaha, B.S., Lobell, D.B., Boone, K.E., Cassman, K.G., Yang, H.S., Grassini, P., 2016. Contribution of persistent factors to yield gaps in high-yield irrigated maize. *F. Crop. Res.* 186, 124–132. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.10.020>
- Favoretto, V.R., 2019. A meta-analysis of how management practices affect soybean yield and quality. M.Sc. Thesis. University of Illinois.
- Fehr, W.R., Caviness, C.E., 1977. Stages of soybean development. Iowa State University of Science and Technology Ames, Iowa.
- Ferraro, D.O., Rivero, D.E., Ghersa, C.M., 2009. An analysis of the factors that influence sugarcane yield in Northern Argentina using classification and regression trees. *F. Crop. Res.* 112, 149–157. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.02.014>
- Fischer, R.A., Edmeades, G.O., 2010. Breeding and cereal yield progress. *Crop Sci.* 50, S-85-S-98. <https://doi.org/10.2135/cropsci2009.10.0564>
- Foley, J. a., Ramankutty, N., Brauman, K. a., Cassidy, E.S., Gerber, J.S., Johnston, M., Mueller, N.D., Connell, C.O., Ray, D.K., West, P.C., Balzer, C., Bennett, E.M., Sheehan, J., Siebert, S., Carpenter, S.R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockstro, J., Tilman, D., Zaks, D.P.M., 2011. Solutions for a cultivated planet. *Nature* 478, 337–342. <https://doi.org/10.1038/nature10452>
- French, R., Schultz, J., 1984. Water use efficiency of wheat in a Mediterranean-type environment. II. some limitations to efficiency. *Aust. J. Agric. Res.* 35, 765–775. <https://doi.org/10.1071/AR9840765>
- Gabioud, E.A., Wilson, M.G., Sasal, M.C., 2011. Análisis de la estabilidad de agregados por el método de Le Bissonnais en tres órdenes de suelos. *Cienc. del Suelo* 29, 129–139.
- Gambin, B.L., Coyos, T., Di Mauro, G., Borrás, L., Garibaldi, L.A., 2016. Exploring genotype, management, and environmental variables influencing grain yield of late-sown maize in central Argentina. *Agric. Syst.* 146, 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2016.03.011>
- Garibaldi, L.A., Aristimuño, F.J., Oddi, F.J., Tiribelli, F., 2017. Inferencia multimodelo en ciencias sociales y ambientales. *Ecol. Austral* 27, 348–363. <https://doi.org/10.25260/EA.17.27.3.0.513>
- Gaspar, A., Laboski, C.A.M., Naeve, S.L., Conley, S.P., 2017. Phosphorus and Potassium Uptake , Partitioning , and Removal across a Wide Range of Soybean Seed Yield Levels. *Crop Sci.* 57, 2193–2204. <https://doi.org/10.2135/cropsci2016.05.0378>
- Gaspar, A.P., Marburger, D.A., Mourtzinis, S., Conley, S.P., 2014. Soybean seed yield response to multiple seed treatment components across diverse environments. *Agron. J.* 106, 1955–1962. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0277>
- Gaspar, A.P., Mourtzinis, S., Kyle, D., Galdi, E., Lindsey, L.E., Hamman, W.P., Matcham, E.G., Kandel, H.J., Schmitz, P., Stanley, J.D., Schmidt, J.P., Mueller, D.S., Nafziger, E.D., Ross, J., Carter, P.R., Varenhorst, A.J., Wise, K.A., Ciampitti, I.A., Carciochi, W.D., Chilvers, M.I., Hauswedell, B., Tenuta, A.U., Conley, S.P., 2020. Defining optimal soybean seeding rates and associated risk across North America. *Agron. J.* 112, 2103–2114. <https://doi.org/10.1002/agj2.20203>

- Gastaldi, A., Alvarez Prado, S., Arduini, J.A., Miralles, D.J., 2020. Optimizing wheat (*Triticum aestivum* L.) management under dry environments: A case study in the West Pampas of Argentina. *Agric. Water Manag.* 233, 106092. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106092>
- Gifford, R.M., Evans, L.T., 1981. Photosynthesis, carbon partitioning, and yield. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 32, 485–509.
- Godfray, H.C.J., Beddington, J.R., Crute, I.R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J.F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S.M., Toulmin, C., 2010. Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People. *Science* (80-.). 327, 812.
- Gonzalez, F.G., Rigalli, N., Miranda, P.V., Romagnoli, M., Ribichich, K.F., Trucco, F., Portapila, M., Otegui, M.E., Chan, R.L., 2020. An Interdisciplinary Approach to Study the Performance of Modified Crops in Field Trials: A Second-generation Genetically Carrying the Sunflower HaBH4 Case Study With Soybean and Wheat Transcription Factor. *Front. Plant Sci.* 11, 1–15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00178>
- Goovaerts, P., 1997. Geostatistics for natural resources evaluation. Oxford University Press on Demand.
- Gou, F., Yin, W., Hong, Y., van der Werf, W., Chai, Q., Heerink, N., van Ittersum, M.K., 2017. On yield gaps and yield gains in intercropping: Opportunities for increasing grain production in northwest China. *Agric. Syst.* 151, 96–105. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.11.009>
- Grassini, P., 2010. Yield potential and resource-use efficiency of maize systems in the Western US Corn Belt. PhD Thesis. University of Nebraska-Lincoln.
- Grassini, P., Eskridge, K.M., Cassman, K.G., 2013. Distinguishing between yield advances and yield plateaus in historical crop production trends. *Nat. Commun.* 4, 2918. <https://doi.org/10.1038/ncomms3918>
- Grassini, P., Hall, A.J., Mercau, J.L., 2009. Benchmarking sunflower water productivity in semiarid environments. *F. Crop. Res.* 110, 251–262. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.09.006>
- Grassini, P., Thorburn, J., Burr, C., Cassman, K.G., 2011. High-yield irrigated maize in the Western U.S. Corn Belt: I. On-farm yield, yield potential, and impact of agronomic practices. *F. Crop. Res.* 120, 142–150. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.09.012>
- Grassini, P., Torrión, J. a., Yang, H.S., Rees, J., Andersen, D., Cassman, K.G., Specht, J.E., 2015a. Soybean yield gaps and water productivity in the western U.S. Corn Belt. *F. Crop. Res.* 179, 150–163. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.04.015>
- Grassini, P., van Bussel, L.G.J., Van Wart, J., Wolf, J., Claessens, L., Yang, H., Boogaard, H., de Groot, H., van Ittersum, M.K., Cassman, K.G., 2015b. How good is good enough? Data requirements for reliable crop yield simulations and yield-gap analysis. *F. Crop. Res.* 177, 49–63. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.03.004>
- Gregg, G.L., Orłowski, J.M., Lee, C.D., 2015. Input-based Stress Management Fails to Increase Soybean Yield in Kentucky. *Crop. Forage Turfgrass Manag.* 1, 0. <https://doi.org/10.2134/cftm2015.0175>
- Guilpart, N., Grassini, P., Sadras, V.O., Timsina, J., Cassman, K.G., 2017. Estimating yield gaps at the cropping system level. *F. Crop. Res.* 206, 21–32. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.02.008>
- Guinn, B.J.M., 2002. Domestic Quality Standards and Trading Rules and Recommended Export Contract Specifications for U . S . Soybeans and Products 9–12.
- Hajjarpoor, A., Soltani, A., Zeinali, E., Kashiri, H., Aynehband, A., Vadez, V., 2018. Using boundary line analysis to assess the on-farm crop yield gap of wheat. *F. Crop. Res.* 225, 64–73. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.06.003>
- Hall, A.J., Feoli, C., Ingaramo, J., Balzarini, M., 2013. Gaps between farmer and attainable yields across rainfed sunflower growing regions of Argentina. *F. Crop. Res.* 143, 119–129. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.05.003>
- Hall, A.J., Rebella, C.M., Ghersa, C.M., Culot, J.P., 1992. Field-crop systems of the Pampas. *Ecosyst. World.*
- Hansel, D.S.S., Schwalbert, R.A., Shoup, D.E., Holshouser, D.L., Parvej, R., Vara Prasad, P. V., Ciampitti, I.A., 2019. A review of soybean yield when double-cropped after wheat. *Agron. J.* 111, 677–685. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.06.0371>
- Hatfield, J.L., Walthall, C.L., 2015. Meeting Global Food Needs: Realizing the Potential via Genetics × Environment × Management Interactions. *Agron. J.* 107, 1215–1226. <https://doi.org/10.2134/agronj15.0076>
- Heatherly, L.G., Spurlock, S.R., 1999. Yield and economics of traditional and early soybean production system (ESPS) seedlings in the midsouthern United States. *F. Crop. Res.* 63, 35–45. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(99\)00025-8](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(99)00025-8)
- Hillel, D., 1971. Soil and Water: Physical Principles and Processes. (Physiological Ecology: a Series of Monographs and Treatises). Soil Water Phys. Princ. Process. Acad. Press. New York London.
- Hochman, Z., Gobbett, D., Horan, H., Navarro Garcia, J., 2016. Data rich yield gap analysis of wheat in Australia. *F. Crop. Res.* 197, 97–106. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.08.017>
- Hoffmann, M.P., Haakana, M., Asseng, S., Höhn, J.G., Palosuo, T., Ruiz-Ramos, M., Fronzek, S., Ewert, F., Gaiser, T., Kassie, B.T., Paff, K., Rezaei, E.E., Rodríguez, A., Semenov, M., Srivastava, A.K., Stratonovitch, P., Tao, F., Chen, Y., Rötter, R.P., 2018. How does inter-annual variability of attainable yield affect the magnitude of yield gaps for wheat and maize? An analysis at ten sites. *Agric. Syst.* 159, 199–208. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.03.012>
- Holshouser, D.L., Whittaker, J.P., 2002. Plant population and row-spacing effects on Early Soybean Production Systems in the Mid-Atlantic USA. *Agron. J.* 94, 603–611. <https://doi.org/10.2134/agronj2002.0603>
- Hoogmoed, M., Neuhaus, A., Noack, S., Sadras, V.O., 2018. Benchmarking wheat yield against crop nitrogen status. *F. Crop. Res.* 222, 153–163.

