

Intensificación de los sistemas de producción de granos en la Región Pampeana: productividad y uso de recursos

*Tesis presentada para optar al título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires,
Área Ciencias Agropecuarias*

José Francisco Andrade

Ingeniero Agrónomo - Universidad Nacional de Mar del Plata - 2010

Lugar de trabajo: IFEVA, Cátedra de Cerealicultura, Facultad de Agronomía,
Universidad de Buenos Aires, CONICET.



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires

COMITÉ CONSEJERO

Director de tesis

Emilio Horacio Satorre

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

Doctor of Philosophy (Universidad de Reading)

Co-director

Santiago Luis Poggio

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

Doctor en Ciencias Agropecuarias (Universidad de Buenos Aires)

Consejero de Estudios

Daniel Julio Miralles

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

Doctor en Ciencias Agropecuarias (Universidad de Buenos Aires)

JURADO DE TESIS

Director de tesis

Emilio Horacio Satorre

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

Doctor of Philosophy (Universidad de Reading)

JURADO

Antonio Juan Hall

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

Doctor of Philosophy (Universidad de Macquarie)

JURADO

Miguel Ángel Cantamutto

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional del Sur)

Doctor (Universidad de Lleida)

JURADO

Esteban Gabriel Jobbágy Gampel

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

Doctor of Philosophy (Universidad de Duke)

Fecha de defensa: 18 de marzo de 2016

AGRADECIMIENTOS

Quisiera dedicar unos párrafos para mencionar, en agradecimiento, a aquellas personas que me han ayudado a alcanzar este objetivo que me propuse algunos años atrás.

A mi Director, Emilio, por brindarme el tema de investigación y las herramientas necesarias para estudiarlo. Considero, además, que su capacidad analítica y su espíritu docente fueron factores determinantes del éxito de este proyecto y de mi formación profesional.

A mi Co-Director, Santiago, por su compromiso y ayuda brindada en la revisión de la presente tesis, y especialmente en los análisis efectuados en el Capítulo 5.

A mi Consejero de estudios, Daniel, por sus aportes en la revisión de la tesis.

A Matías Ermácora, por tomar este proyecto como propio y por la calidad de su trabajo de campo. A su grupo de trabajo, Lucas Ratto, Juan Pablo Cobuta y Ezequiel Gandino, quienes colaboraron con las tareas de campo.

A la mesa de asesores del grupo CREA Norte de Buenos Aires, por sus preguntas e inquietudes que originaron este proyecto; y por sus aportes críticos en el análisis de los resultados obtenidos.

A AACREA por proveer la base de datos de rendimientos utilizada en el Capítulo 2, y por financiar parcialmente el proyecto.

A CONICET por las becas otorgadas, que posibilitaron mi dedicación exclusiva a este proyecto doctoral.

A todos los profesionales que hicieron aportes a mi trabajo: Ignacio Alzueta, Fernando Andrade, Fernando Aramburu, Federico Bert, Luciana D'Acunto, Antonio Hall, Mariana López, Juan Pablo Monzon y Juan Ignacio Rattallino.

A Luis Mayer y Romina de San Celedonio por su siempre valiosa opinión.

A mis compañeros y amigos de las Cátedras de Cereales, Producción Vegetal y Cultivos Industriales, especialmente a aquellos con los que tuve la suerte de compartir oficina.

Por último quisiera agradecer a Magalí, a mis padres y a mis hermanos, soportes indispensables de mi vida.

DECLARACIÓN

“Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución.”

Ing. Agr. José Francisco Andrade

PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA TESIS

Andrade, J.F. y Satorre, E.H. 2015. Single and double crop systems in the Argentine Pampas: Environmental determinants of annual grain yield. *Field Crops Research*, 177: 137-147.

Andrade, J.F., Poggio, S.L., Ermácora, M. y Satorre, E.H. 2015. Productivity and resource use in intensified cropping systems in the Rolling Pampa, Argentina. *European Journal of Agronomy*, 67: 37-51.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE CUADROS.....	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xvii
ABREVIATURAS.....	xxiii
RESUMEN	xxv
ABSTRACT.....	xxvii
1 INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.1 Breve reseña histórica sobre los cambios en el uso de la tierra en la Región Pampeana.....	3
1.2 Características de la Región Pampeana, disponibilidad de recursos y su utilización a lo largo de la historia.....	7
1.3 Motivos para diseñar sistemas de cultivo alternativos	8
1.4 Implicancias de la inclusión de alternativas productivas	9
1.5 La comunidad de malezas como indicador del aprovechamiento de los recursos	10
1.6 Objetivos	11
1.6.1 Objetivos específicos	11
1.7 Hipótesis	12
1.8 Estructura de la tesis.....	12
2 CULTIVOS SIMPLES Y DOBLES EN LA REGIÓN PAMPEANA. EL CLIMA COMO FACTOR DETERMINANTE DE LOS RENDIMIENTOS.....	15
2.1 Introducción	16
2.2 Métodos.....	17
2.2.1 Región de estudio.....	17
2.2.2 Información climática	19
2.2.3 Análisis	20
2.3 Resultados	21
2.3.1 Efectos ambientales sobre los rendimientos de los cultivos	21
2.3.2 Análisis comparado de los sistemas de cultivo	27
2.3.3 Patrones espaciales de rendimientos	29
2.4 Discusión.....	32
2.4.1 Factores ambientales y rendimientos	32
2.4.2 Análisis comparado de los rendimientos.....	34
2.4.3 Patrones espaciales de rendimientos	35
2.5 Conclusiones y comentarios finales	37
3 SISTEMAS DE CULTIVOS TRADICIONALES Y EMERGENTES EN LA REGIÓN PAMPEANA: USO DE RECURSOS Y PRODUCTIVIDAD.....	39

3.1	Introducción.....	40
3.2	Materiales y métodos.....	42
3.2.1	Sitio y condiciones ambientales	42
3.2.2	Diseño experimental y manejo	44
3.2.3	Mediciones y análisis.....	45
3.2.4	Experimentos simulados.....	47
3.3	Resultados.....	49
3.3.1	Análisis comparado de los cultivos invernales.....	49
3.3.2	Efecto de los antecesores sobre los cultivos de soja.....	52
3.3.3	Maíz como cultivo de primera y de segunda	57
3.3.4	Análisis global de los sistemas evaluados	58
3.3.5	Experimentos simulados.....	60
3.4	Discusión	64
3.4.1	Cultivos simples vs cultivos dobles.....	65
3.4.2	Análisis comparado de los cultivos invernales.....	65
3.4.3	La productividad de la soja fue variable entre cultivos simples y dobles.....	66
3.4.4	Maíz y soja se comportaron diferente como cultivos de segunda	69
3.5	Conclusiones.....	70
4	DIVERSIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CULTIVOS COMO HERRAMIENTA PARA INTENSIFICAR LAS ROTACIONES	73
4.1	Introducción.....	74
4.2	Materiales y métodos.....	75
4.2.1	Sitios y condiciones ambientales.....	75
4.2.2	Diseño experimental y manejo	76
4.2.3	Toma de muestras y análisis.....	78
4.3	Resultados.....	78
4.3.1	Condiciones al inicio de la secuencia trigo/soja-maíz.....	78
4.3.2	Efecto de los antecesores sobre los cultivos siguientes en las secuencias.....	80
4.4	Discusión	91
4.4.1	Efectos de los antecesores sobre el trigo	92
4.4.2	Efecto de los antecesores sobre la soja de segunda	93
4.4.3	Efectos de los cultivos antecesores sobre maíz.	93
4.4.4	Comentarios finales de la discusión	95
4.5	Conclusiones.....	95
5	IMPACTO DE SECUENCIAS DE CULTIVO INTENSIFICADAS SOBRE LAS COMUNIDADES DE MALEZAS	97

5.1	Introducción	98
5.2	Materiales y métodos	100
5.2.1	Sitios y mediciones	100
5.2.2	Manejo de los cultivos	100
5.2.3	Censos de malezas	101
5.2.4	Análisis de los datos.....	101
5.3	Resultados	104
5.3.1	Composición de las comunidades de malezas	104
5.3.2	Cambios en la frecuencia de especies	108
5.3.3	Efecto de la intensificación sobre las malezas	109
5.3.4	Condiciones de crecimiento para las malezas	110
5.3.5	Asociaciones entre la estructura de la comunidad de malezas y el sistema de cultivos.....	112
5.4	Discusión.....	113
5.4.1	La identidad de los cultivos determina la composición de especies de la comunidad de malezas	114
5.4.2	Intensificar el uso de la radiación incidente reduce la frecuencia de malezas	114
5.5	Conclusiones	115
6	DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES FINALES	117
6.1	Introducción	118
6.2	Avances logrados	120
6.2.1	Variaciones regionales de los rendimientos	121
6.2.2	Análisis comparado de cultivos dobles alternativos a trigo/soja.....	123
6.2.3	Los cultivos dobles como componentes de las rotaciones	125
6.2.4	Efectos de la intensificación y diversificación sobre las comunidades de malezas	126
6.2.5	Comentarios finales.....	127
6.3	Implicancias para investigaciones futuras.....	128

ÍNDICE DE CUADROS

- Cuadro 2.1.** Número de casos (n), tipo de suelo predominante (Hall et al., 1992; Pazos y Mestelan, 2002), rendimiento de maíz, soja, trigo y soja de segunda, expresado como kilogramos de grano por hectárea, y rendimiento del cultivo doble relativo a los cultivos simples de maíz y soja, previamente transformados a unidades de glucosa equivalente, para 11 zonas de la Región Pampeana. Los rendimientos se presentan como el valor promedio durante el periodo 2003-2008. El área porcentual dedicada a maíz, soja y trigo se indica entre paréntesis (%), así como el porcentaje del área de trigo cultivada con soja de segunda. T/S vs M: Rendimiento del cultivo doble trigo/soja relativo a maíz. T/S vs S: Rendimiento del cultivo doble trigo/soja relativo a soja. 23
- Cuadro 2.2.** Valores promedio de precipitaciones durante la estación de crecimiento de cada cultivo, periodo libre de heladas (PLH), radiación (R) estival, temperatura (T.) estival y cociente fototermal (Q) primaveral para 11 zonas CREA de la Región Pampeana durante el periodo 2003-2008. 24
- Cuadro 2.3.** Coeficientes de correlación de Pearson (*r*) entre los rendimientos (Rto) de los cultivos y las variables ambientales consideradas. PLH: periodo libre de heladas; R.: radiación; T.: temperatura; Q: Cociente fototermal. 25
- Cuadro 3.1.** Genotipo, fecha de siembra, densidad objetivo (pl m^{-2}) y distancia entre hileras (cm) utilizados para todos los cultivos en San Pedro (SP), Pergamino (Pe) y Junín (Ju). 45
- Cuadro 3.2.** Análisis comparado de los cultivos invernales [colza, cebada, trigo, arveja antes de maíz (M) y de soja (S)]. Se incluye el rendimiento, la biomasa aérea total y de los rastrojos, expresados en kilogramos de materia seca por hectárea (kg ha^{-1}), el índice de cosecha (IC), radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada (RFAint; MJ m^{-2}), evapotranspiración (ET; mm), disponibilidad de agua en el suelo a la madurez (mm) y fecha de siembra de la soja de segunda cultivada a continuación de todos los cultivos invernales. 50
- Cuadro 3.3.** Análisis comparado de los cultivos de soja de primera (indicado con barbecho como actividad previa) y de segunda sembrados luego de diferentes cultivos invernales. Se presentan valores correspondientes a la radiación fotosintéticamente activa (RFA; MJ m^{-2}) incidente, eficiencia de intercepción (e_i), RFA interceptada (int) acumulada, eficiencia en el uso de la RFA para producir biomasa (EURb; g MJ^{-1}), evapotranspiración (ET; mm), eficiencia en el uso del agua para producir biomasa (EUAb; $\text{kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$), índice de cosecha (IC), biomasa aérea y rendimiento (kg ha^{-1}). 53

Cuadro 3.4. Composición nutricional de los granos de soja según el sistema en el que se cultivó. Se analizó la composición de nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S) en todos los cultivos de soja y en todos los sitios. Los valores son porcentajes de la materia seca de los granos.x 56

Cuadro 3.5. Comportamiento de cultivos de maíz de primera (indicado con barbecho como actividad previa) y segunda luego de diferentes cultivos invernales. Se presentan valores correspondientes a la radiación fotosintéticamente activa (RFA; MJ m⁻²) incidente, la eficiencia de intercepción (e_i), RFA interceptada (int) acumulada, eficiencia en el uso de la RFA para producir biomasa (EURb; g MJ⁻¹), evapotranspiración (ET; mm), eficiencia en el uso del agua para producir biomasa (EUAb; kg ha⁻¹ mm⁻¹), índice de cosecha (IC), biomasa aérea y rendimiento (kg ha⁻¹). 57

Cuadro 3.6. Uso de recursos y productividad de los diferentes sistemas de cultivo. Se incluyen la radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAint; MJ m⁻²), la eficiencia en el uso de la RFAint para producir granos (en unidades equivalentes de glucosa; EURg), la evapotranspiración (ET; mm), la eficiencia en el uso del agua para producir granos (EUAg; kg ha⁻¹ mm⁻¹), el rendimiento en unidades equivalentes de glucosa (kg g.e. ha⁻¹) y el rendimiento de los sistemas de cultivos relativo al cultivo simple de su especie estival. 59

Cuadro 3.7. Rendimientos de los cultivos invernales simulados a partir de tres condiciones hídricas iniciales (45, 67 y 100% de la máxima cantidad de agua útil). Evaluación de los coeficientes genéticos de cebada para rendimiento: RMSE (raíz del cuadrado medio del error)=353 kg ha⁻¹; pendiente de la regresión=0,99; ordenada al origen=2,4; R²=0,51. Evaluación de los coeficientes genéticos de cebada para fenología: RMSE=3,2 días. Evaluación de los coeficientes genéticos de arveja para rendimiento: RMSE=319 kg ha⁻¹; pendiente=0,60; ordenada al origen=1080; R²=0,83. Evaluación de los coeficientes genéticos de arveja para fenología: RMSE=5,8 días. 61