<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.03.013>

- Hooper, D.U., Johnson, L., 1999. Nitrogen limitation in dryland ecosystems: Responses to geographical and temporal variation in precipitation. *Biogeochemistry* 46, 247–293. <https://doi.org/10.1023/A:1006145306009>
- Jaenisch, B.R., de Oliveira Silva, A., DeWolf, E., Ruiz-Diaz, D.A., Lollato, R.P., 2019. Plant population and fungicide economically reduced winter wheat yield gap in Kansas. *Agron. J.* 111, 650–665. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.03.0223>
- Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L. a., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, a. J., Ritchie, J.T., 2003. The DSSAT cropping system model. *Eur. J. Agron.* 18, 235–265. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7)
- Kantolic, A., Giménez, P.I., la Fuente, E.B., 2003. Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en soja, in: Satorre, E.H., Benech Arnold, R.L., Slafer, G.A., De La Fuente, E.B., Miralles, D.J., Otegui, M.E., Savin, R. (Eds.), *Producción de Cultivos de Granos. Bases Funcionales Para Su Manejo*. Editorial Facultad de Agronomía, Buenos Aires. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina, pp. 167–186.
- Kaspar, T.C., Pulido, D.J., Fenton, T.E., Colvin, T.S., Karlen, D.L., Jaynes, D.B., Meek, D.W., 2004. Relationship of corn and soybean yield to soil and terrain properties. *Agron. J.* 96, 700–709. <https://doi.org/10.2134/agronj2004.0700>
- Kaul, M., Hill, R.L., Walthall, C., 2005. Artificial neural networks for corn and soybean yield prediction. *Agric. Syst.* 85, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2004.07.009>
- Keren, R., 1996. Boron. *Methods Soil Anal. Part 3 Chem. Methods* 5, 603–626.
- Klute, A., 1986. Water retention: laboratory methods. *Methods soil Anal. Part 1 Phys. Mineral. methods* 5, 635–662.
- Koenker, R., 2013. Package ‘quantreg.’
- Le Bissonnais, Y., 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility : I. Theory and methodology. *Eur. J. Soil Sci.* 47, 425–437. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01843.x>
- Leggett, M., Diaz-zorita, M., Koivunen, M., Bowman, R., Pesek, R., Stevenson, C., Leister, T., 2017. Soybean Response to Inoculation with *Bradyrhizobium japonicum* in the United States and Argentina. *Agron. J.* 109, 1031–1038. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.04.0214>
- Leroux, C., Taylor, J., Tisseyre, B., 2019. Production gap analysis - an operational approach to yield gap analysis using historical high-resolution yield data sets, in: 12th European Conference on Precision Agriculture. pp. 75–81. https://doi.org/10.3920/978-90-8686-888-9_8
- Licker, R., Johnston, M., Foley, J.A., Barford, C., Kucharik, C.J., Monfreda, C., Ramankutty, N., 2010. Mind the gap: How do climate and agricultural management explain the “yield gap” of croplands around the world? *Glob. Ecol. Biogeogr.* 19, 769–782. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00563.x>
- Lindsay, W.L., Norvell, W.A., 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42, 421–428.
- Lobell, D.B., Asner, G.P., 2003. Climate and Management in U . S . Agricultural Yields. *Science* (80-.). 299, 1032. <https://doi.org/10.1126/science.1078475>
- Lobell, D.B., Cassman, K.G., Field, C.B., 2009. Crop Yield Gaps: Their Importance, Magnitudes, and Causes. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 34, 179–204. <https://doi.org/10.1146/annurev.enviro.041008.093740>
- Lobell, D.B., Ortiz-Monasterio, J.I., 2006. Regional importance of crop yield constraints: Linking simulation models and geostatistics to interpret spatial patterns. *Ecol. Modell.* 196, 173–182. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.11.030>
- Lobell, D.B., Ortiz-Monasterio, J.I., Asner, G.P., Naylor, R.L., Falcon, W.P., 2005. Combining field surveys, remote sensing, and regression trees to understand yield variations in an irrigated wheat landscape. *Agron. J.* 97, 241–249. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0241>
- Lobell, D.B., Ortiz-Monasterio, J.I., Falcon, W.P., 2007. Yield uncertainty at the field scale evaluated with multi-year satellite data. *Agric. Syst.* 92, 76–90. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2006.02.010>
- Lollato, R.P., Diaz, D.A.R., Dewolf, E., Knapp, M., Peterson, D.E., Fritz, A.K., 2019. Agronomic practices for reducing wheat yield gaps: A quantitative appraisal of progressive producers. *Crop Sci.* 59, 333–350. <https://doi.org/10.2135/cropsci2018.04.0249>
- Lollato, R.P., Edwards, J.T., Ochsner, T.E., 2017. Meteorological limits to winter wheat productivity in the U.S. southern Great Plains. *F. Crop. Res.* 203, 212–226. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.12.014>
- Long, N. V., Assefa, Y., Schwalbert, R., Ciampitti, I.A., 2017. Maize Yield and Planting Date Relationship : A Synthesis-Analysis for US High-Yielding Contest-Winner and Field Research Data. *Front. Plant Sci.* 8, 1–9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02106>
- Loomis, R.S., Connor, D.J., 1992. *Crop ecology: productivity and management in agricultural systems*. Cambridge University Press.
- Lowenberg-DeBoer, J., Erickson, B., 2019. Setting the Record Straight on Precision Agriculture Adoption. *Agron. J.* 111, 1552. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.12.0779>
- Mangialardi, J.P., Orłowski, J.M., Lawrence, B.H., Bond, J.A., Golden, B.R., Catchot, A., Peoples, J.D., Eubank, T.W., 2016. Growth regulation with lactofen does not affect seed yield of irrigated soybean. *Agron. J.* 108, 1112–1115. <https://doi.org/10.2134/agronj2015.0505>
- Manilla, A., 2018. Rendimiento potencial y brechas de producción de soja, maíz y trigo. MSc. Thesis. Universidad Nacional de Rosario.
- Mann, M.L., Warner, J.M., 2017. Ethiopian wheat yield and yield gap estimation: A spatially explicit small area integrated data approach. *F. Crop. Res.* 201, 60–74. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.10.014>
- Marburger, D.A., Haverkamp, B.J., Laurenz, R.G., Orłowski, J.M., Wilson, E.W., Casteel, S.N., Lee, C.D., Naeve, S.L., Nafziger, E.D., Roozeboom, K.L., Ross, W.J., Thelen, K.D., Conley, S.P., 2016a. Characterizing genotype × Management interactions on soybean seed