Cuadro 3.8. Rendimientos simulados de los cultivos estivales como cultivos simples o de segunda. Se consideraron tres condiciones hídricas iniciales de acuerdo a los cultivos previos o su periodo de barbecho (percentiles 20, 50 y 80 de probabilidad en la Figura 3.8). Los subíndices junto al cultivo estival indican el cultivo invernal antecesor de los cultivos de segunda (CE: cebada, TR: trigo, AR: arveja). 63

Cuadro 4.1. Genotipos, fechas de siembra, densidades objetivo y espaciamientos entre hileras utilizados en los cultivos de trigo, soja de segunda y maíz en todos los sitios. En cada sitio, todos los tratamientos fueron conducidos de la misma manera para las cuatro variables mencionadas. 77

Cuadro 4.2. Condiciones iniciales para los cultivos de trigo en todos los tratamientos y sitios. Las variables que se presentan son: lámina de agua (mm); nitrógeno en suelo (N; 0-60 cm); azufre extractable (S; 0-20 cm); y cantidad de rastrojo de los cultivos antecesores (kg ha⁻¹). Los tratamientos se refieren a los cultivos que iniciaron la secuencia: soja (SJ), maíz (MZ), colza/soja (CO/S), cebada/soja (CE/S), trigo/soja (TR/S), arveja/soja (AR/S) y arveja/maíz (AR/M). 80

Cuadro 4.3. Análisis comparado de los cultivos de trigo luego de diferentes sistemas de cultivo. Se presentan datos de radiación interceptada acumulada (RFAint; MJ m⁻²), eficiencia en el uso de la radiación para producir biomasa aérea (EURb; g MJ⁻¹), evapotranspiración (ET; mm), eficiencia en el uso del agua para producir biomasa (EUAb; kg ha⁻¹mm⁻¹), biomasa aérea (kg ha⁻¹), índice de cosecha (IC) y rendimiento (Rto; kg ha⁻¹). Los tratamientos (Trat) se refieren a los cultivos que iniciaron la secuencia: soja (SJ), maíz (MZ), colza/soja (CO/S), cebada/soja (CE/S), trigo/soja (TR/S), arveja/soja (AR/S) y arveja/maíz (AR/M). 81

Cuadro 4.4. Análisis comparado de los cultivos de soja de segunda luego de trigo, en parcelas que iniciaron la secuencia con diferentes sistemas de cultivo. Se presentan datos de radiación interceptada acumulada (RFAint; MJ m⁻²), eficiencia en el uso de la radiación para producir biomasa (EURb; g MJ⁻¹), evapotranspiración (ET; mm), eficiencia en el uso del agua para producir biomasa (EUAb; kg ha⁻¹mm⁻¹), biomasa aérea (kg ha⁻¹), índice de cosecha (IC) y rendimiento (Rto; kg ha⁻¹). Los tratamientos se refieren a los cultivos que iniciaron la secuencia: soja (SJ), maíz (MZ), colza/soja (CO/S), cebada/soja (CE/S), trigo/soja (TR/S), arveja/soja (AR/S) y arveja/maíz (AR/M). 85

Cuadro 4.5. Análisis comparado de los cultivos de maíz luego de trigo/soja, en parcelas que iniciaron la secuencia con diferentes sistemas de cultivo. El rendimiento (Rto; kg ha⁻¹) fue analizado como la resultante de la captura de recursos, la eficiencia en el uso de los mismos y el índice de cosecha. Por esto se presentan datos de radiación interceptada (RFAint; MJ m⁻²), eficiencia en el uso de la radiación para producir biomasa (EURb; g MJ⁻¹), evapotranspiración (ET; mm), eficiencia en el uso del agua para producir biomasa (EUAb; kg ha⁻¹mm⁻¹), biomasa aérea (kg ha⁻¹) e índice de cosecha (IC). Los tratamientos (Trat) se refieren a los cultivos que iniciaron la secuencia: soja (SJ), maíz (MZ), colza/soja (CO/S), cebada/soja (CE/S), trigo/soja (TR/S), arveja/soja (AR/S) y arveja/maíz (AR/M). 87

Cuadro 4.6. Contenido total de nitrógeno (N; kg ha⁻¹) en la biomasa aérea e índice de SPAD alrededor de antesis de los cultivos de trigo y maíz. En trigo, los valores de SPAD se obtuvieron midiendo en la hoja bandera, mientras que en maíz se midió en la hoja de la espiga, la superior y la inferior. Los tratamientos se refieren a los cultivos que iniciaron la secuencia: soja (SJ), maíz (MZ), colza/soja (CO/S), cebada/soja (CE/S), trigo/soja (TR/S), arveja/soja (AR/S) y arveja/maíz (AR/M). 90

Cuadro 5.1. Herbicidas utilizados en cada uno de los tratamientos evaluados. (+) 101
implica que los herbicidas fueron utilizados conjuntamente en una misma aplicación;
(//) significa que los herbicidas fueron aplicados en momentos diferentes. El
tratamiento cereal/soja incluye a trigo/soja y cebada/soja en su conjunto.

Cuadro 5.2. Frecuencia promedio de las especies maleza relevadas en cada sitio, 105
clasificadas de mayor a menor según la frecuencia promedio global de los 9 censos (3
sitios x 3 años).

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 2.1.** Zonas evaluadas dentro de la Región Pampeana: Córdoba (COR), Santa Fe Centro (SFC), Litoral Sur (LIS), Centro (CEN), Sur de Santa Fe (SSF), Norte de Buenos Aires (NBA), Oeste Arenoso (OAR), Oeste (OES), Sudeste (SUE), Sudoeste (SUO) y Mar y Sierras (MYS), separadas por líneas punteadas, y la distribución de los grupos CREA (puntos negros) y de las estaciones meteorológicas (estrellas) 18
- Figura 2.2.** Resultado del análisis de componentes principales: once zonas (MYS, SUO, SUE, LIS, NBA, OES, OAR, SFC, SSF, CEN, y COR –ver abreviaturas en Figura 2.1-) representadas como puntos y ordenadas de acuerdo a la productividad de los sistemas de cultivos y según sus condiciones ambientales (vectores). Los puntos cercanos corresponden a zonas con similitudes en las variables mencionadas, mientras que puntos distantes representan disimilitudes entre zonas. Los vectores discontinuos representan auto-vectores para cada una de las variables ambientales [lluvia, temperatura, radiación y cociente foto-termal (Q)]. Los vectores continuos representan auto-vectores de los rendimientos de los diferentes cultivos (maíz, soja, trigo, soja de segunda, trigo/soja en su conjunto) y los rendimientos del cultivo doble relativos a aquellos de los cultivos simples de maíz y soja). 22
- Figura 2.3.** Rendimientos promedio obtenidos por grupo CREA cada año, expresados como kilogramos de glucosa equivalente por hectárea (kg g.e ha^{-1}), en función de la temperatura media primaveral (en el caso de trigo) o estival (para soja de segunda, maíz y soja). La función de frontera ajustada es un indicador de los rendimientos potenciales a diferentes temperaturas. La misma fue estimada mediante la regresión de los valores de rendimiento más altos de cada 20 datos de temperatura consecutivos, luego de ordenar los datos de temperatura de menor a mayor. Maíz: $y = -8637 + 971x$ (si $x < 21,8$); $y = 12529$ (si $21,8 \leq x \leq 23,5$); $y = 12529 - 2099 \cdot (x - 23,5)$ (si $x > 23,5$). Soja: $y = -4798 + 528x$ (si $x < 21,8$); $y = 6702$ (si $21,8 \leq x \leq 23,8$); $y = 6702 - 2050 \cdot (x - 23,8)$ (si $x > 23,8$). Trigo: $y = 7945 - 99x$ (si $x \leq 18,3$); $y = 6130 - 589 \cdot (x - 18,3)$ (si $x > 18,3$). Soja de segunda: $y = -17470 + 1092x$ (si $x \leq 21,2$); $y = 5637$ (si $21,2 \leq x \leq 24,4$). 26
- Figura 2.4.** Distancia relativa a la frontera (%) de la Figura 2.3 en función de las precipitaciones (mm) durante la estación de crecimiento de maíz ($R^2=0,65$), trigo ($R^2=0,53$), soja ($R^2=0,43$) y soja de segunda ($R^2=0,92$). Los datos de precipitaciones fueron previamente ordenados de menor a mayor y agrupados de a 20 datos consecutivos. Los valores promedio de lluvia y distancia relativa para cada grupo fueron utilizados en el análisis. Las barras indican +/- el error estándar de las medias. 27
- Figura 2.5.** Correlaciones entre los rendimientos (a, b y c están forzadas por 0:0) de a) trigo/soja y maíz ($m=1,17$; $R^2=0,35$; $p < 0,0001$); b) maíz y soja de primera ($m=0,53$; $R^2=0,52$; $p < 0,0001$); c) trigo/soja y soja de primera ($m=0,63$; $R^2=0,43$; $p < 0,0001$); y d) trigo y soja de segunda ($m=-0,04$; $R^2=0,00$; $p=0,4713$). Los datos incluidos en este análisis son los rendimientos promedio por grupo CREA para cada año, expresados en términos de kilogramos glucosa equivalente por hectárea (kg g.e. ha^{-1}). 28

Figura 2.6. Coeficientes de correlación de Pearson, presentados en el Cuadro 3, en función de la superposición de los ciclos de crecimiento de los cultivos ($y = -0,02 + 2,06x - 1,35x^2$). El periodo de superposición de ciclos entre dos sistemas de cultivos se estimó como el número de días en los que ambos presentan cultivos en crecimiento dividido el número de días en los que al menos uno de ellos presenta cultivos en crecimiento. Se incluyeron todos los pares de comparaciones posibles entre maíz (Mz), soja (Sj), soja de segunda (Sj 2°), trigo (Tr) y el cultivo doble trigo/soja (Tr/Sj). 29

Figura 2.7. a) Cociente fototermal (Q) primaveral ($m = 0,28$; $R^2 = 0,54$; $p < 0,0001$); b) periodo libre de heladas (PLH; $m = -10,3$; $R^2 = 0,49$; $p < 0,0001$); c) temperatura primaveral ($m = -0,64$; $R^2 = 0,63$; $p < 0,0001$) y d) estival ($m = -0,36$; $R^2 = 0,34$; $p < 0,0001$) de cada grupo CREA en función de la latitud ($^{\circ}S$). Para realizar el análisis se utilizaron los valores promedio durante el periodo 2003-2008. 30

Figura 2.8. Distribución espacial de los rendimientos promedio de los sistemas de cultivos (Kriging ordinary), expresados como kilogramos de glucosa equivalente por hectárea ($kg\ g.e.\ ha^{-1}$), en la Región Pampeana durante el periodo 2003-2008. Los valores de los rendimientos se incrementan hacia las áreas oscuras. 31

Figura 2.9. Rendimiento del cultivo doble trigo/soja relativo a aquellos de maíz (a) y soja (b) (Kriging ordinary), en promedio para el periodo 2003-2008. Los cuartiles (C) de rendimientos relativos se indican con diferentes colores, incrementándose hacia las áreas oscuras. Cuartiles para la relación entre el cultivo doble y maíz: $1^{\circ}C = 0,74-0,83$; $2^{\circ}C = 0,83-0,88$; $3^{\circ}C = 0,88-0,94$; $4^{\circ}C = 0,94-1,04$. Cuartiles para la relación entre el cultivo doble y soja: $1^{\circ}C = 1,31-1,48$; $2^{\circ}C = 1,48-1,61$; $3^{\circ}C = 1,61-1,74$; $4^{\circ}C = 1,74-1,92$. 32

Figura 3.1. Sitios experimentales: San Pedro (1), Pergamino (2) y Junín (3). 42

Figura 3.2. Condiciones ambientales entre abril de 2010 y marzo de 2011 para las tres localidades experimentales. a) Temperatura ($^{\circ}C$) y radiación fotosintéticamente activa (RFA; $MJ\ m^{-2}$). b) Precipitaciones durante la estación y los percentiles históricos (p20, p50, p80; 1971-2010; líneas punteadas), expresados en milímetros (mm). 43

Figura 3.3. Perfiles de humedad en el suelo luego de los cultivos invernales y de los periodos de barbecho, previo a la siembra de soja (a) o maíz (b). El contenido de agua en el suelo es expresado como porcentaje volumétrico (%). Las líneas punteadas indican los límites inferior (LI) y superior (CC: capacidad de campo) de agua disponible. Los cuadrados grises indican el contenido de agua luego de un periodo de barbecho. Los símbolos negros representan el contenido de agua a la madurez de colza (círculos), cebada (cuadrados), trigo (rombos) y arveja (triángulos). Las barras horizontales indican +/- el desvío estándar. 51

Figura 3.4. Dinámica de la intercepción de la radiación fotosintéticamente activa (RFA; %) en los siete sistemas de cultivos, desde mayo de 2010 a mayo de 2011. Las barras indican el desvío estándar. 54

Figura 3.5. a) Intercepción de radiación fotosintéticamente activa (RFA; MJ m⁻²) por parte de cultivos de soja en función de la fecha de siembra ($R^2=0,834$), y b) rendimiento de la soja (kg ha⁻¹) en función de la RFA interceptada ($R^2=0,831$). Todos los cultivos de soja (simple y de segunda) de todas las localidades fueron incluidos en el análisis. Cada punto corresponde a una repetición 55

Figura 3.6. Rendimiento de soja de segunda (kg ha⁻¹) luego de cebada, arveja y colza en función de la concentración de azufre en sus granos en San Pedro (círculos; $R^2=0,59$), Pergamino (cuadrados, $R^2=0,56$) y Junín (triángulos, $R^2=0,82$). 56

Figura 3.7. Rendimiento de los sistemas de cultivos [expresado en unidades equivalentes de glucosa (g.e.) por unidad de área] relacionado con a) la radiación fotosintéticamente activa (RFA) interceptada (MJ m⁻²) y b) la evapotranspiración (mm). Las líneas punteadas indican las eficiencias de uso de los recursos de referencia. Los símbolos oscuros corresponden a los cultivos dobles de arveja/maíz (triángulos invertidos), arveja/soja (triángulos), colza/soja (círculos), cebada/soja (cuadrados) y trigo/soja (rombos). Los símbolos grises corresponden a los cultivos simples de maíz (cuadrados) y soja (círculos). Cada punto corresponde a una repetición. 60