- yield. *Crop Sci.* 56, 786–796. <https://doi.org/10.2135/cropsci2015.09.0576>
- Marburger, D.A., Mourtzinis, S., Gaska, J.M., Conley, S.P., 2016b. Do crop rotation and tillage influence soybean seed-applied inoculant decisions? *Agron. J.* 108, 402–406. <https://doi.org/10.2134/agronj2015.0331>
- Masino, A., Rugeroni, P., Borrás, L., Rotundo, J.L., 2018. Spatial and temporal plant-to-plant variability effects on soybean yield. *Eur. J. Agron.* 98, 14–24. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.02.006>
- Matcham, E.G., Mourtzinis, S., Conley, S.P., Rattalino Edreira, J.I., Grassini, P., Roth, A.C., Casteel, S.N., Ciampitti, I.A., Kandel, H.J., Kyveryga, P.M., Licht, M.A., Mueller, D.S., Nafziger, E.D., Naeve, S.L., Stanley, J.D., Staton, M.J., Lindsey, L.E., 2020. Management strategies for early- and late-planted soybean in the north-central United States. *Agron. J.* 112, 2928–2943. <https://doi.org/10.1002/agj2.20289>
- McKenzie, H.A., Wallace, S., 1954. The Kjeldahl determination of nitrogen: a critical study of digestion conditions-temperature, catalyst, and oxidizing agent. *Aust. J. Chem.* 55–70.
- Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y., Neale, C.M.U., Ray, C., Yang, H.S., 2020. Water productivity benchmarks: The case of maize and soybean in Nebraska. *Agric. Water Manag.* 234, 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106122>
- Mercau, J.L., Dardanelli, J.L., Collino, D.J., Andriani, J.M., Irigoyen, a., Satorre, E.H., 2007. Predicting on-farm soybean yields in the pampas using CROPGRO-soybean. *F. Crop. Res.* 100, 200–209. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.07.006>
- Mercau, J.L., Nasetto, M.D., Bert, F., Giménez, R., Jobbágy, E.G., 2016. Shallow groundwater dynamics in the Pampas: Climate, landscape and crop choice effects. *Agric. Water Manag.* 163, 159–168. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.09.013>
- Miguez, F.E., Bollero, G.A., 2005. Review of corn yield response under winter cover cropping systems using meta-analytic methods. *Crop Sci.* 45, 2318–2329. <https://doi.org/10.2135/cropsci2005.0014>
- Monfreda, C., Ramankutty, N., Foley, J.A., 2008. Farming the planet: 2. Geographic distribution of crop areas, yields, physiological types, and net primary production in the year 2000. *Global Biogeochem. Cycles* 22, 1–19. <https://doi.org/10.1029/2007GB002947>
- Monjardino, M., Hochman, Z., Horan, H., 2019. Yield potential determines Australian wheat growers' capacity to close yield gaps while mitigating economic risk. *Agron. Sustain. Dev.* 39. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0595-x>
- Monzon, J.P., Calviño, P.A., Sadras, V.O., Zubiaurre, J.B., Andrade, F.H., 2018. Precision agriculture based on crop physiological principles improves whole-farm yield and profit: A case study. *Eur. J. Agron.* 99, 62–71. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.06.011>
- Monzon, J.P., Mercau, J.L., Andrade, J.F., Caviglia, O.P., Cerrudo, A.G., Cirilo, A.G., Vega, C.R.C., Andrade, F.H., Calviño, P.A., 2014. Maize–soybean intensification alternatives for the Pampas. *F. Crop. Res.* 162, 48–59. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.03.012>
- Monzon, J.P., Sadras, V.O., Abbate, P.A., Caviglia, O.P., 2007. Modelling management strategies for wheat-soybean double crops in the south-eastern Pampas. *F. Crop. Res.* 101, 44–52. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.09.007>
- Moscatelli, G. 1990. Atlas de suelos de la República Argentina: escala 1: 500.000 y 1: 1.000. 000. INTA-Centro de Investigaciones de Recursos Naturales.
- Mourtzinis, S., Conley, S.P., 2017. Delineating soybean maturity groups across the United States. *Agron. J.* 109, 1397–1403. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.10.0581>
- Mourtzinis, S., Gaspar, A.P., Naeve, S.L., Conley, S.P., 2017a. Planting Date, Maturity, and Temperature Effects on Soybean Seed Yield and Composition. *Agron. J.* 109, 2040–2049. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.05.0247>
- Mourtzinis, S., Grassini, P., Edreira, J.I.R., Andrade, J.F., Kyveryga, P.M., Conley, S.P., 2020. Assessing approaches for stratifying producer fields based on biophysical attributes for regional yield-gap analysis. *F. Crop. Res.* 254, 107825. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107825>
- Mourtzinis, S., Kaur, G., Orłowski, J.M., Shapiro, C.A., Lee, C.D., Wortmann, C., Holshouser, D., Nafziger, E.D., Kandel, H., Niekamp, J., Ross, W.J., Lofton, J., Vonk, J., Roozeboom, K.L., Thelen, K.D., Lindsey, L.E., Staton, M., Naeve, S.L., Casteel, S.N., Wiebold, W.J., Conley, S.P., 2018a. Soybean response to nitrogen application across the United States: A synthesis-analysis. *F. Crop. Res.* 215, 74–82. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.09.035>
- Mourtzinis, S., Krupke, C.H., Esker, P.D., Varenhorst, A., Arneson, N.J., Bradley, C.A., Byrne, A.M., Chilvers, M.I., Giesler, L.J., Herbert, A., Kandel, Y.R., Kazula, M.J., Hunt, C., Lindsey, L.E., Malone, S., Mueller, D.S., Naeve, S., Nafziger, E., Reisig, D.D., Ross, W.J., Rossman, D.R., Taylor, S., Conley, S.P., 2019a. Neonicotinoid seed treatments of soybean provide negligible benefits to US farmers. *Sci. Rep.* 9, 1–7. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47442-8>
- Mourtzinis, S., Marburger, D., Gaska, J., Diallo, T., Lauer, J.G., Conley, S., 2017b. Corn, Soybean, and Wheat Yield Response to Crop Rotation, Nitrogen Rates, and Foliar Fungicide Application. *Crop Sci.* 57, 983–992. <https://doi.org/10.2135/cropsci2016.10.0876>
- Mourtzinis, S., Marburger, D.A., Gaska, J.M., Conley, S.P., 2016. Characterizing Soybean Yield and Quality Response to Multiple Prophylactic Inputs and Synergies. *Agron. J.* 108, 1337–1345. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.01.0023>
- Mourtzinis, S., Rattalino Edreira, J.I., Grassini, P., Roth, A.C., Casteel, S.N., Ciampitti, I.A., Kandel, H.J., Kyveryga, P.M., Licht, M.A., Lindsey, L.E., Mueller, D.S., Nafziger, E.D., Naeve, S.L., Stanley, J., Staton, M.J., Conley, S.P., 2018b. Sifting and winnowing: Analysis of farmer field data for soybean in the US North-Central region. *F. Crop. Res.* 221, 130–141. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.02.024>
- Mourtzinis, S., Specht, J.E., Conley, S.P., 2019b. Defining Optimal Soybean Sowing Dates across the US. *Sci. Rep.* 9, 1–7. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-38971-3>