Figura 3.8. Perfiles de humedad de suelo simulados en la madurez fisiológica de los cultivos invernales o luego de los periodos de barbecho previos a la siembra de cultivos simples de maíz y soja. El contenido hídrico está expresado como contenido volumétrico de agua (%). Las líneas discontinuas indican los límites inferior (LI) y superior (CC: capacidad de campo) de almacenamiento de agua en el perfil del suelo. Los triángulos representan el percentil 80 de probabilidad, los cuadrados el percentil 50 y los círculos el percentil 20. 62

Figura 3.9. Probabilidad acumulada de obtener rendimientos (kg ha⁻¹) de soja de segunda por debajo del valor del eje "x", sembrada a continuación de arveja (rojo), cebada (verde) y trigo (gris) en San Pedro, Pergamino y Junín. La condición hídrica inicial corresponde a la del percentil 50 (Figura 3.8). 64

Figura 4.1. Condiciones climáticas durante el segundo y tercer año en los tres sitios experimentales (abril de 2011-marzo de 2013). a) Valores promedio mensuales de temperatura (°C) y radiación fotosintéticamente activa incidente (RFA; MJ m⁻²). b) Precipitaciones mensuales acumuladas (mm) en cada sitio y los percentiles (p20, p50 y p80) de probabilidad de precipitaciones acumuladas (mm) en base a mediciones históricas mensuales (1971-2010) como promedio de los tres sitios. 76

Figura 4.2. a) Radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada (RFA; MJ m⁻²) desde emergencia a madurez, en función del nitrógeno (N) total contenido en la biomasa aérea del cultivo de trigo (kg ha⁻¹) [$R^2=0,59$], y rendimiento en grano (kg ha⁻¹) en función de la RFA interceptada por el cultivo (recuadro). b) Eficiencia en el uso de la RFA interceptada para producir biomasa (EURb; g MJ⁻¹) en función del nitrógeno (N) total contenido en la biomasa aérea del cultivo de trigo a madurez (kg ha⁻¹) [$R^2=0,42$], y rendimiento en grano (kg ha⁻¹) en función de la EURb del cultivo (recuadro). Se incluyen los datos correspondientes a los tres sitios experimentales (San Pedro, Pergamino y Junín). Cada punto corresponde a una repetición. 83

Figura 4.3. a) Radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada (RFA; MJ m⁻²) desde emergencia a madurez, en función del nitrógeno (N) total contenido en la biomasa aérea del cultivo de maíz a madurez [kg ha⁻¹; $R^2=0,51$ (San Pedro); 0,65 (Pergamino); 0,43 (Junín); $p<0,01$], y rendimiento en grano (kg ha⁻¹) en función de la RFA interceptada por el cultivo [recuadro; $R^2=0,81$ (San Pedro); 0,83 (Pergamino); 0,80 (Junín); $p<0,0001$]. b) Eficiencia en el uso de la RFA interceptada para producir biomasa (EURb; g MJ⁻¹) en función del nitrógeno (N) total contenido en la biomasa aérea del cultivo de maíz [kg ha⁻¹; $R^2=0,40$ (San Pedro); 0,12 (Pergamino); 0,22 (Junín); $p<0,01$ (San Pedro)], y rendimiento en grano (kg ha⁻¹) en función de la EURb del cultivo [recuadro; $R^2=0,36$ (San Pedro); 0,35 (Pergamino); 0,00 (Junín); $p<0,05$ (San Pedro y Pergamino)]. Cada punto corresponde a una repetición. 88

Figura 5.1. Grados de similitud entre dos comunidades de malezas utilizando el análisis multivariado NMDS (non-metrical multidimensional scaling). La superposición de los contornos indica el grado de similitud entre dos comunidades. a) Ambas comunidades son iguales; b) existe superposición parcial en las especies que componen cada una de las comunidades; c) las especies que componen una comunidad están incluidas en la otra; d) Las comunidades no comparten especies. 103

Figura 5.2. Estructura de las comunidades de maleza basada en la asociación entre la frecuencia de las especies en función de su ubicación en la jerarquía de frecuencia. La clasificación se realizó ordenando las especies de malezas de más frecuente a menos frecuente. Se presentan dos comunidades contrastantes a modo de ejemplo. 103

Figura 5.3. Análisis multivariado no paramétrico (NMDS; non-metric multidimensional scaling) basado en análisis de similitud entre sitios (d) y entre parcelas que iniciaron la secuencia con soja o maíz (a, b y c) dentro de cada sitio, sea como cultivos simples o de segunda. Los contornos rojos corresponden a los relevamientos del primer año, los azules a los del segundo y los verdes a los del tercero. A su vez, los contornos continuos corresponden a las secuencias que presentaron maíz en el primer verano, mientras que las líneas discontinuas corresponden a aquellas en las que se cultivó soja en ese verano. La distribución de cada especie maleza se indica con su respectivo código Bayer. 107

Figura 5.4. Frecuencia de las especies de maleza en función del orden de la especie en la jerarquía de frecuencia para cada tratamiento en los tres sitios y en cada uno de los años. 108

Figura 5.5. Ordenada al origen de las regresiones de la Figura 5.4 según tratamiento y año. Con una línea verde se grafican los cambios en los tratamientos que iniciaron la secuencia con maíz (continua) y arveja/maíz (discontinua), con líneas rojas se indican los que iniciaron con soja (continua) y arveja/soja (discontinua), mientras que la línea azul discontinua corresponde a la secuencia que inició con cereal/soja. DMS: diferencia mínima significativa. Cada punto corresponde al promedio de tres sitios (San Pedro, Pergamino y Junín) para cada tratamiento. De aquí en adelante se descartó el dato que corresponde a los cultivos simples de maíz en el primer año, que presentaron estrés hídrico en San Pedro. En el segundo año, se descartó el que corresponde al tratamiento que inició la secuencia con trigo/soja y al segundo año presentó un cultivo de trigo con estrés nutricional en San Pedro. 109

Figura 5.6. Radiación no interceptada por los cultivos durante el primer año (2010-2011; %) en los cinco tratamientos analizados. Los cultivos dobles de trigo/soja y cebada/soja se muestran por separado. I: invierno; P: primavera; V: verano. Las barras indican +/- el desvío estándar. 111

Figura 5.7. Ordenada al origen de las funciones de regresión ajustadas en la Figura 5.4 en función de los días con alta cobertura de cultivos durante el invierno (I), la primavera (P) y el verano (V) de 2010-2011. Se considera que los días con alta cobertura de cultivos son aquellos en los que la radiación no interceptada es menor al 25%. R^2 : Año 1=0,48; Año 2=0,52; Año 3=0,10. Cada punto corresponde al valor promedio de cada tratamiento en cada sitio. Los círculos vacíos no fueron considerados para el análisis de regresión. El dato descartado en el primer año corresponde a los cultivos simples de maíz, que presentaron estrés hídrico en San Pedro. El dato descartado en el segundo año corresponde al tratamiento que inició la secuencia con trigo/soja y al segundo año presentó un cultivo de trigo con estrés nutricional en San Pedro. 112

Figura 6.1. Esquema de los cambios observados en la dinámica de intercepción de radiación fotosintéticamente activa (RFA) durante los 3 años de duración de los experimentos. En rojo y azul se indica la intercepción de RFA de dos cultivos dobles que secuencian una especie invernal y una estival. En verde se indica la intercepción de RFA por cultivos simples estivales. Con líneas discontinuas se ejemplifica la caída en la intercepción de RFA observada en trigo/soja (año 2) y maíz (año 3) en tratamientos con recurrencia de cereales. 124

ABREVIATURAS

AACREA: Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola
Am: Agua por encima del punto de marchitez permanente a la madurez del cultivo
AR/M: Cultivo doble arveja/maíz
AR/S: Cultivo doble arveja/soja
As: Agua por encima del punto de marchitez permanente a la siembra del cultivo
CE/S: Cultivo doble cebada/soja
CO/S: Cultivo doble colza/soja
CP: Componente Principal
CREA: Consorcio Regional de Experimentación Agrícola
DPV: Déficit de presión de vapor
 e_i : Eficiencia de intercepción
ET: Evapotranspiración
EURb: Eficiencia en el Uso de la Radiación para producir biomasa
IC: Índice de Cosecha
INTA: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria
 M_{AR} : Maíz de segunda sobre arveja
MZ: Maíz de primera
pp: Precipitaciones
Q: Cociente foto-termal
RFA: Radiación Fotosintéticamente Activa
RFAint: Radiación Fotosintéticamente Activa interceptada
Rto: Rendimiento
 S_{AR} : Soja de segunda sobre arveja
 S_{CE} : Soja de segunda sobre cebada
 S_{CO} : Soja de segunda sobre colza
SJ: Soja de primera
SMN: Servicio Meteorológico Nacional
 S_{TR} : Soja de segunda sobre trigo
TR/S: Cultivo doble trigo/soja

RESUMEN

Incrementar la demanda de productos agrícolas constituye un desafío para alcanzar la seguridad alimentaria global. Por esta razón, no sólo será necesario incrementar los niveles de producción agrícola mundial, sino también la capacidad de sostenerlos de manera sustentable. En las Pampas argentinas, los sistemas de producción de grano se basan principalmente en los cultivos de soja, maíz y trigo. Si bien la expansión de la soja contribuyó al aumento de la producción, también simplificó los planteos productivos. Incrementar la productividad anual de los sistemas agrícolas pampeanos requerirá el diseño de rotaciones de cultivos que intensifiquen y diversifiquen el uso de la tierra, por ejemplo, implementando cultivos dobles. El objetivo general de esta tesis fue evaluar sistemas de cultivo alternativos más intensificados y diversos que los utilizados actualmente en la Región Pampeana, para (i) determinar las posibilidades de incrementar la producción de granos mediante la intensificación en el uso de la tierra, y (ii) esclarecer los factores que determinan la productividad de los sistemas de cultivo. Para ello, se analizaron bases de datos de rendimientos regionales, se realizaron experimentos a campo en tres localidades contrastantes de la Pampa Ondulada y se hicieron simulaciones en computadora. Aunque los mayores rendimientos de maíz, soja y del cultivo doble trigo/soja de segunda se alcanzaron en la zona núcleo pampeana, las ventajas productivas del cultivo doble, comparados con soja y maíz, aumentaron hacia algunas áreas de menor productividad. La inclusión de cultivos invernales alternativos, con cosecha más temprana y menor uso de recursos que trigo, modificaron el balance de utilización de recursos entre los componentes del cultivo doble y aumentaron la productividad del cultivo de segunda. Además, la diversificación mediante la inclusión de diferentes cultivos dobles permitió incrementar los índices de intensificación y la productividad anual de los sistemas de producción de granos.

Palabras clave: Cultivo doble; Cultivo simple; Sistemas de cultivo intensificados; Región Pampeana; Rendimiento; Secuencia de cultivos; Uso de recursos.

ABSTRACT

Responding to the increasing demand for agricultural products is a major challenge to ensure the global food security. This not only requires further productivity increases in the near future, but also to maintain higher production levels. In the Pampas of Argentina, agricultural systems are mainly based on soybean, maize, and wheat crops. Designing more intensified and diversified crop rotations by implementing double cropping systems may allow increasing grain production in the future. Main objectives of this thesis was to evaluate more intensified and diverse cropping systems, for thus i) identifying opportunities to increase grain production in the Pampas, and ii) disentangling the main factors defining the productivity of cropping systems through different approaches. To meet these objectives, regional crop yield databases were analyzed, field experiments were conducted and computer simulations were performed. Although the highest yields of maize, soybean and wheat/soybean double crop were achieved in the central Rolling Pampas, the highest yield advantages of double cropping, in relation to soybean and maize, were obtained in some of the less productive areas. Including alternative winter crops in rotations, with both earlier harvest and less resource exploitation than wheat, changed the dynamics of resource use between the component crops of double cropping, as well as increased yields of second crops. Moreover, diversification of agricultural systems by including different double crops allowed increasing both the intensification of crop sequences and annual productivity.

Keywords: Argentine Pampas; Crop yield; Crop sequence; Double crop; Intensified cropping systems; Resource use; Single crop.

-CAPÍTULO 1-

1 INTRODUCCIÓN GENERAL

El incremento de la demanda de productos agrícolas es generado, principalmente, por el crecimiento de la población mundial, lo que constituye un desafío constante para asegurar la provisión de alimentos a nivel global. Así, para garantizar la seguridad alimentaria, históricamente, se ha recurrido a innovaciones tecnológicas aplicadas a la producción de alimentos, las que han permitido aumentar los rendimientos por unidad de superficie y cultivar nuevas tierras (Andrade, 2011). En las últimas décadas, el aumento de la productividad por unidad de superficie cultivada se ha vuelto de gran importancia para incrementar la producción de alimentos, especialmente si se considera que la posibilidad de expandir la agricultura hacia nuevas tierras es limitada, lo que, a su vez, implica tanto la pérdida de hábitats naturales como los riesgos de deterioro y contaminación ambiental (Cassman et al., 2003; Bruinsma, 2009; Harvey y Pilgrim, 2011; Miyake et al., 2012).

Sin embargo, el desafío en el futuro no solo será incrementar los niveles de producción, sino también ser capaces de sostenerlos. Para lograr esto será necesario disponer de cultivares más productivos y de tecnologías de producción más eficientes y amigables con el ambiente, como también diseñar nuevos sistemas de producción de cultivos (Satorre, 2000; 2012; Tilman et al., 2002). Los sistemas de cultivos que intensifican el uso de la tierra, incrementando el número de cultivos que se realizan por unidad de tiempo sobre una superficie dada, proponen incrementar la productividad reduciendo los periodos de barbecho, o descanso del suelo, y aumentando el uso de recursos e insumos sin afectar la eficiencia con la que estos se utilizan y evitando externalidades negativas. El diseño de estos sistemas debe orientarse a la organización de secuencias de cultivos, tal que sea posible lograr altos rendimientos reduciendo simultáneamente la variabilidad y el riesgo de la actividad productiva.

Dado que la expansión y la intensificación de la agricultura son procesos dinámicos, se requiere una línea de tiempo como referencia histórica para comprender de qué manera la tradición, los mercados externos, las políticas locales y el clima y los suelos de la Región Pampeana han definido la orientación de la producción en el pasado y cómo determinaron la necesidad de diseñar nuevos sistemas de cultivo.