- Mucherino, A., Papajorgji, P., Pardalos, P.M., 2009. A survey of data mining techniques applied to agriculture. *Oper. Res.* 9, 121–140. <https://doi.org/10.1007/s12351-009-0054-6>
- Mueller, N.D., Gerber, J.S., Johnston, M., Ray, D.K., Ramankutty, N., Foley, J. a., 2012. Closing yield gaps through nutrient and water management. *Nature* 490, 254–257. <https://doi.org/10.1038/nature11420>
- Munaro, L.B., Hefley, T.J., DeWolf, E., Haley, S., Fritz, A.K., Zhang, G., Haag, L.A., Schlegel, A.J., Edwards, J.T., Marburger, D., Alderman, P., Jones-Diamond, S.M., Johnson, J., Lingenfelter, J.E., Unêda-Trevisoli, S.H., Lollato, R.P., 2020. Exploring long-term variety performance trials to improve environment-specific genotype × management recommendations: A case-study for winter wheat. *F. Crop. Res.* 255, 107848. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107848>
- Neumann, K., Verburg, P.H., Stehfest, E., Müller, C., 2010. The yield gap of global grain production: A spatial analysis. *Agric. Syst.* 103, 316–326. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2010.02.004>
- Ng, S.J., Lindsey, L.E., Michel, A.P., Dorrance, A.E., 2018. Effect of mid-season foliar fungicide and foliar insecticide applied alone and in combination on soybean yield. *Crop. Forage Turfgrass Manag.* 3, 1–6. <https://doi.org/10.2134/cs2018.51.0402>
- 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. *Agric. For. Meteorol.* 290, 108038. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108038>
- Nosetto, M.D., Jobbágy, E.G., Brizuela, A.B., Jackson, R.B., 2012. The hydrologic consequences of land cover change in central Argentina. *Agric. Ecosyst. Environ.* 154, 2–11. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.01.008>
- Nosetto, M.D., Paez, R.A., Ballesteros, S.I., Jobbágy, E.G., 2015. Higher water-table levels and flooding risk under grain vs. livestock production systems in the subhumid plains of the Pampas. *Agric. Ecosyst. Environ.* 206, 60–70. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.03.009>
- Orlowski, J.M., Haverkamp, B.J., Laurenz, R.G., Marburger, D.A., Wilson, E.W., Casteel, S.N., Conley, S.P., Naeve, S.L., Nafziger, E.D., Roozeboom, K.L., Ross, W.J., Thelen, K.D., Lee, C.D., 2016. High-Input Management Systems Effect on Soybean Seed Yield, Yield Components, and Economic Break-Even Probabilities. *Crop Sci.* 56, 1988–2004. <https://doi.org/10.2135/cropsci2015.10.0620>
- Ortez, O.A., Salvaggiotti, F., Enrico, J.M., Prasad, P.V. V., Armstrong, P., Ciampitti, I.A., 2018. Exploring Nitrogen Limitation for Historical and Modern Soybean Genotypes. *Agron. J.* 110, 2080–2090. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.04.0271>
- Passioura, J., 2006. Increasing crop productivity when water is scarce—from breeding to field management. *Agric. Water Manag.* 80, 176–196. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.012>
- Passioura, J.B., 1996. Drought and drought tolerance. *Plant Growth Regul.* 20, 79–83. <https://doi.org/10.1007/BF00024003>
- Pasquin, J.M., Pampolino, M.F., Witt, C., Dobermann, A., Oberthür, T., Fisher, M.J., Inubushi, K., 2014. Closing yield gaps in maize production in Southeast Asia through site-specific nutrient management. *F. Crop. Res.* 156, 219–230. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.11.016>
- Patrignani, A., Lollato, R.P., Ochsner, T.E., Godsey, C.B., Edwards, J.T., 2014. Yield gap and production gap of rainfed winter wheat in the Southern great plains. *Agron. J.* 106, 1329–1339. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0011>
- Pebesma, E.J., 2004. Multivariable geostatistics in S: the gstat package. *Comput. Geosci.* 30, 683–691.
- Peltzer, H.F., 2011. Modelo de simulación de fenología de soja (SI.FE.SOJA) una herramienta útil para evitar el estrés hídrico durante el periodo crítico, in: *Mercosoja*. Rosario, Argentina, p. 1247.
- Peltzer, H.F., Peltzer, N.G., 2013. Modelo de simulación de fenología de soja (SI.FE.SOJA): una herramienta útil para evitar el estrés hídrico durante el periodo crítico. *Congr. Argentino AgroInformática* 155–160.
- Penalba, O., Bettolli, M., Vargas, W., 2007. The impact of climate variability on soybean yields in Argentina. *Multivariate regression. Meteorol. Appl.* 114, 103–114. <https://doi.org/10.1002/met>
- Penning de Vries, F.W.T., Rabbinge, R., Groot, J.J.R., 1997. Potential and attainable food production and food security in different regions. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 352, 917–928. <https://doi.org/10.1098/rstb.1997.0071>
- Peralta, N., Ingrassia, H., Di Mateo, J., M., F.J., 2018. Herramientas de información digital : clave para mejorar la caracterización y el proceso de posicionamiento de los híbridos de maíz, in: *Seamaíz: Integrando Ciencia, Producción, Ambiente y Comunidad*. Pergamino.
- Perroux, K.M., White, I., 1988. Designs for disc permeameters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52, 1205–1215.
- Ploschuk, R.A., Miralles, D.J., Colmer, T.D., Striker, G.G., 2020. Waterlogging differentially affects yield and its components in wheat, barley, rapeseed and field pea depending on the timing of occurrence. *J. Agron. Crop Sci.* 206, 363–375. <https://doi.org/10.1111/jac.12396>
- Podestá, G.P., Messina, C.D., Grondona, M.O., Magrin, G.O., 1999. Associations between Grain Crop Yields in Central-Eastern Argentina and El Niño–Southern Oscillation. *J. Appl. Meteorol.* 38, 1488–1498. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1999\)038<1488:ABGCYI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1999)038<1488:ABGCYI>2.0.CO;2)
- Pugh, T.A.M., Müller, C., Elliott, J., Deryng, D., Folberth, C., Olin, S., Schmid, E., Arneth, A., 2016. Climate analogues suggest limited potential for intensification of production on current croplands under climate change. *Nat. Commun.* 7, 1–8. <https://doi.org/10.1038/ncomms12608>
- Purcell, L.C., Van Roekel, R.J., 2019. Simulating Soybean Yield Potential under Optimum Management. *Agrosystems, Geosci. Environ.* 2, 1–7. <https://doi.org/10.2134/age2019.04.0029>
- Rabbinge, R., 1992. The ecological background of food production, in: Marsh, D.J.C. and J. (Ed.), *Crop Protection and Sustainable Agriculture*. John Wiley, UK, Chichester, pp. 2–29.