1.1 Breve reseña histórica sobre los cambios en el uso de la tierra en la Región Pampeana¹

Hasta mediados del siglo XVIII los recursos naturales de la Región Pampeana eran aprovechados principalmente por el pastoreo de ganado vacuno y equino introducido desde Europa. La adaptación del ganado vacuno en los pastizales pampeanos fue extraordinaria, reproduciéndose de manera espontánea debido a que encontraron un nicho ecológico prácticamente vacío debido a que la fauna pampeana carecía de ungulados (competidores) y carnívoros (depredadores) de gran tamaño. Los extensos pastizales naturales presentes en ese entonces constituían la única fuente de alimento para el ganado vacuno cimarrón, que los terratenientes cazaban en rondas de vaquerías con el fin de aprovechar su carne y comercializar sus cueros. Este sistema de explotación extensivo se sostenía debido al limitado consumo interno, propio de una población reducida, y a una escasa comercialización externa. Paulatinamente, las limitaciones comerciales fueron mermando, al mismo tiempo que la población en las adyacencias del Río de la Plata aumentaba. Por estos motivos se vaqueaba con creciente intensidad y en radios de acción cada vez más amplios en desmedro de la abundancia de ganado.

El crecimiento de la demanda de ganado vacuno hacia mediados del siglo XVIII resultó en un sistema de explotación más intensivo que requería el establecimiento de población rural para manejar el ganado propio. Como resultado, la producción de carnes y cueros se incrementó en gran medida. Luego, la apertura de mercados posterior a 1810 y el establecimiento de saladeros para la conservación de los excedentes de carne incrementaron el potencial de comercialización y valorizaron al ganado vacuno. Hacia fines del siglo XIX los pastizales naturales típicos de las llanuras pampeanas ocupaban grandes extensiones y constituían el principal recurso forrajero para criar y engordar el ganado.

La expansión de la agricultura en las Pampas comienza en la década de 1870, particularmente en las provincias de Santa Fe, Córdoba y Entre Ríos. En ese periodo se promovió la formación de colonias agrícolas mediante la venta de tierras fiscales a los agricultores inmigrantes, los que pagarían luego con el producto de su trabajo. En la provincia de Buenos Aires, en cambio, la tierra ya estaba completamente adjudicada

¹*Elaborado en base a los escritos de Giberti (1985), Barsky y Gelman (2001) y Reca (2006).*

entre los antiguos propietarios, limitando la llegada de inmigrantes agricultores y, por lo tanto, de la agricultura.

El establecimiento del frigorífico a principios del siglo XX mejoró la calidad de la conservación de carne, ahora congelada, aumentando las exportaciones de este producto principalmente hacia el Reino Unido, que inmediatamente impuso condiciones de comercio tal como la inclusión de razas británicas de alta productividad y calidad de carne. Estas razas demandan dietas de mejor calidad que la que brindan los pastizales naturales de las Pampas, lo que impulsó la implantación de alfalfares en la provincia de Buenos Aires durante la primera década del siglo XX. Para lograr un buen establecimiento del cultivo de alfalfa se necesitaba realizar dos o tres años de agricultura previamente, que generalmente se realizaba con cultivos de trigo (*Triticum aestivum*L.), maíz (*Zea mays* L.) o lino (*Linum usitatissimum*L.). De esta manera se insertaron los cultivos de grano también en la provincia de Buenos Aires. Hacia 1921 se desata una crisis ganadera que resulta en una expansión de la agricultura sin precedentes.

En la década de 1920 toda la superficie de la Región Pampeana estaba bajo explotación agropecuaria. Desde entonces, cualquier incremento en una actividad significa el desmedro de otra dentro de los límites de esta región. En esta década comienza el auge de la carne enfriada en reemplazo de la congelada, lo que mejoró aún más la calidad del producto comercializado aunque el periodo de conservación es menor. Por este motivo, el mercado de la carne enfriada precisa una oferta extendida y homogénea a lo largo del año, lo que determina la aparición del “invernador”. Hacia la década de 1930, el trigo era el cultivo predominante en la Región Pampeana, excepto en la zona maicera ubicada en el norte de la provincia de Buenos Aires y sur de Santa Fe, la zona de invernada establecida en el noroeste de Buenos Aires y la zona de cría al sudeste de Buenos Aires.

El vigoroso crecimiento de la agricultura en Argentina solo se detuvo ante la crisis económica mundial de 1929. El precio de las “commodities” bajó, el Reino Unido estableció canales preferenciales de comercialización con sus antiguas colonias y, luego, la segunda guerra mundial provocó la disrupción de los mercados. Estos límites en el mercado externo desalentaron el interés por la agricultura, reduciéndose la superficie cultivada, que alcanzó su mínimo en 1952. Desde entonces, el área agrícola aumentó, aunque recién en 1987 se recuperaron los valores previos a la crisis. Entre 1952 y 1987, la producción se incrementó mayormente debido a la incorporación a la producción agrícola de tierras no cultivadas. Sin embargo, esta es la primera vez que toma relevancia el incremento en los rendimientos por unidad de superficie, como respuesta a una mecanización del sector y a la paulatina adopción de tecnologías desarrolladas durante la Revolución Verde, ocurrida luego de la segunda guerra mundial. La Revolución Verde fue un suceso mundial que impulsó grandes aumentos de los rendimientos por unidad de superficie en los cultivos de grano. Esto se logró, principalmente, a través de la mejora genética de los cultivos y de la amplia adopción

de fertilizantes sintéticos y agroquímicos de bajo costo. Sin embargo, la adopción de estas tecnologías en Argentina no fue inmediata (Miralles, 2013).

Hasta mediados de la década de 1970 los cultivos oleaginosos, principalmente girasol (*Helianthus annuus*L.), ocupaban tan sólo la quinta parte de la superficie destinada a la producción de granos. Entre 1940 y 1965, la soja (*Glycine max* L. Merr) en Argentina se estudiaba por diversos organismos públicos y privados, pero la inexistencia de patrones de comercialización y la pobre demanda interna vedaban la difusión de este cultivo. La expansión del cultivo de soja se inició recién en 1974, impulsada por la necesidad de disponer de forrajes proteicos para la alimentación animal. Así, la Secretaría de Agricultura y Ganadería importó 80 toneladas de semilla certificada de soja desde Estados Unidos, la que fue distribuida para su multiplicación y consiguiente siembra.

Como se mencionó anteriormente, las tecnologías desarrolladas durante la Revolución Verde demoraron en difundirse en Argentina, sobretodo el uso de fertilizantes. La producción nacional de fertilizantes era escasa, de alto costo y gozaba de protección arancelaria, excluyendo el acceso a fertilizantes importados baratos. Por entonces la investigación se centraba en conservación de la fertilidad mediante rotaciones de cultivos y pasturas. Las barreras a la importación de fertilizantes se removieron recién en 1991, lo que promovió rápidamente la fertilización de cereales, acompañado de una creciente productividad de estos cultivos por unidad de superficie.

En los últimos 20 años, la producción de granos en Argentina continuó creciendo derivada del incremento en el rendimiento por unidad de superficie, favorecido por el creciente uso de insumos, intensificando el capital invertido en la producción, y debido al avance de la frontera agrícola. En consecuencia, el engorde de animales comenzó a realizarse en confinamiento. Por otro lado, los aumentos a nivel mundial de la demanda y el precio de los granos y sus derivados, principalmente de soja, promovieron el incremento de la superficie sembrada con este cultivo en Argentina (Lanteri, 2009). De esta manera los sistemas agrícolas pampeanos fueron simplificados, especializándose en la producción de cultivos de granos, actualmente dominados por oleaginosas en detrimento de los cereales.

Casi en simultáneo, la intensificación en el uso de la tierra se fue asentando como otra vía para incrementar la productividad agrícola anual. Ésta se basa en el aumento del número de cultivos que se realizan sobre una misma superficie por unidad de tiempo, reduciendo los tiempos de barbecho. Se han desarrollado varias técnicas de producción con este fin, incluyendo los cultivos dobles secuenciados y los intercultivos (Calviño y Monzon, 2009). Sin embargo, solamente los cultivos dobles han sido ampliamente adoptados por el sector agrícola pampeano, especialmente aquel compuesto por trigo y soja, llamada soja de segunda en estos planteos. El éxito de este sistema se debe, en primer lugar, a la tecnología de siembra directa desarrollada en los '80 y adoptada en los '90. En segundo lugar, la liberación de variedades de soja

resistentes al glifosato en 1996 terminó de conformar un paquete tecnológico de fácil aplicación, lo que simplificó las actividades y elevó la productividad total de este cultivo doble (INTA, 2011). Así, este cambio tecnológico permitió mantener una proporción de la superficie dedicada al cultivo de trigo.

Los cultivos dobles también son implementados en otras regiones del mundo dedicadas a la producción de granos. Al igual que en las Pampas, el objetivo es maximizar la productividad anual por unidad de superficie. En el sudeste de Estados Unidos (valle del área de Mississippi) también suele realizarse el cultivo doble compuesto por trigo/soja, de manera similar a la Región Pampeana (Wesley y Cooke, 1988). En una amplia región del sur de Asia (llanura Indo-gangética) se implementa el cultivo doble trigo/arroz, mientras que en las planicies del norte de China se encuentra difundido el cultivo doble trigo/maíz, ambos manejados con riego suplementario en trigo. Por último, en el sur de Brasil, recientemente ha comenzado a implementarse el cultivo doble maíz/soja (Fischer et al., 2014).

Actualmente, los sistemas agrícolas más difundidos en la Región Pampeana son los cultivos simples de soja y maíz y el cultivo doble trigo/soja. Trigo, maíz y soja se encuentran entre los principales cultivos en los que se basa la provisión de alimentos a nivel global (Bunting et al., 1982; <http://www.fao.org>). Argentina contribuye actualmente con el 20% de la producción mundial de soja, y con el 2% de la de maíz y trigo. Además, Argentina se encuentra entre los principales exportadores de estos granos y sus derivados en el mercado mundial. Aproximadamente un 60% del área destinada a la agricultura en Argentina se cultiva con soja, sea ésta de primera o de segunda siembra (<http://www.fao.org>; <http://www.siiia.gov.ar>). Sin embargo, estos valores difieren según el régimen de tenencia de la tierra del productor. Los productores arrendatarios generalmente realizan la actividad con mayor rédito económico en el corto plazo, logrado actualmente con el cultivo de soja. En cambio, aquellos productores propietarios de la tierra cultivan una menor proporción de soja, rotando con cereales como trigo y maíz y con el objetivo de alcanzar altos rendimientos y de reducir, simultáneamente, la variabilidad y el riesgo. Los productores en campo propio rotan estos cultivos en años consecutivos, utilizando típicamente la secuencia soja-trigo/soja de segunda-maíz. Esto define que se obtengan cuatro cultivos en un plazo de tres años, con un 50% de participación de soja en la rotación.

Frente a los cultivos simples, el cultivo doble ha incorporado abundante conocimiento y puede realizarse exitosamente con las herramientas y tecnología actualmente disponibles. Es decir, es una alternativa probada a gran escala con amplias posibilidades de expansión en plazos breves. Sin embargo, en la actualidad, la intensificación en el uso de la tierra de los sistemas productivos se ha restringido debido a la reducción de la superficie sembrada con cultivos de invierno (Andrade y Satorre, 2015; <http://www.siiia.gov.ar>).

1.2 Características de la Región Pampeana, disponibilidad de recursos y su utilización a lo largo de la historia

La Región Pampeana reúne características de clima y suelo que la convierten en una de las zonas más apropiadas para la agricultura a nivel mundial (Loomis y Connor, 1992). Sin embargo, el clima y el suelo presentan cierta variabilidad dentro de los límites de la región que afectan la productividad de los tres principales sistemas de producción mencionados. Dado que el relieve en las Pampas es predominantemente plano, la latitud, la continentalidad y el movimiento de masas de aire son los principales determinantes del clima en la región (Burgos, 1968 en Hall et al., 1992). La radiación fotosintéticamente activa (RFA) que incide anualmente en la Región Pampeana es de aproximadamente 3200 MJ m^{-2} . La temperatura promedio anual varía entre 15 y 17,5 °C, disminuyendo de norte a sur, al igual que el período libre de heladas. La región presenta baja amplitud térmica, una característica típica del hemisferio sur. Esto determina que las estaciones de crecimiento duren más que a la misma latitud en el hemisferio norte. Las precipitaciones promedio varían entre 600 y 1000 mm anuales, aumentando desde el sudoeste hacia el noreste de la región. La demanda atmosférica de agua aumenta hacia el noroeste de la región; hacia el norte por efecto de las temperaturas crecientes en latitudes bajas, y hacia el oeste por la baja humedad ambiental producto de la continentalidad (Hall et al., 1992).

Los argiudoles son los suelos predominantes en la Región Pampeana, principalmente los argiudoles típicos. Mayormente se encuentran suelos francos en latitudes medias. En latitudes bajas los suelos suelen ser arenosos o arcillosos, mientras que son comúnmente arenosos hacia el sudoeste de la región y someros en el sudeste (Hall et al. 1992; Pazos y Mestelan 2002; Dardanelli et al. 2004).

En este ambiente se establecieron pastizales naturalmente, dominados por una mezcla de especies de pastos perennes que producen biomasa durante todo el año, con picos de productividad especialmente en la primavera y a fines del verano (León et al., 1984; Soriano et al., 1991). Cuando la alfalfa se comenzó a cultivar como forraje, la producción de biomasa vegetal se acentuó aún más en el período primavera-estival. Luego, los sistemas de cultivos pasaron a conformarse por especies anuales de alta productividad y con el objetivo de producir granos, con sólo una cosecha anual de cultivos invernales o estivales. De esta manera, la producción de biomasa se centró sólo en un momento del año, ya sea en invierno-primavera o durante primavera-verano de acuerdo al tipo de especie cultivada, desaprovechando una gran parte de la oferta de recursos disponibles en el ambiente. Las innovaciones más recientes apuntan a diseñar sistemas de producción más complejos que combinan un número mayor de especies en las secuencias, sin perder de vista la necesidad de cosechar granos anualmente. Este planteo define la utilización de una proporción mayor de los recursos disponibles durante la estación de crecimiento. Sin embargo, la simplicidad de manejo es clave para que estos planteos productivos puedan implementarse exitosamente en el corto plazo con las herramientas disponibles actualmente. Como se mencionó anteriormente,

el objetivo final debe orientarse al incremento de la productividad, reduciendo simultáneamente la variabilidad y el riesgo de la actividad.

A su vez, es necesario estudiar estos sistemas de producción de granos desde su interacción con las variables ambientales que definen su productividad e identificando aquellas de mayor impacto. Esto permitiría definir las condiciones ambientales y las zonas más propicias para cultivar cada uno de ellos, condición necesaria para acompañar con conocimientos un eventual proceso de intensificación en el uso de la tierra.

1.3 Motivos para diseñar sistemas de cultivo alternativos

La mayor proporción de la superficie cultivada de Argentina es ocupada con soja, como se mencionó previamente, debido a que es la actividad agrícola con mayor margen económico. Incluso, el cultivo de soja es rentable cuando se realiza con siembras tardías luego de un cultivo de invierno como el trigo, lo que reduce en gran medida su rendimiento en grano. La pérdida de rendimiento de la soja en sistemas de cultivo doble se debe principalmente al retraso en la fecha de siembra debido a una menor radiación incidente y a temperaturas subóptimas durante su crecimiento (Kantolic y Slafer, 2001). Además, el gran consumo de agua por parte del trigo (Hamblin y Tennant, 1987) y la ausencia de un período de barbecho reducen la disponibilidad hídrica en el suelo a la siembra de este cultivo de segunda. En este sentido, cultivos invernales alternativos al trigo han sido incluidos paulatinamente en la región con el objetivo de reducir la explotación de recursos previo a la soja de segunda e incrementar el rendimiento de este cultivo. Sin embargo, la tradición triguera de la región (Giberti, 1985; Barsky y Gelman, 2001) y la estabilidad productiva de este cultivo aplacaron el interés por los cultivos invernales alternativos.

Tanto en el pasado como en la actualidad, la producción agrícola en Argentina estuvo orientada a los mercados externos. Por ello, la aplicación local de impuestos y restricciones a la comercialización internacional de granos son tan determinantes de la dinámica de los sistemas productivos como el suelo y el clima (Hall et al., 1992; Satorre, 2005) o la tradición regional. En los últimos años, la exportación de trigo ha sido objeto de regulaciones que han forzado a los productores agrícolas a la búsqueda de alternativas de producción durante el invierno. En este sentido, el cultivo de cebada cervecera (*Hordeum vulgare* L.) se ha difundido en gran parte de la Región Pampeana y, en menor medida, el de colza (*Brassica napus* L.) como alternativas de reemplazo del trigo. Al mismo tiempo, emergieron otras alternativas locales como, por ejemplo, el cultivo de arveja (*Pisum sativum* L.) en el norte de la provincia de Buenos Aires. Son escasos los estudios en la región que hayan explorado los beneficios o inconvenientes de la inclusión de diferentes especies en los planteos intensificados (Van Opstal et al., 2011). Ante este nuevo panorama, ha tomado gran importancia el estudio de estos

cultivos invernales en los sistemas productivos pampeanos en términos de su productividad y en el modo en que afectan el rendimiento de la soja de segunda.

1.4 Implicancias de la inclusión de alternativas productivas

Cada especie cultivada se diferencia del resto según la demanda de recursos, el momento de siembra y de cosecha, la estación de cultivo, el tipo y la cantidad de residuos de cosecha, las condiciones edáficas e hídricas del suelo posteriores a la cosecha, entre otras. Estos factores afectan el rendimiento del cultivo siguiente (Bullock, 1992). Además, en sistemas de cultivo doble, la ausencia de un periodo de barbecho entre el cultivo invernal y el cultivo de segunda exacerban estos efectos.

Encontrar secuencias que posibiliten una mayor captación y eficiencia en el uso de los recursos disponibles durante el crecimiento de los cultivos y, por lo tanto, que sean más productivas resulta de interés académico y de aplicación agronómica. Sin embargo, a pesar de que los cultivos dobles fueron adoptados masivamente en la Región Pampeana desde hace más de tres décadas, todavía falta investigar con más profundidad sobre cómo podrían generarse nuevas alternativas para aumentar su frecuencia en las secuencias de cultivos. Ciertamente, este tipo de estudios son necesarios en las demás áreas del mundo donde también realizan cultivos dobles.

Tal como se mencionó anteriormente, el régimen de tenencia de la tierra determina muchas veces la secuencia de cultivos que se realiza sobre una determinada superficie. En muchos casos los propietarios de la tierra la alquilan a productores especializados a precios elevados, forzando la elección del cultivo de soja para compensar este importante costo (Caviglia y Andrade, 2010). En este sentido, los productores arrendatarios generalmente secuencian soja-soja-maíz; tres cultivos simples de verano, con dos cultivos de soja consecutivos. Esta tendencia hacia al monocultivo de soja es un riesgo para la sustentabilidad de los sistemas de producción de granos debido al deterioro del suelo (Novelli et al., 2011). La degradación del suelo es más intensa a medida que la secuencia de cultivos incluye una mayor proporción de cultivos que aportan volúmenes bajos de rastrojos con baja relación C:N, como es el caso de la soja (Studdert y Echeverría, 2000; Wright y Hons, 2004; Dou et al., 2007; Novelli et al., 2011).

Aquellos propietarios que cultivan su tierra normalmente están interesados en mantener las propiedades del suelo y su fertilidad, siendo proclives a incluir cereales de invierno en las secuencias de cultivos. Así, estos productores suelen secuenciar soja-trigo/soja-maíz; reemplazando un cultivo simple de soja por el cultivo doble de trigo/soja de segunda. El cultivo doble trigo/soja ha sido ampliamente adoptado en la región debido a su mayor productividad y estabilidad que los cultivos simples de verano, la tradición triguera y a la rentabilidad de la soja.

Incluir un nuevo cultivo doble en estas secuencias típicas, en reemplazo de la soja restante sembrada en el primer año, podría ser una manera de aumentar aún más la productividad de la secuencia y, con ello, incrementar el volumen de los rastrojos aportados anualmente al suelo. Sin embargo, poco se sabe de las implicancias de intensificar, o bien de la conformación de especies de la secuencia de cultivos, sobre el rendimiento de los cultivos siguientes.

1.5 La comunidad de malezas como indicador del aprovechamiento de los recursos

Es reconocido que los componentes bióticos presentes en los sistemas de producción agropecuaria responden a los cambios en el uso de la tierra. Estas respuestas implican modificaciones en la estructura y funcionamiento de las comunidades bióticas. Por ello, es razonable esperar que cambios en el nivel de intensificación puedan modificar las relaciones de diversos componentes del sistema de producción, tales como las malezas.

Las malezas son especies vegetales que, en respuesta a las actividades humanas, interfieren con los cultivos realizados por el hombre (Aldrich, 1984). Los cultivos y malezas que coexisten en un lote de producción interactúan a través de la competencia por recursos escasos. Las especies que componen las comunidades de malezas se adaptan al cambio ambiental que resulta de la interacción de variables climáticas y prácticas agronómicas (Ghersa et al., 1994; Mortensen et al., 1998; Martínez Ghersa et al., 2000). También se ha observado una asociación positiva entre la captura de recursos por parte del cultivo y la supresión del crecimiento de malezas con las que éste compete (Abraham y Singh 1984, Mohler y Liebman 1987, Satorre y Ghersa 1987, Poggio 2005). En este sentido la incidencia de malezas en competencia con los cultivos podría reducirse aplicando prácticas de manejo, tal como los cultivos dobles secuenciados, que incrementen la captura de recursos durante el ciclo del cultivo, o que cambien los factores ambientales que regulan la dormición y la germinación de las semillas de malezas (Benech Arnold et al., 2000; Batlla y Benech Arnold, 2007).

Además, al rotar cultivos diferentes, la regeneración del nicho de las distintas especies de malezas puede ser interrumpida o alterada y, así, podría reducirse el crecimiento poblacional de algunas especies de maleza (Grubb, 1977; Covarelli y Tei, 1988; Schreiber, 1992; Blackshaw, 1994; Doucet et al., 1999; Meiss et al., 2010).

Por todo lo expuesto, los cambios en la composición florística de las comunidades de malezas podría explicar desde otra perspectiva el uso de los recursos disponibles por parte de los cultivos, dado que las malezas que crecen junto con los cultivos se ubican en tiempo y espacio donde disponen de recursos no utilizados por los mismos (Swanton et al., 1993; Guglielmini et al., 2007). Hasta el momento, no existen

trabajos en la región en los que se haya estudiado y analizado en experimentos a campo las consecuencias de la rotación de especies y de la reducción de los periodos de barbecho, en su conjunto, sobre las comunidades de malezas.

1.6 Objetivos

Con el propósito de responder a los interrogantes planteados durante la introducción, esta tesis tiene como objetivo general:

- Evaluar alternativas de sistemas de cultivos más intensificados y diversos que los implementados actualmente en la Región Pampeana. Así, el propósito de la tesis fue i) determinar las posibilidades de continuar incrementando la producción de granos en la Región Pampeana mediante la intensificación en el uso de la tierra, y ii) esclarecer los factores que determinan la productividad de los sistemas de cultivo mediante diferentes aproximaciones analíticas.

1.6.1 Objetivos específicos

A partir del objetivo general de la tesis se derivan los siguientes objetivos específicos:

I. Evaluar y comparar las variaciones en los rendimientos de los cultivos simples de soja y de maíz y del cultivo doble trigo/soja en lotes comerciales de toda la Región Pampeana, analizando las asociaciones con las variables climáticas.

II. Valorar las posibilidades de aumentar la productividad anual como resultado de mayores capturas y/o eficiencias en el uso de los recursos, mediante la adopción de sistemas de cultivos dobles alternativos al de trigo/soja.

III. Analizar la productividad y la captación y utilización de recursos de los cultivos que componen la secuencia trigo/soja-maíz sembrada a continuación de cultivos simples y de distintos sistemas de cultivos dobles, para determinar las posibilidades de intensificar aún más las secuencias de cultivos en la Región Pampeana.

IV. Estudiar la respuesta de las comunidades de malezas ante los cambios ambientales generados por las variaciones en la intensificación y en las especies cultivadas que componen las secuencias.

1.7 Hipótesis

I. Dado que los cultivos dobles usan más recursos que los cultivos simples estivales, los patrones geográficos de los rendimientos de trigo/soja son similares a los de maíz y de soja (i.e. siendo mayores los rendimientos donde haya más recursos disponibles y menos factores limitantes). Sin embargo, los cultivos dobles ocupan una mayor proporción de la estación de crecimiento y escapan a posibles períodos desfavorables. Por lo tanto, las mayores ventajas de los cultivos dobles se manifestarán donde las condiciones ambientales sean desfavorables para la obtención de altos rendimientos con cultivos simples de verano.

II. La siembra de un cultivo estival a continuación de otro invernal, conformando así un cultivo doble, contribuye a ocupar una mayor fracción de la estación de crecimiento, lo que, consecuentemente, incrementa el uso de los recursos disponibles. Sin embargo, reemplazar al trigo/soja por otros cultivos dobles alternativos, que incluyan cultivos invernales con menor explotación de recursos y/o de cosecha anticipada, incrementará los rendimientos de los cultivos de segunda y, en consecuencia, el rendimiento global del cultivo doble.

III. Diversificar los cultivos dobles permite aumentar la frecuencia de estos sistemas de cultivo en la rotación, evitando la disminución de los rendimientos en años sucesivos. La estabilidad en los rendimientos se deberá al mantenimiento de las eficiencias de captura y de uso de los recursos a lo largo de la secuencia.

IV. Los sistemas de producción que incrementan la diversidad de cultivos, la captura total de recursos y la ocupación de espacios, tal como los que incluyen cultivos dobles, afectan la composición de las comunidades de malezas, reduciendo la frecuencia de ciertas especies. A su vez, las comunidades de malezas divergen al cultivar sistemas diferentes, mientras que tienden a converger al implementar la misma secuencia en los años sucesivos.

1.8 Estructura de la tesis

Para cumplir con los objetivos específicos, en primer lugar, se realizó una aproximación analítica a partir de datos de producción obtenidos por agricultores de distintas zonas de la Región Pampeana (Capítulo 2). Así, se determinaron los rangos de productividad en cada zona, para luego identificar aquellas con mayor aptitud para la realización del cultivo doble trigo/soja de segunda y/o que presentan ventajas con respecto a un cultivo simple de verano, como maíz o soja. Este enfoque se utilizó para definir los patrones de rendimiento de los cultivos simples y dobles más difundidos en la región, comparando su productividad en grano a lo largo de la región con la finalidad de identificar qué conjunto de factores ambientales modulan la productividad de los

diversos sistemas de cultivos. Lograr un entendimiento más profundo de la dinámica con la que los factores ambientales afectan la productividad de los sistemas de cultivos propuestos permitirá extraer conclusiones más allá de los límites de la región de estudio.

A continuación, se llevó a cabo una aproximación experimental, a través de ensayos a campo conducidos en condiciones de secano. El mismo experimento se instaló en tres localidades del norte de la provincia de Buenos Aires. Esta segunda sección presenta un estudio exhaustivo enfocado en el uso de los recursos del ambiente para hallar explicaciones más precisas a las diferencias de productividad entre diversos sistemas de cultivo simples y dobles, incorporando sistemas novedosos en la región y complementando con resultados obtenidos mediante modelos de simulación agronómicos validados para la región (Capítulo 3). El propósito de incorporar las simulaciones fue evaluar el desempeño de los cultivos en un rango de condiciones más amplio que el explorado experimentalmente, estudiando la variabilidad interanual propia de la zona de estudio para reforzar con análisis de sensibilidad las principales conclusiones que se puedan extraer de este trabajo.

Los experimentos se extendieron durante dos estaciones de crecimiento adicionales, dónde se implementó una misma secuencia compuesta por trigo/soja-maíz sobre cada uno de los sistemas cultivados durante la primera estación. Esta sección se centró en generar información de utilidad para diseñar exitosamente rotaciones cada vez más intensificadas, incrementando la frecuencia de cultivos dobles (Capítulo 4). Finalmente, se estudió cómo interactúan los sistemas de cultivo con otros componentes bióticos del sistema, como las malezas (Capítulo 5).