- Rattalino Edreira, J.I., Cassman, K.G., Hochman, Z., van Ittersum, M.K., van Bussel, L.G.J., Claessens, L., Grassini, P., 2018a. Beyond the plot: Technology extrapolation domains for scaling out agronomic science. *Environ. Res. Lett.* 13, 054027. <https://doi.org/10.1088/1748>
- Rattalino Edreira, J.I., Guilpart, N., Sadras, V., Cassman, K.G., van Ittersum, M.K., Schils, R.L.M., Grassini, P., 2018b. Water productivity of rainfed maize and wheat: A local to global perspective. *Agric. For. Meteorol.* 259, 364–373. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.05.019>
- Rattalino Edreira, J.I., Mourtzinis, S., Azzari, G., Andrade, J.F., Conley, S.P., Lobell, D., Specht, J.E., Grassini, P., 2020a. From sunlight to seed: Assessing limits to solar radiation capture and conversion in agro-ecosystems. *Agric. For. Meteorol.* 280, 107775. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107775>
- Rattalino Edreira, J.I., Mourtzinis, S., Azzari, G., Andrade, J.F., Conley, S.P., Specht, J.E., Grassini, P., 2020b. Combining field-level data and remote sensing to understand impact of management practices on producer yields. *F. Crop. Res.* 257, 107932. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107932>
- Rattalino Edreira, J.I., Mourtzinis, S., Conley, S.P., Roth, A.C., Ciampitti, I.A., Licht, M.A., Kandel, H., Kyveryga, P.M., Lindsey, L.E., Mueller, D.S., Naeve, S.L., Nafziger, E., Specht, J.E., Stanley, J., Staton, M.J., Grassini, P., 2017. Assessing causes of yield gaps in agricultural areas with diversity in climate and soils. *Agric. For. Meteorol.* 247, 170–180. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.07.010>
- Ray, D.K., Ramankutty, N., Mueller, N.D., West, P.C., Foley, J. a, 2012. Recent patterns of crop yield growth and stagnation. *Nat. Commun.* 3, 1293. <https://doi.org/10.1038/ncomms2296>
- Reed, J.F., Cummings, R.W., 1945. Soil reaction—glass electrode and colorimetric methods for determining pH values of soils. *Soil Sci.* 59, 97–105.
- Reicosky, D.C., Warnes, D.D., Evans, S.D., 1985. Soybean evapotranspiration, leaf water potential and foliage temperature as affected by row spacing and irrigation. *F. Crop. Res.* 10, 37–48. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(85\)90004-8](https://doi.org/10.1016/0378-4290(85)90004-8)
- Reynolds, M., Bonnett, D., Chapman, S.C., Furbank, R.T., Manés, Y., Mather, D.E., Parry, M.A.J., 2011. Raising yield potential of wheat. I. Overview of a consortium approach and breeding strategies. *J. Exp. Bot.* 62, 439–452. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq311>
- Rhine, M.D., Stevens, G., Shannon, G., Wrather, A., Sleper, D., 2010. Yield and nutritional responses to waterlogging of soybean cultivars. *Irrig. Sci.* 28, 135–142. <https://doi.org/10.1007/s00271-009-0168-x>
- Ribichich, K.F., Chiozza, M., Ávalos-Britez, S., Cabello, J. V., Arce, A.L., Watson, G., Arias, C., Portapila, M., Trucco, F., Otegui, M.E., Chan, R.L., 2020. Successful field performance in dry-warm environments of soybean expressing the sunflower transcription factor HaHB4. *J. Exp. Bot.* 11, 178. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa064>
- Riglos, M., Mercau, J., Mayer, L., Haro, R., Severina, I., Cirilo, A., Otegui, M.E., 2019. Eficiencia en el uso de agua del cultivo de soja a traves de ambientes con productividad contrastante en Argentina. Rosario, Argentina.
- Rizzo, G., Edreira, J.I.R., Archontoulis, S. V., Yang, H.S., Grassini, P., 2018. Do shallow water tables contribute to high and stable maize yields in the US Corn Belt? *Glob. Food Sec.* 18, 27–34. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2018.07.002>
- Ropelewski, C.F., Halpert, M.S., 1996. Quantifying Southern Oscillation - Precipitation relationships. *J. Clim.* [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1996\)009<1043:QSOPR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1996)009<1043:QSOPR>2.0.CO;2)
- Rotili, H., de Voil, P., Eyre, J., Sera, L., Aisthorpe, D., Maddonni, G., Rodríguez, D., 2020. Untangling genotype x management interactions in multi-environment on- farm experimentation. *F. Crop. Res.* 255, 107900. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107900>
- Rotundo, J.L., Borrás, L., de Bruin, J.D., Pedersen, P., 2014. Soybean nitrogen uptake and utilization in Argentina and united states cultivars. *Crop Sci.* 54, 1153–1165. <https://doi.org/10.2135/cropsci2013.09.0618>
- Rotundo, J.L., Miller-Garvin, J.E., Naeve, S.L., 2016. Regional and temporal variation in soybean seed protein and oil across the United States. *Crop Sci.* 56, 797–808. <https://doi.org/10.2135/cropsci2015.06.0394>
- Rotundo, J.L., Westgate, M.E., 2009. Meta-analysis of environmental effects on soybean seed composition. *F. Crop. Res.* 110, 147–156. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.07.012>
- Ruffo, M.L., Gentry, L.F., Henninger, A.S., Seebauer, J.R., Below, F.E., 2015. Evaluating Management Factor Contributions to Reduce Corn Yield Gaps. *Agron. J.* 107, 495–505. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0355>
- Sadras, V.O., Cassman, K.G.G., Grassini, P., Hall, A.J., Bastiaanssen, W.G.M., Laborte, A.G., Milne, A.E., Sileshi, G., Steduto, P., 2015. Yield gap analysis of field crops Methods and case studies.
- Sainz Rozas, H., Eyherabide, M., Echeverría, H.E., Barbieri, P., Angelini, H., Larrea, G.E., Ferraris, G.N., Barraco, M., 2013. ¿Cuál es el estado de la fertilidad de los suelos argentinos? *Simp. Fertil.* 2013, 62–72.
- Salvagiotti, F., Cassman, K.G., Specht, J.E., Walters, D.T., Weiss, A., Dobermann, A., 2008. Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review. *F. Crop. Res.* 108, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.03.001>
- Sambatti, J.B.M., Caylor, K.K., 2007. When is breeding for drought tolerance optimal if drought is random? *New Phytol.* 175, 70–80. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02067.x>
- Santachiara, G., Borrás, L., Rotundo, J.L., 2017a. Physiological Processes Leading to Similar Yield in Contrasting Soybean Maturity Groups. *Agron. J.* 109, 158–167. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.04.0198>
- Santachiara, G., Borrás, L., Salvagiotti, F., Gerde, J.A., Rotundo, J.L., 2017b. Relative importance of biological nitrogen fixation and mineral

- uptake in high yielding soybean cultivars. *Plant Soil* 418, 191–203. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3279-9>
- Santachiara, G., Salvaggiotti, F., Rotundo, J.L., 2019. Nutritional and environmental effects on biological nitrogen fixation in soybean: A meta-analysis. *F. Crop. Res.* 240, 106–115. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.05.006>
- Satorre, E.H., 2011. Recent changes in pampean agriculture: Possible new avenues in coping with global change challenges, in: Slafer, G.A., Araus, J.L. (Eds.), *Crop Stress Management and Global Climate Change*. CABI Series, pp. 47–57.
- Schils, R., Olesen, J.E., Kersebaum, K.-C., Rijk, B., Oberforster, M., Kalyada, V., Khitrykau, M., Gobin, A., Kirchev, H., Manolova, V., Manolov, I., Trnka, M., Hlavinka, P., Paluoso, T., Peltonen-Sainio, P., Jauhainen, L., Lorgeou, J., Marrou, H., Danalatos, N., Archontoulis, S., Fodor, N., Spink, J., Roggero, P.P., Bassu, S., Pulina, A., Seehusen, T., Uhlen, A.K., Żyłowska, K., Nieróbca, A., Kozyra, J., Silva, J.V., Maças, B.M., Coutinho, J., Ion, V., Takáč, J., Mínguez, M.I., Eckersten, H., Levy, L., Herrera, J.M., Hiltbrunner, J., Kryvobok, O., Kryvoshein, O., Sylvester-Bradley, R., Kindred, D., Topp, C.F.E., Boogaard, H., de Groot, H., Lesschen, J.P., van Bussel, L., Wolf, J., Zijlstra, M., van Loon, M.P., van Ittersum, M.K., 2018. Cereal yield gaps across Europe. *Eur. J. Agron.* 101, 109–120. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.09.003>
- Schulthess, U., Timsina, J., Herrera, J.M., McDonald, A., 2013. Mapping field-scale yield gaps for maize: An example from Bangladesh. *F. Crop. Res.* 143, 151–156. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.11.004>
- Scott, H.D., DeAngulo, J., Daniels, M.B., Wood, L.S., 1989. Flood Duration Effects on Soybean Growth and Yield. *Agron. J.* 81, 631–636. <https://doi.org/10.2134/agronj1989.00021962008100040016x>
- Seidel, E.P., Egewarth, W.A., Piano, J.T., Egewarth, J., 2015. Effect of foliar application rates of Calcium and Boron on yield and yield attributes of soybean (*Glycine max*). *African J. Agric. Res.* 10, 170–173. <https://doi.org/10.5897/AJAR2014.9046>
- Seifert, C.A., Roberts, M.J., Lobell, D.B., 2017. Continuous Corn and Soybean Yield Penalties across Hundreds of Thousands of Fields. *Agron. J.* 109, 541–548. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.03.0134>
- Sentelhas, P.C., Battisti, R., Câmara, G.M.S., Farias, J.R.B., Hampf, a C., 2015. The soybean yield gap in Brazil – magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. *J. Agric. Sci.* 65, 1–18. <https://doi.org/10.1017/S0021859615000313>
- Sistema Integrado de Información Agropecuaria. (2021). Siembra, Cosecha, Producción y Rendimiento database. <https://www.magyp.gob.ar/datosabiertos/> (accedido 10 Mayo 2021).
- Silva, J.V., Tenreiro, T.R., Spätjens, L., Anten, N.P.R., van Ittersum, M.K., Reidsma, P., 2020. Can big data explain yield variability and water productivity in intensive cropping systems? *F. Crop. Res.* 255, 107828. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107828>
- Sinclair, T., Purcell, L.C., King, C.A., Sneller, C.H., Chen, P., Vadez, V., 2007. Drought tolerance and yield increase of soybean resulting from improved symbiotic N₂ fixation. *F. Crop. Res.* 101, 68–71. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.09.010>
- Sinclair, T.R., Cassman, K.G., 2004. Agronomic UFOs. *F. Crop. Res.* 88, 9–10. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.01.001>
- Sinclair, T.R., Horie, T., 1989. Leaf Nitrogen, Photosynthesis, and Crop Radiation Use Efficiency: A Review. *Crop Sci.* 29, 90. <https://doi.org/10.2135/cropsci1989.0011183X002900010023x>
- Sinclair, T.R., Salado-Navarro, L., Morandi, E.N., Bodrero, M.L., Martignone, R.A., 1992. Soybean yield in Argentina in response to weather variation among cropping seasons. *F. Crop. Res.* 30, 1–11. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(92\)90052-B](https://doi.org/10.1016/0378-4290(92)90052-B)
- Sinclair, T.R., Salado-Navarro, L.R., Salas, G., Purcell, L.C., 2007. Soybean yields and soil water status in Argentina: Simulation analysis. *Agric. Syst.* 94, 471–477. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2006.11.016>
- Slattery, R.A., Ainsworth, E.A., Ort, D.R., 2013. A meta-analysis of responses of canopy photosynthetic conversion efficiency to environmental factors reveals major causes of yield gap. *J. Exp. Bot.* 64, 3723–3733. <https://doi.org/10.1093/jxb/ert207>
- Smidt, E.R., Conley, S.P., Zhu, J., Arriaga, F.J., 2016. Identifying field attributes that predict soybean yield using random forest analysis. *Agron. J.* 108, 637–646. <https://doi.org/10.2134/agronj2015.0222>
- Steinbuch, L., Brus, D.J., van Bussel, L.G.J., Heuvelink, G.B.M., 2016. Geostatistical interpolation and aggregation of crop growth model outputs. *Eur. J. Agron.* 77, 111–121. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.03.007>
- Sucunza, F.A., Gutierrez, F.H., Garcia, F.O., Boxler, M., Rubio, G., 2018. Long-term phosphorus fertilization of wheat, soybean and maize on Mollisols: Soil test trends, critical levels and balances. *Eur. J. Agron.* 96, 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.03.004>
- Sumner, M.E., Miller, W.P., 1996. Cation exchange capacity and exchange coefficients. *Methods Soil Anal. Part 3 Chem. Methods* 5, 1201–1229.
- Tanaka, A., Diagne, M., Saito, K., 2015. Causes of yield stagnation in irrigated lowland rice systems in the Senegal River Valley: Application of dichotomous decision tree analysis. *F. Crop. Res.* 176, 99–107. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.02.020>
- Thilakarathna, M.S., Raizada, M.N., 2017. A meta-analysis of the effectiveness of diverse rhizobia inoculants on soybean traits under field conditions. *Soil Biol. Biochem.* 105, 177–196. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.11.022>
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., Belfort, B.L., 2011. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proc. Natl Acad. Sci.* 108, 20260. <https://doi.org/10.1073/pnas.1116437108>
- Tilman, D., Clark, M., 2014. Global diets link environmental sustainability and human health. *Nature* 515, 518–522. <https://doi.org/10.1038/nature13959>
- Tittonell, P., Giller, K.E., 2013. When yield gaps are poverty traps: The paradigm of ecological intensification in African smallholder agriculture.