Al final de la tesis, se incluye una discusión general en la que se abordan los principales resultados de la tesis en conjunto (Capítulo 6). De esta manera, se pretende estudiar la intensificación de los sistemas productivos desde varios enfoques en simultáneo para responder los interrogantes que aún resta resolver en este tipo de planteos.

-CAPÍTULO 2-

2 CULTIVOS SIMPLES Y DOBLES EN LA REGIÓN PAMPEANA. EL CLIMA COMO FACTOR DETERMINANTE DE LOS RENDIMIENTOS²

²Los contenidos de este capítulo han sido publicados en Andrade, J.F. y Satorre, E.H. 2015. Single and double crop systems in the Argentine Pampas: Environmental determinants of annual grain yield. *Field Crops Research*, 177: 137-147.

2.1 Introducción

La producción de cultivos de granos en la Región Pampeana creció aceleradamente durante el siglo XX. Primero, mediante la expansión del área cultivada con cultivos de grano y luego, debido al incremento de los rendimientos por unidad de superficie. Las posibilidades de continuar aumentando la superficie cultivada en la región están actualmente limitadas por la escasez de tierras con aptitud agrícola que todavía se encuentran sin cultivar. Ante este escenario, en las últimas décadas, los esfuerzos se concentraron en aumentar los rendimientos por unidad de superficie, aumentando el uso de insumos productivos a través de la inversión de capital en cultivares mejorados, fertilización, riego y el manejo de las adversidades bióticas. En la década de 1990, la intensificación del uso de la tierra surgió como otra vía para incrementar la productividad de los sistemas de cultivos de grano, mediante el aumento del número de cultivos en un lote agrícola por unidad de tiempo (Cassman, 1999; Satorre, 2000; Foley et al., 2005). Esta práctica aumenta la captura total de los recursos disponibles naturalmente en los sistemas agrícolas, como son la radiación solar, el agua y los nutrientes. Los productores a gran escala de la Región Pampeana han intensificado el uso de la tierra secuenciando dos cultivos en una misma campaña agrícola, principalmente a través del cultivo doble trigo/soja de segunda (Caviglia et al., 2004; Calviño y Monzon, 2009).

El cultivo doble trigo/soja devino en uno de los sistemas de cultivo predominantes de la Región Pampeana, junto con los cultivos simples de maíz y soja. Tanto el maíz como la soja son cultivos cuyos ciclos de crecimiento ocupan la mayor parte del verano. Normalmente, el ciclo de maíz abarca desde fines de septiembre hasta principios de marzo, mientras que el ciclo de soja se extiende desde fines de octubre hasta fines de marzo. En cambio, el cultivo doble trigo/soja consiste en cultivar trigo durante el invierno y la primavera, mientras que el de soja crece durante el verano, ya que es sembrado inmediatamente después de la cosecha del trigo.

La productividad de los tres sistemas de cultivo está sujeta a la disponibilidad de recursos, tales como la radiación, el agua y los nutrientes y, a su vez, a la influencia de otros factores ambientales como la temperatura (Lobell et al., 2005, 2011; Lobell y Field, 2007; Asseng et al., 2011; Wang et al., 2014). Sin embargo, es esperable una respuesta diferencial a las variaciones de estos factores, ya que las temperaturas óptimas de crecimiento de maíz y soja son mayores que las de trigo (Larcher, 1980; Andrade et al., 1993). Por otro lado, el trigo es habitualmente cultivado con bajo déficit de presión de vapor durante la estación fría (Satorre et al., 2004), mientras que la soja de segunda usualmente es sembrada con bajos niveles de disponibilidad de agua en el suelo debido al consumo previo del trigo (Hamblin y Tennant, 1987; Calviño et al., 2003). Analizar los rendimientos a campo de los cultivos a escala regional permitiría un mejor entendimiento de las interacciones entre los factores del ambiente que definen las variaciones de productividad. Esto resulta necesario para desarrollar un análisis más profundo del comportamiento de los cultivos y, de este modo, identificar las zonas

dónde los cultivos dobles presentan ventajas comparativas frente a los cultivos simples de verano. Esta información aportaría una base para diseñar y evaluar las posibilidades de expansión de los sistemas de uso intensivo de la tierra.

Es conocido que la variación de los rendimientos de los cultivos depende del clima predominante de las zonas que componen la región. Sin embargo, los efectos sobre los patrones de productividad regional han sido poco estudiado con datos de productores a escala de lote. Una aproximación basada en información productiva a campo permitiría responder varios interrogantes relacionados con la intensificación agrícola. Algunas de las preguntas que se desean contestar son: ¿Dónde es posible intensificar? ¿Dónde se comportan mejor los cultivos dobles? ¿Dónde se diferencian más de los cultivos simples? ¿A qué se deben estas diferencias?

Este Capítulo responde al objetivo específico I “*Evaluar y comparar las variaciones en los rendimientos de los cultivos simples de soja y de maíz y del cultivo doble trigo/soja en lotes comerciales de toda la Región Pampeana, analizando las asociaciones con las variables climáticas*”. Esta información provee una base para evaluar la posible contribución a la producción esperada del cultivo doble trigo/soja. Un marco de trabajo basado en el análisis de rendimientos de diferentes sistemas de producción guiaría este proceso de transformación de la agricultura. Por esta razón, una base de datos de rendimientos de lotes de producción distribuidos en la Región Pampeana se confrontó con información meteorológica.

2.2 Métodos

2.2.1 Región de estudio

El estudio abarcó prácticamente la totalidad de la Región Pampeana y el sur del Litoral, cubriendo una superficie cercana a los 600.000 km², dado que los datos corresponden a aproximadamente 110.000 lotes de producción ubicados entre los paralelos 30° y 39° sur y entre los meridianos 57° y 65° oeste (Figura 2.1). Tal como se describió en la introducción general, la región es un área ecológicamente heterogénea. El clima y los suelos varían considerablemente dentro de los límites regionales y, además, la variabilidad climática interanual puede ser amplia. Estos factores climáticos y edáficos son los determinantes de los rendimientos de los sistemas cultivados en la región.

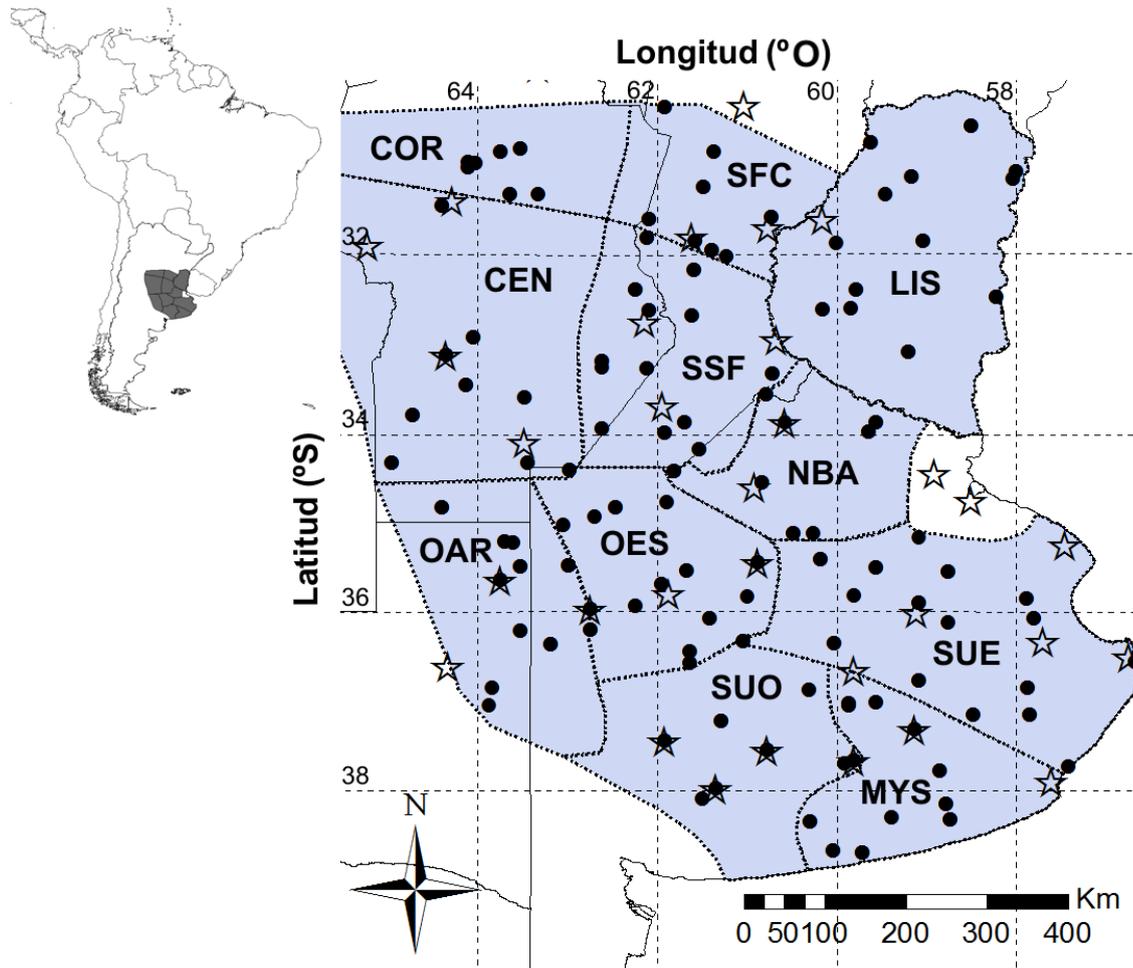


Figura 2.1. Zonas evaluadas dentro de la Región Pampeana: Córdoba (COR), Santa Fe Centro (SFC), Litoral Sur (LIS), Centro (CEN), Sur de Santa Fe (SSF), Norte de Buenos Aires (NBA), Oeste Arenoso (OAR), Oeste (OES), Sudeste (SUE), Sudoeste (SUO) y Mar y Sierras (MYS), separadas por líneas punteadas, y la distribución de los grupo CREA (puntos negros) y de las estaciones meteorológicas (estrellas).

Los lotes agrícolas utilizados en el estudio, pertenecientes a productores agropecuarios afiliados a la Asociación Argentina de Consorcios de Experimentación Agrícola (AACREA; <http://www.crea.org.ar>), se distribuyeron en la Región Pampeana. En Argentina, las asociaciones privadas de productores, incluyendo AACREA, son fuente de información de sistemas agrícolas a gran escala. En AACREA participan aproximadamente 2000 productores y 200 asesores, los que conforman grupos de 8 a 12 miembros asesorados por profesionales, usualmente ingenieros agrónomos (grupo CREA). En estos grupos, los asesores aconsejan a los productores en diversos aspectos relacionados con la producción agropecuaria y, a su vez, recolectan información precisa sobre el estado de los cultivos y su manejo, el suelo y el clima y los resultados económicos de la producción. AACREA ha desarrollado una base de datos de información de campo que ha permitido análisis novedosos sobre los sistemas productivos predominantes en la región pampeana (Mercau et al., 2001; Ghera et al., 2002; Menéndez y Satorre, 2007).

Los datos de rendimiento utilizados aquí provienen de cultivos manejados con las prácticas agronómicas usuales y en condiciones de secano (i.e., sin riego suplementario). Los lotes agrícolas fueron agrupados primero en los 132 grupos CREA involucrados en el análisis (el centro geográfico de cada grupo CREA se indica con un punto en la Figura 2.1). Estos grupos están organizados, a su vez, en 11 zonas según sus similitudes agroecológicas y la orientación de la producción (Figura 2.1). Los diversos análisis realizados se basaron en el rendimiento promedio de todos los lotes que conforman cada grupo CREA durante un período de cinco años (2003-2008), lo que permitió explorar un rango amplio de condiciones climáticas y asumir que no hubo grandes cambios en la tecnología de producción (Calviño y Sadras, 1999).

Los rendimientos de los cultivos fueron expresados en kilogramos de grano seco (0% de humedad) por hectárea (kg ha^{-1}). Para comparar los rendimientos de especies con granos de diferente composición, los valores de rendimiento también se expresaron en la cantidad equivalente de glucosa (kg g.e. ha^{-1}). Los equivalentes de glucosa son la cantidad de glucosa necesaria para producir granos de cada especie, la que depende de la composición química de los granos. Penning de Vries et al. (1983) determinó qué cantidad de lípidos, carbohidratos y proteínas puede sintetizarse con un kg de glucosa, estableciendo que 1 kg de glucosa, como resultado de los diferentes costos de síntesis, equivale a 0,81 kg de carbohidratos, 0,41 kg de proteínas o 0,33 kg de lípidos. Muchos trabajos describieron la composición química de granos de maíz, trigo y soja (Watson y Ramstad, 1987; Gooding y Davies, 1997; Weilenmann de Tau y Suárez, 1998; Stone y Savin, 1999), lo que permite estimar un valor de equivalentes de glucosa promedio por kg de grano de cada especie. De esta manera, sobre la base de la literatura, para este trabajo se estableció que son necesarios 1,28 kg, 1,32 kg y 1,86 kg de glucosa para sintetizar 1 kg de grano de trigo, de maíz y de soja, respectivamente.

2.2.2 Información climática

La radiación incidente, temperatura media y el período libre de heladas durante el período evaluado (2003-2008) se obtuvieron de archivos meteorológicos de INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria), mientras que los datos de precipitaciones fueron provistos por el SMN (Servicio Meteorológico Nacional). Además, se calculó el cociente foto-termal (Q) durante la primavera (21 de septiembre hasta 21 de diciembre), como el cociente entre radiación incidente y temperatura promedio de ese período (Fischer, 1985; Savin y Slafer, 1991). Para cada grupo CREA se utilizaron los datos de la estación meteorológica más cercana, hasta una distancia máxima de 60 km. El monto de las precipitaciones (mm) se calculó para cada cultivo por separado. La cantidad total de lluvias ocurridas entre septiembre y enero fueron utilizadas para definir las precipitaciones relevantes durante el ciclo del cultivo de maíz, mientras que el período octubre a febrero fue considerado de importancia para soja, mayo a noviembre para trigo y diciembre a marzo para soja de segunda (Satorre et al., 2004).