- F. Crop. Res. 143, 76–90. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.10.007>
- Tittonell, P., Shepherd, K.D., Vanlauwe, B., Giller, K.E., 2008. Unravelling the effects of soil and crop management on maize productivity in smallholder agricultural systems of western Kenya-An application of classification and regression tree analysis. *Agric. Ecosyst. Environ.* 123, 137–150. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2007.05.005>
- Tseng, M., Roel, A., Deambrosi, E., Terra, J.A., Zorrilla, G., Riccetto, S., Pittelkow, C.M., 2020. Towards actionable research frameworks for sustainable intensification in high-yielding rice systems. *Sci. Rep.* 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63251-w>
- USDA, 1975. *Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys.*
- 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. *F. Crop. Res.* 177, 98–108. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.03.005>
- Van Dijk, M., Morley, T., Jongeneel, R., Van Ittersum, M.K., Reidsma, P., Ruben, R., 2016. Disentangling agronomic and economic yield gaps: An integrated framework and application. *Agric. Syst.* 154, 90–99. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.03.004>
- van Dijk, M. van, Meijerink, G.W., Rau, M. L., Shutes, K., 2012. Mapping maize yield gaps in Africa Mapping maize yield gaps in Africa. Wageningen, Netherlands.
- Van Ittersum, M.K., Cassman, K.G., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P., Hochman, Z., 2013. Yield gap analysis with local to global relevance-A review. *F. Crop. Res.* 143, 4–17. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>
- Van Ittersum, M.K., Rabbinge, R., 1997. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *F. Crop. Res.* 52, 197–208. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(97\)00037-3](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00037-3)
- van Loon, M.P., Adjei-Nsiah, S., Descheemaeker, K., Akotsen-Mensah, C., van Dijk, M., Morley, T., van Ittersum, M.K., Reidsma, P., 2019. Can yield variability be explained? Integrated assessment of maize yield gaps across smallholders in Ghana. *F. Crop. Res.* 236, 132–144. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.03.022>
- van Oort, P.A.J., Saito, K., Dieng, I., Grassini, P., Cassman, K.G., van Ittersum, M.K., 2017. Can yield gap analysis be used to inform R&D prioritisation? *Glob. Food Sec.* 12, 109–118. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2016.09.005>
- Van Rees, H., McClelland, T., Hochman, Z., Carberry, P., Hunt, J., Huth, N., Holzworth, D., 2014. Leading farmers in South East Australia have closed the exploitable wheat yield gap: Prospects for further improvement. *F. Crop. Res.* 164, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.04.018>
- Van Roekel, R.J., Purcell, L.C., 2014. Soybean Biomass and Nitrogen Accumulation Rates and Radiation Use Efficiency in a Maximum Yield Environment. *Crop Sci.* 54, 1189. <https://doi.org/10.2135/cropsci2013.08.0546>
- Van Roekel, R.J., Purcell, L.C., Salmerón, M., 2015. Physiological and management factors contributing to soybean potential yield. *F. Crop. Res.* 3, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.05.018>
- van Wart, J., Kersebaum, K.C., Peng, S., Milner, M., Cassman, K.G., 2013. Estimating crop yield potential at regional to national scales. *F. Crop. Res.* 143, 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.11.018>
- Van Wart, J., van Bussel, L.G.J., Wolf, J., Licker, R., Grassini, P., Nelson, A., Boogaard, H., Gerber, J., Mueller, N.D., Claessens, L., van Ittersum, M.K., Cassman, K.G., 2013. Use of agro-climatic zones to upscale simulated crop yield potential. *F. Crop. Res.* 143, 44–55. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.11.023>
- Verón, S.R., de Abelleira, D., Lobell, D.B., 2015. Impacts of precipitation and temperature on crop yields in the Pampas. *Clim. Change* 130, 235–245. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1350-1>
- Viglizzo, E.F., Frank, F.C., Carreño, L. V., Jobbágy, E.G., Pereyra, H., Clatt, J., Pincén, D., Ricard, M.F., 2011. Ecological and environmental footprint of 50 years of agricultural expansion in Argentina. *Glob. Chang. Biol.* 17, 959–973. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02293.x>
- Villamil, M.B., Davis, V.M., Nafziger, E.D., 2012. Estimating factor contributions to soybean yield from farm field data. *Agron. J.* 104, 881–887. <https://doi.org/10.2134/agronj2012.0018n>
- Vitantonio-Mazzini, L.N., Borrás, L., Garibaldi, L.A., Pérez, D.H., Gallo, S., Gambin, B.L., 2020. Management options for reducing maize yield gaps in contrasting sowing dates. *F. Crop. Res.* 251, 107779. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107779>
- Vitantonio-Mazzini, L. N., Gómez, D., Gambin, B. L., Di Mauro, G., Iglesias, R., Costanzi, J., ... & Borrás, L. 2021. Sowing date, genotype choice, and water environment control soybean yields in central Argentina. *Crop Science*, 61, 715-728.
- Walkley, A., Black, I.A., 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid in soil analysis. 1. Experimental. *Soil Sci* 79, 459–465.
- Wegerer, R., Popp, M., Hu, X., Purcell, L., 2015. Soybean maturity group selection : Irrigation and nitrogen fixation effects on returns 180, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.05.002>
- Wheeler, T., vom Braum, J., 2013. Climate Change Impacts on Global Food Security. *Science* (80-.). 341, 508.
- White, J.W., Hoogenboom, G., Wilkens, P.W., Stackhouse, P.W., Hoel, J.M., 2011. Evaluation of satellite-based, modeled-derived daily solar radiation data for the continental United States. *Agron. J.* 103, 1242–1251. <https://doi.org/10.2134/agronj2011.0038>
- Woittiez, L.S., van Wijk, M.T., Slingerland, M., van Noordwijk, M., Giller, K.E., 2017. Yield gaps in oil palm: A quantitative review of

- contributing factors. *Eur. J. Agron.* 83, 57–77. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.11.002>
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., Bogaardt, M.J., 2017. Big Data in Smart Farming – A review. *Agric. Syst.* 153, 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2017.01.023>
- Zanon, A.J., Streck, N.A., Grassini, P., 2016. Climate and Management Factors Influence Soybean Yield Potential in a Subtropical Environment. *Agron. J.* 108, 1447–1454. <https://doi.org/10.2134/agronj2015.0535>
- Zhang, B., Feng, G., Kong, X., Lal, R., Ouyang, Y., Adeli, A., Jenkins, J.N., 2016. Simulating yield potential by irrigation and yield gap of rainfed soybean using APEX model in a humid region. *Agric. Water Manag.* 177, 440–453. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.08.029>
- Zhang, Z., Cong, R. huan, Ren, T., Li, H., Zhu, Y., Lu, J.W., 2020. Optimizing agronomic practices for closing rapeseed yield gaps under intensive cropping systems in China. *J. Integr. Agric.* 19, 1241–1249. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62748-6](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62748-6)
- Zheng, H., Chen, L., Han, X., Zhao, X., Ma, Y., 2009. Classification and regression tree (CART) for analysis of soybean yield variability among fields in Northeast China: The importance of phosphorus application rates under drought conditions. *Agric. Ecosyst. Environ.* 132, 98–105. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.03.004>

VI. ANEXO

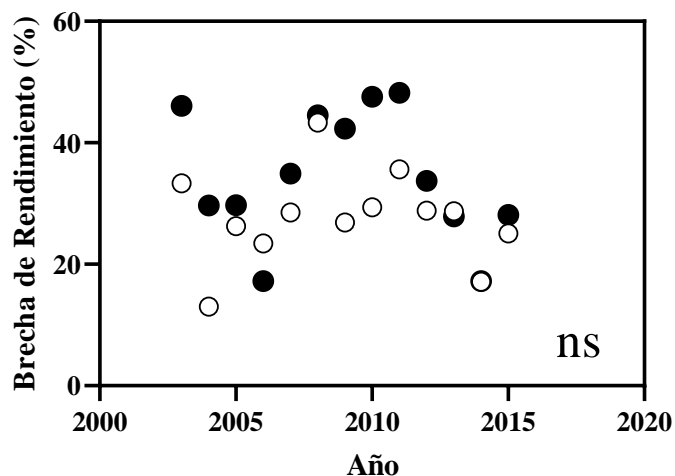


Fig. 6.1. Evolución de las brechas de rendimiento (%) para el cultivo de soja de primera (círculos vacíos) y de segunda (círculos llenos) para productores de la región Central Argentina para el período entre 2003-2015 evaluados en el Capítulo II. ns, no significativo.

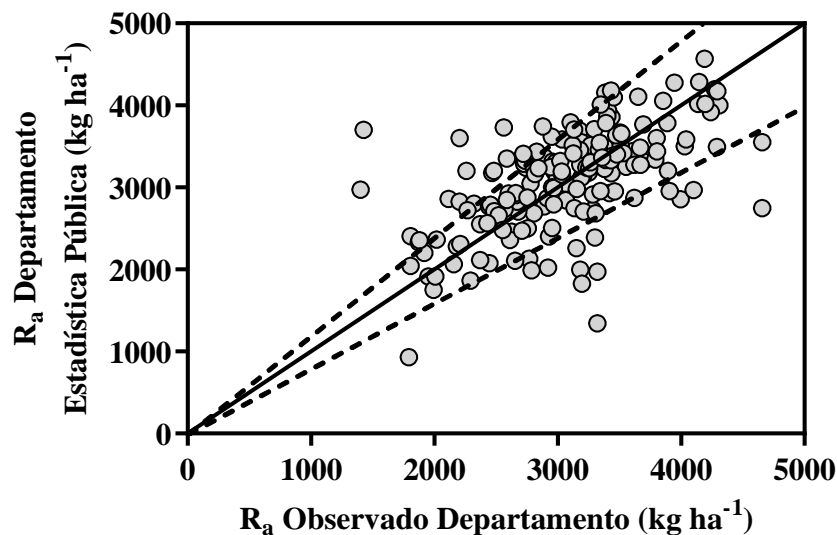


Fig. 6.2. Comparación del rendimiento promedio actual de soja de primera y segunda a escala de departamento obtenido de la base de datos de agricultores bajo análisis en el Capítulo II (R_a Observado Departamento) y el promedio del rendimiento actual informado por agencias públicas de Argentina (R_a Departamento Estadística Pública). El R_a promedio reportado por estadísticas públicas derivó del Ministerio de Agricultura de Argentina (www.siiia.gov.ar). La línea continua representa $y = x$, y las líneas discontinuas representan $y = x \pm 20\%$.