2.2.3 *Análisis*

Los datos de rendimiento de cada grupo CREA fueron analizados junto con su posición geográfica y los datos climáticos (precipitaciones, temperatura, radiación solar y periodo libre de heladas) de su zona de influencia. Estas variables también fueron agrupadas por zona y analizadas usando estadística descriptiva y t de Student para comparar medias zonales. Los Cuadros 2.1 y 2.2 presentan los rendimientos medios de todos los cultivos y las variables ambientales obtenidas como promedio de los 5 años evaluados en cada zona, así como el tipo de suelo predominante en cada zona. Esta información no se incluyó en los análisis siguientes. La caracterización edáfica en la escala de análisis propuesta es muy difícil en la Región Pampeana, porque los suelos usualmente en los lotes de producción son mosaicos complejos compuestos por unidades distintas.

Luego se determinó la influencia de la superposición de los ciclos de los cultivos de maíz, soja y trigo/soja de segunda (y de sus componentes por separado) sobre la correlación de sus rendimientos en grano. La superposición entre dos sistemas se estimó como el número de días en los que ambos presentan cultivos en crecimiento dividido el número de días en los que al menos uno presenta un cultivo en crecimiento, utilizando las fechas de siembra y madurez promedio para la región (Satorre et al., 2004). Finalmente, se realizaron análisis de componentes principales, correlaciones de Pearson y regresiones para evaluar similitudes entre zonas y las asociaciones entre variables ambientales y rendimientos de los cultivos (v 2.12.1, R Development Core Team, 2008; Di Rienzo et al., 2011).

Los efectos de la temperatura sobre los rendimientos máximos se determinaron mediante análisis de frontera. Para construir la línea de frontera, los datos de temperatura primero fueron ordenados de menor a mayor. Luego se los agrupó en conjuntos de 20 datos, para obtener medidas grupales robustas y, a su vez, mantener una cantidad de grupos suficiente para construir la frontera y ajustar regresiones lineales entre variables. Los valores máximos de rendimientos de cada uno de los conjuntos de datos fueron utilizados para construir la función de la regresión de frontera, utilizada como un indicador de los rendimientos máximos alcanzables a campo (van Ittersum et al., 2013). La distancia relativa (%) de cada valor de rendimiento hasta la frontera fue contrastada con los datos de precipitaciones. Para ello, los datos de lluvias también se ordenaron de menor a mayor y se agruparon de a 20 datos. Finalmente, los valores promedio de distancia relativa para cada grupo de datos se correlacionaron con sus valores promedio de precipitaciones.

Por último, para generar los mapas regionales de rendimientos se realizó un análisis espacial de los rendimientos promedio durante el periodo 2003-2008 de cada grupo CREA utilizando el método de interpolación lineal de Kriging Ordinary (Wackernagel, 2003), mientras que los parámetros utilizados para el variograma fueron

calculados mediante el software de análisis estadístico R (v 2.12.1, R Development Core Team, 2008).

2.3 Resultados

2.3.1 Efectos ambientales sobre los rendimientos de los cultivos

Los rendimientos promedio zonales de los cultivos simples y dobles y las variables climáticas se presentan en los Cuadros 2.1 y 2.2, respectivamente. Los datos fueron explorados en primer lugar mediante un análisis multivariado con el propósito de identificar relaciones de importancia, para luego profundizar su estudio. Los componentes principales (CP) 1 y 2 explicaron el 64,5% de la variabilidad total de los datos (Figura 2.2). Una correlación positiva entre dos variables establece que zonas con altos valores para una variable también presentan altos valores para la otra, mientras que correlaciones negativas entre dos variables implican que una variable muestra valores altos donde los de la restante son bajos. Por estos motivos, a partir del análisis multivariado (Figura 2.2), puede observarse que los vectores de las variables correlacionadas positivamente forman ángulos cercanos a 0° (i.e., los vectores están orientados hacia la misma dirección), mientras que las variables correlacionadas negativamente forman ángulos que tienden a 180° (i.e. los vectores apuntan hacia direcciones opuestas).

Por un lado, valores positivos en el CP1 se asociaron principalmente con las precipitaciones estivales, el periodo libre de heladas y con rendimientos altos de los cultivos estivales, especialmente con el de soja de segunda. Valores altos y negativos en ese eje estuvieron más asociados a las lluvias invernales, el Q primaveral, a los rendimientos de trigo y de los cultivos dobles relativos a los cultivos simples de maíz y soja. Por otro lado, los altos rendimientos de maíz, soja y del cultivo doble trigo/soja correspondieron a valores positivos en el CP 2; mientras que los altos rendimientos de cultivos dobles, relativos a los cultivos simples de verano, estuvieron asociados con los valores negativos en ese componente (Figura 2.2).

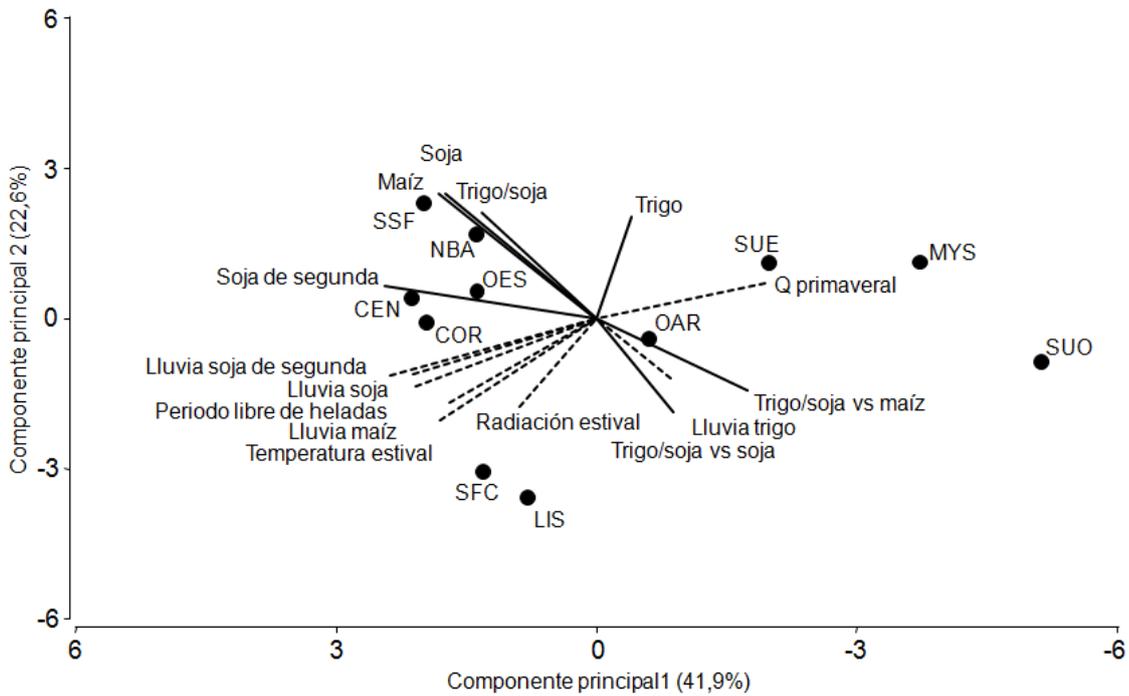


Figura 2.2. Resultado del análisis de componentes principales: once zonas (MYS, SUO, SUE, LIS, NBA, OES, OAR, SFC, SSF, CEN, y COR –ver abreviaturas en Figura 2.1-) representadas como puntos y ordenadas de acuerdo a la productividad de los sistemas de cultivos y según sus condiciones ambientales (vectores). Los puntos cercanos corresponden a zonas con similitudes en las variables mencionadas, mientras que puntos distantes representan disimilitudes entre zonas. Los vectores discontinuos representan auto-vectores para cada una de las variables ambientales [lluvia, temperatura, radiación y cociente foto-termal (Q)]. Los vectores continuos representan auto-vectores de los rendimientos de los diferentes cultivos (maíz, soja, trigo, soja de segunda, trigo/soja en su conjunto) y los rendimientos del cultivo doble relativos a aquellos de los cultivos simples de maíz y soja).

Cuadro 2.1. Número de casos (n), tipo de suelo predominante (Hall et al., 1992; Pazos y Mestelan, 2002), rendimiento de maíz, soja, trigo y soja de segunda, expresado como kilogramos de grano por hectárea, y rendimiento del cultivo doble relativo a los cultivos simples de maíz y soja, previamente transformados a unidades de glucosa equivalente, para 11 zonas de la Región Pampeana. Los rendimientos se presentan como el valor promedio durante el periodo 2003-2008. El área porcentual dedicada a maíz, soja y trigo se indica entre paréntesis (%), así como el porcentaje del área de trigo cultivada con soja de segunda. T/S vs M: Rendimiento del cultivo doble trigo/soja relativo a maíz. T/S vs S: Rendimiento del cultivo doble trigo/soja relativo a soja.

Zona	n	Tipo de suelo predominante	Rendimiento (kg ha ⁻¹)				Rendimiento relativo	
			Maíz	Soja	Trigo	Soja 2°	T/S vs M	T/S vs S
COR	28	Haplustol típico	6832 (26)	2443 (47)	1877 (27)	2153 (88)	0,72	1,44
SFC	30	Argiudol típico	5838 (24)	2141 (46)	2173 (31)	1926 (100)	0,87	1,79
LIS	54	Argiudol vértico	5507 (21)	2041 (64)	2929 (15)	1821 (100)	1,00*	1,82
SSF	64	Argiudol típico	8261 (26)	3099 (46)	3331 (31)	2377 (100)	0,80	1,52
CEN	43	Hapludol éntico	6733 (31)	2869 (50)	2418 (19)	2324 (87)	0,86	1,40
NBA	33	Argiudol típico	7671 (27)	3121 (45)	3730 (28)	2190 (100)	0,89	1,53
OAR	53	Haplustol éntico	6061 (29)	2408 (56)	2626 (15)	1997 (59)	0,88	1,57
OES	51	Hapludol éntico	7605 (23)	2758 (55)	3540 (22)	2078 (93)	0,84	1,65
SUE	62	Hapludol éntico	6439 (17)	2390 (55)	3626 (29)	1801 (100)	0,92	1,78
SUO	34	Haplustol éntico	4332 (8)	1820 (28)	2396 (63)	1085 (11)	1,11*	1,60
MYS	57	Argiudol petrocálcico	6139 (8)	2145 (38)	3662 (54)	1030 (61)	0,86	1,69
EE			271,4	93,4	172,0	93,3	0,049	0,090
GL			489	488	452	425	401	406

EE: error estándar; GL: grados de libertad; * estadísticamente no diferente de 1,00 (IC 95%).

El análisis multivariado permitió ubicar cada zona (puntos) en un gráfico de dos dimensiones según la resultante de la interacción de todas las variables mencionadas (vectores). Así, las zonas de comportamiento similar se agruparon más próximas entre sí, mientras que aquellas con diferencias ecológicas y productivas se ubicaron más alejadas entre sí (Figura 2.2). En este sentido, las zonas SSF, NBA y OES presentaron altos rendimientos para los cultivos de verano, mientras que LIS y SFC se situaron en valores negativos del CP 2, como consecuencia de que los rendimientos en dichos cultivos fueron bajos. Asimismo, COR, CEN, SSF y SFC tuvieron altos valores en el CP 1, indicando altos rendimientos para cultivos de soja de segunda y/o bajos rendimientos de trigo. Finalmente, MYS, SUE y SUO se relacionaron a altos rendimientos de trigo y/o bajos rendimientos de soja de segunda (Cuadro 2.1).

Cuadro 2.2. Valores promedio de precipitaciones durante la estación de crecimiento de cada cultivo, periodo libre de heladas (PLH), radiación (R.) estival, temperatura (T.) estival y cociente fototermal (Q) primaveral para 11 zonas CREA de la Región Pampeana durante el periodo 2003-2008.

Zona	Precipitaciones (mm)				PLH (días)	R. estival (MJ m ⁻²)	T. estival (°C)	Q primaveral (Mj m ⁻² °C ⁻¹)
	Maíz	Soja	Trigo	Soja 2°				
COR	466	540	205	518	297	20,3	22,2	0,98
SFC	474	546	309	547	264	22,2	23,8	1,04
LIS	541	567	528	508	273	21,3	24,2	1,05
SSF	438	517	271	504	235	20,9	22,5	1,09
CEN	484	567	252	546	251	21,0	22,0	1,11
NBA	484	536	393	457	244	20,6	22,3	1,12
OAR	460	485	300	448	221	22,0	23,1	1,16
OES	520	559	359	499	247	21,3	22,1	1,20
SUE	433	488	405	411	217	20,4	20,5	1,21
SUO	425	459	357	361	203	20,3	20,2	1,36
MYS	372	433	372	355	201	20,6	21,0	1,14
EE	20,6	23,5	20,6	27,7	7,1	0,34	0,27	0,017
GL	403	385	409	382	332	226	332	226

EE: error estándar; GL: grados de libertad.

Los rendimientos de soja de segunda y trigo, por separado, se correlacionaron con la temperatura media durante sus etapas reproductivas ($r=0,30$ y $-0,44$, respectivamente; $p<0,001$; Cuadro 2.3) y a otras variables asociadas a la temperatura. De esta manera, el rendimiento del trigo se correlacionó positivamente con el Q primaveral ($r=0,43$; $p<0,001$), mientras que los rendimientos de los cultivos de soja de segunda estuvieron asociados con el periodo libre de heladas ($r=0,43$; $p<0,001$). En cambio, los rendimientos de los cultivos simples de maíz y soja no se asociaron linealmente con los cambios en la temperatura media del verano ($p>0,05$). Estas asociaciones también se observan en el análisis de componentes principales. Las variables positivamente correlacionadas entre sí formaron ángulos agudos entre sus respectivos vectores, mientras que aquellas negativamente correlacionadas formaron ángulos obtusos (Figura 2.1).