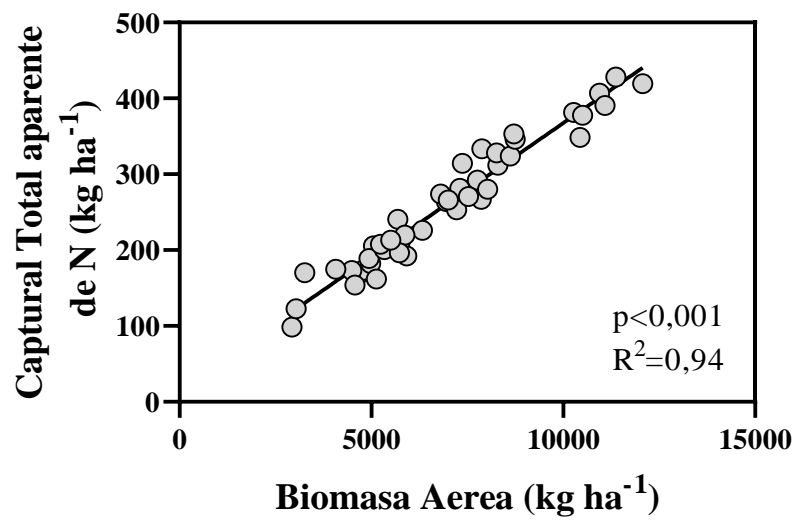


Fig. 6.3. Captura total aparente de N (kg ha⁻¹) en función de la biomasa aérea en madurez comercial (kg ha⁻¹) para diferentes estrategias de manejo evaluadas bajo condiciones contrastantes de disponibilidad hídrica durante dos años en experimentos manipulativos del Capítulo IV.

Tabla 6.1. Coeficiente de regresión (R^2), error medio cuadrático residual (RSME) y Criterio de información de Akaike (AIC) de árboles de regresión para explorar la variabilidad de la brecha de rendimiento de la soja como cultivo de primera o segunda.

Tipo de Cultivo	División	Variable	R^2	RSME	AIC	ΔR^2	Δ RSME	Δ AIC
Soja de primera	0		0,000	20,9	138438			
	1	Fecha de Siembra	0,098	19,9	136828	0,098	-1,1	-1610
	2	Tipo de suelo	0,134	19,5	136201	0,036	-0,4	-627
	3	Precipitaciones Diciembre	0,150	19,3	135921	0,016	-0,2	-280
	4	Fecha de Siembra	0,170	19,1	135556	0,020	-0,2	-365
	5	Cultivo antecesor	0,181	18,9	135349	0,011	-0,1	-207
	6	Temperatura Noviembre	0,186	18,9	135250	0,005	-0,1	-99
	7	Tipo de suelo	0,195	18,8	137077	0,009	-0,1	1827
	8	Zn fertilización	0,203	18,7	134919	0,008	-0,1	-2158
	9	Grupo de Madurez	0,212	18,6	134762	0,009	-0,1	-157
	10	Precipitaciones Octubre	0,217	18,2	134653	0,005	-0,4	-109
	11	Temperatura Noviembre	0,222	18,4	134556	0,005	0,2	-97
	12	Fecha de Siembra	0,228	18,4	134441	0,006	-0,1	-115
	13	Uso de fungicidas	0,234	18,3	134332	0,006	-0,1	-109
	14	Precipitaciones Marzo	0,238	18,3	134243	0,004	-0,1	-89
	15	Precipitaciones totales	0,243	18,9	134140	0,005	0,7	-103
	16	Fecha de Siembra	0,247	18,1	134068	0,004	-0,8	-72
	17	Cultivo antecesor	0,252	18,1	133967	0,005	-0,1	-101
	18	P dosis aplicada	0,254	18,1	133921	0,002	0,0	-46
	19	Longitud	0,256	18,0	133884	0,002	0,0	-37
20	Precipitaciones totales	0,258	18,0	133851	0,002	0,0	-33	
Soja de segunda	0		0,000	23,0	64181			
	1	Uso de fungicidas	0,159	22,0	64158	0,159	-1,0	-23
	2	Fecha de Siembra	0,196	21,5	63841	0,037	-0,5	-317
	3	P Fertilización	0,252	20,8	63332	0,056	-0,8	-509
	4	Longitud	0,265	20,6	63213	0,013	-0,2	-119
	5	Cultivo antecesor	0,275	20,4	63109	0,010	-0,2	-105
	6	Precipitaciones Diciembre	0,290	20,1	62968	0,015	-0,3	-141
	7	Cultivo antecesor	0,301	20,1	62854	0,011	-0,1	-114
	8	Fecha de Siembra	0,307	20,0	62803	0,006	-0,1	-51
	9	Fecha de Siembra	0,307	20,0	62796	0,000	0,0	-7

Tabla 6.2. Coeficientes genéticos calibrados con datos de experimentos bien manejados y utilizados para estimaciones de rendimiento potencial limitado en agua usando DSSAT v 4.6 (Jones et al., 2003). Las simulaciones del rendimiento potencial limitado por agua se hicieron con los tres ecotipos, y promediado sus resultados.

Rasgo [†] /Ecotipo	XL4811-DM 4800	UA4L01- DM 4800c	UA4L71- DM 4870c
CSDL (h)	12,83	13,00	13,00
PPSEN (d h ⁻¹)	0,30	0,29	0,29
EMG-FLW (PTD [‡])	19,80	19,00	20,00
FLW-PSD (PSD)	14,50	14,50	14,50
PSD-PHM (PTD)	36,00	39,00	35,00
WTPSD (g)	0,210	0,210	0,160
SDPDVR (semilla vaina ⁻¹)	2,20	2,20	2,20
PODDUR (PTD)	12,00	8,00	9,00
XFRUIT	0,80	1,00	1,00
THRESH	78,00	78,00	78,00
SDPRO	0,400	0,400	0,400
SDLIP	0,200	0,200	0,200

[†] CSDL: fotoperíodo crítico por debajo del cual el desarrollo reproductivo progresa sin efecto de la duración del día; PPSEN: pendiente de la respuesta relativa del desarrollo al fotoperíodo con el tiempo; EMG-FLW = tiempo entre la emergencia de la planta y la aparición de la primera flor (R₁); FLW-PSD: tiempo R₁ y la primera semilla (R₅); PSD-PHM: tiempo entre la primera semilla (R₅) y la madurez fisiológica (R₇); WTPSD: peso máximo por semilla; PODDUR: tiempo requerido para que el cultivar alcance la carga final de la vaina en condiciones óptimas; XFRUIT: fracción máxima de crecimiento diario que se divide en semilla + vainas; índice de cosecha: la proporción máxima de (semilla / (semilla + cáscara)) en la madurez hace que la semilla deje de crecer a medida que aumenta su peso seco hasta que las vainas se llenen en una cohorte; SDPRO: fracción de proteína en semillas; SDLIP: fracción de aceite en semillas,

[‡] Días fototermales.