Cuadro 2.3. Coeficientes de correlación de Pearson (r) entre los rendimientos (Rto) de los cultivos y las variables ambientales consideradas. PLH: periodo libre de heladas; R.: radiación; T.: temperatura; Q: Cociente fotothermal.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1 Lluvia maíz (mm)	1,00														
2 Lluvia soja (mm)	0,86	1,00													
3 Lluvia trigo (mm)	0,42	0,21	1,00												
4 Lluvia soja 2° (mm)	0,62	0,81	-0,08	1,00											
5 PLH (days)	0,34	0,31	-0,06	0,34	1,00										
6 R. primaveral (Mj m ⁻² d ⁻¹)	-0,08	-0,12	-0,08	-0,04	-0,23	1,00									
7 R. estival (Mj m ⁻² d ⁻¹)	-0,15	-0,15	-0,04	-0,15	0,00	0,48	1,00								
8 T. primaveral (°C)	0,32	0,35	-0,25	0,45	0,49	0,34	0,31	1,00							
9 T. estival (°C)	0,23	0,14	0,03	0,16	0,35	0,48	0,44	0,78	1,00						
10 Q primaveral (Mj m ⁻² °C ⁻¹)	-0,38	-0,45	0,08	-0,45	-0,35	0,24	-0,04	-0,83	-0,48	1,00					
11 Rto maíz (kg g.e. ha ⁻¹)	0,29	0,36	-0,05	0,37	0,19	-0,09	-0,21	0,09	-0,10	-0,06	1,00				
12 Rto soja (kg g.e. ha ⁻¹)	0,25	0,30	-0,12	0,33	0,10	0,05	-0,23	0,10	-0,08	0,04	0,77	1,00			
13 Rto trigo (kg g.e. ha ⁻¹)	-0,05	-0,05	0,36	-0,18	-0,25	-0,01	-0,13	-0,44	-0,23	0,43	0,38	0,35	1,00		
14 Rto. soja 2° (kg g.e. ha ⁻¹)	0,42	0,49	-0,19	0,51	0,43	0,14	-0,07	0,52	0,30	-0,33	0,54	0,66	-0,04	1,00	
15 Rto trigo/soja (kg g.e. ha ⁻¹)	0,25	0,29	0,13	0,22	0,11	0,10	-0,14	0,04	0,04	0,12	0,65	0,70	0,72	0,67	1,00

Los rendimientos máximos de los cultivos estudiados difirieron en su respuesta a la temperatura, la que fue analizada con la regresión de frontera (Figura 2.3). Los mayores rendimientos de trigo fueron obtenidos con temperaturas medias primaverales inferiores a 18,3 °C, mientras que los mayores rendimientos de soja de segunda se registraron con temperaturas estivales por encima de 21,2 °C. El análisis de frontera en los cultivos simples de maíz y soja indicó que los máximos rendimientos se obtuvieron en un rango acotado de temperaturas medias (21,8-23,5 y 21,8-23,8 °C, respectivamente), dado que tanto las temperaturas medias bajas como las altas tuvieron efectos adversos sobre las posibilidades de alcanzar altos rendimientos en grano con ambos cultivos.

Según las correlaciones de Pearson, la lluvia durante el ciclo de los cultivos fue también un factor determinante de los rendimientos de maíz, soja y trigo ($r=0,29$, $0,30$ y $0,36$, respectivamente; $p<0,001$), pero su efecto sobre el rendimiento de soja de segunda fue mayor ($r=0,51$; $p<0,001$; Cuadro 2.3). En todos los cultivos, la brecha entre los rendimientos alcanzados y la frontera de los máximos rendimientos alcanzables en seco se redujo a medida que las lluvias durante el ciclo de crecimiento aumentaron (Figura 2.4). En soja de segunda, la distancia relativa se redujo aproximadamente un 10% por cada 100 mm de precipitaciones, hasta alcanzar valores de 600 mm. En cambio, las distancias relativas de maíz y soja sólo se redujeron a una tasa de 4,4 y 2,8% por cada 100 mm de incremento en las precipitaciones, respectivamente. En trigo, la relación entre la distancia relativa a los rendimientos máximos y las lluvias fue bi-lineal.

Así, la brecha con los rendimientos máximos disminuyó con el aumento de las precipitaciones, tendiendo a ser independiente cuando las lluvias superaron los 378 mm. A su vez, los resultados muestran que la distancia promedio a los rendimientos máximos siempre fue de al menos 15% para todos los cultivos.

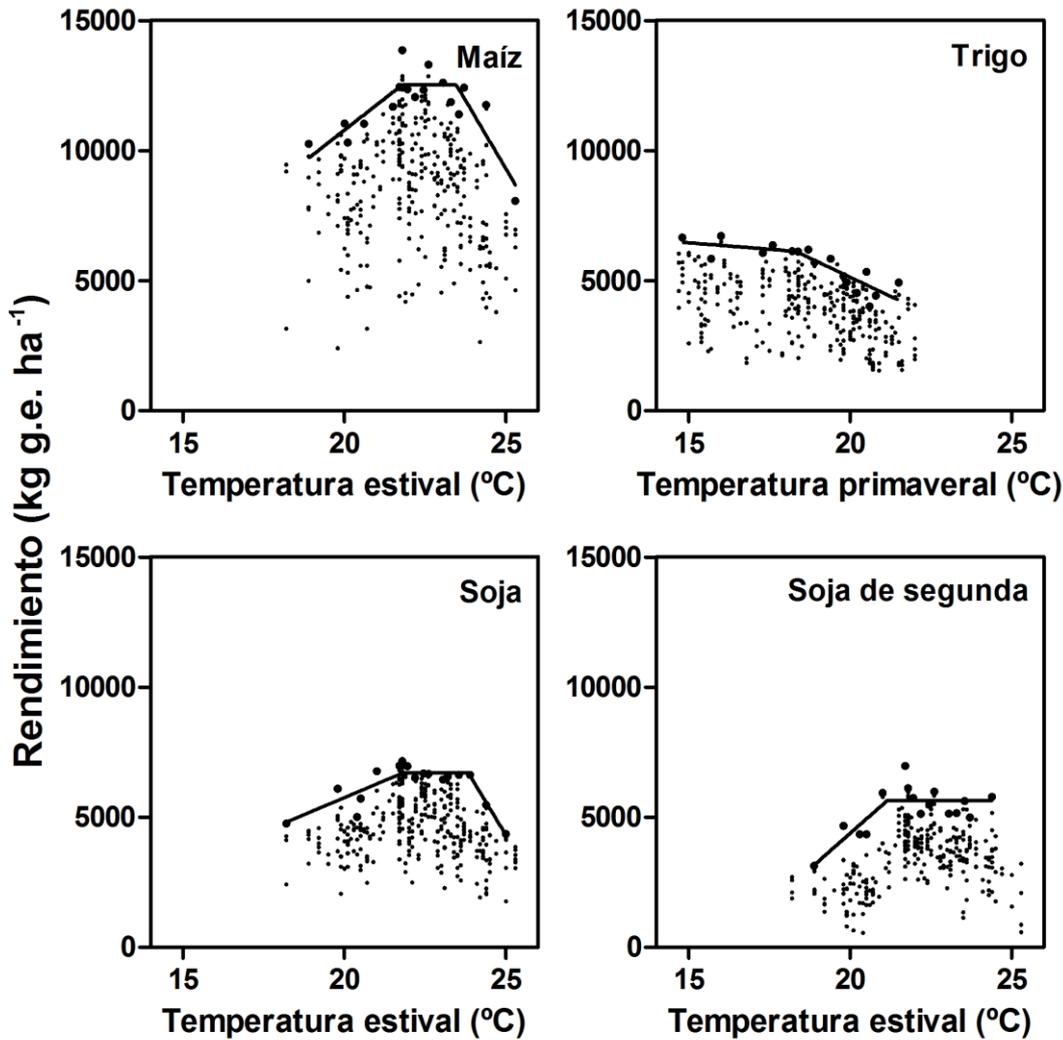


Figura 2.3. Rendimientos promedio obtenidos por grupo CREA cada año, expresados como kilogramos de glucosa equivalente por hectárea (kg g.e ha⁻¹), en función de la temperatura media primaveral (en el caso de trigo) o estival (para soja de segunda, maíz y soja). La función de frontera ajustada es un indicador de los rendimientos potenciales a diferentes temperaturas. La misma fue estimada mediante la regresión de los valores de rendimiento más altos de cada 20 datos de temperatura consecutivos, luego de ordenar los datos de temperatura de menor a mayor. Maíz: $y = -8637 + 971x$ (si $x < 21,8$); $y = 12529$ (si $21,8 \leq x \leq 23,5$); $y = 12529 - 2099 \cdot (x - 23,5)$ (si $x > 23,5$). Soja: $y = -4798 + 528x$ (si $x < 21,8$); $y = 6702$ (si $21,8 \leq x \leq 23,8$); $y = 6702 - 2050 \cdot (x - 23,8)$ (si $x > 23,8$). Trigo: $y = 7945 - 99x$ (si $x \leq 18,3$); $y = 6130 - 589 \cdot (x - 18,3)$ (si $x > 18,3$). Soja de segunda: $y = -17470 + 1092x$ (si $x \leq 21,2$); $y = 5637$ (si $21,2 \leq x \leq 24,4$).

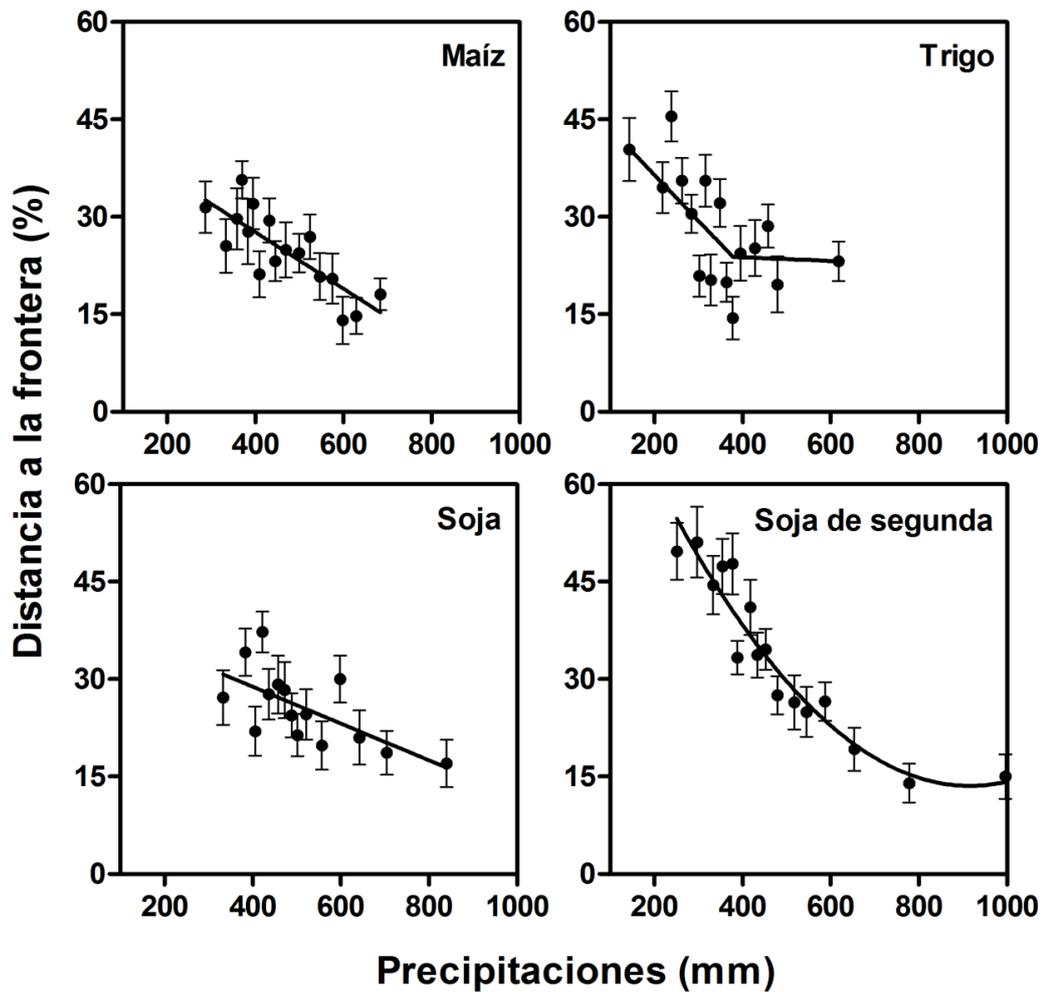


Figura 2.4. Distancia relativa a la frontera (%) de la Figura 2.3 en función de las precipitaciones (mm) durante la estación de crecimiento de maíz ($R^2=0,65$), trigo ($R^2=0,53$), soja ($R^2=0,43$) y soja de segunda ($R^2=0,92$). Los datos de precipitaciones fueron previamente ordenados de menor a mayor y agrupados de a 20 datos consecutivos. Los valores promedio de lluvia y distancia relativa para cada grupo fueron utilizados en el análisis. Las barras indican +/- el error estándar de las medias.

2.3.2 Análisis comparado de los sistemas de cultivo

Los rendimientos de los cultivos simples de maíz y soja estuvieron altamente correlacionados entre sí ($p<0,0001$; Figura 2.5b). La regresión lineal, forzada por el origen de coordenadas, tuvo una pendiente de 0,53, lo que indica que el rendimiento equivalente a glucosa de maíz fue, en promedio, casi el doble que el de soja (Figura 2.5b). En cambio, los rendimientos de trigo y soja de segunda no estuvieron correlacionados ($p=0,471$; Figura 2.3d). Sin embargo, el rendimiento del cultivo doble trigo/soja de segunda, sumando ambos cultivos, estuvo fuertemente correlacionado con los rendimientos de los cultivos simples de maíz y de soja ($p<0,0001$; Figura 2.5a y 2.3c). La regresión lineal entre los rendimientos de maíz y de trigo/soja tuvo pendiente

mayor a 1, mientras que la pendiente fue menor a 1 para la relación entre soja y trigo/soja. Profundizando el análisis, se observó que el nivel de correlación entre dos sistemas de cultivos estuvo fuertemente determinado por la superposición de las estaciones de crecimiento que éstos sistemas de cultivos abarcan (Figura 2.6), considerando las fechas típicas de siembra y madurez en la región.

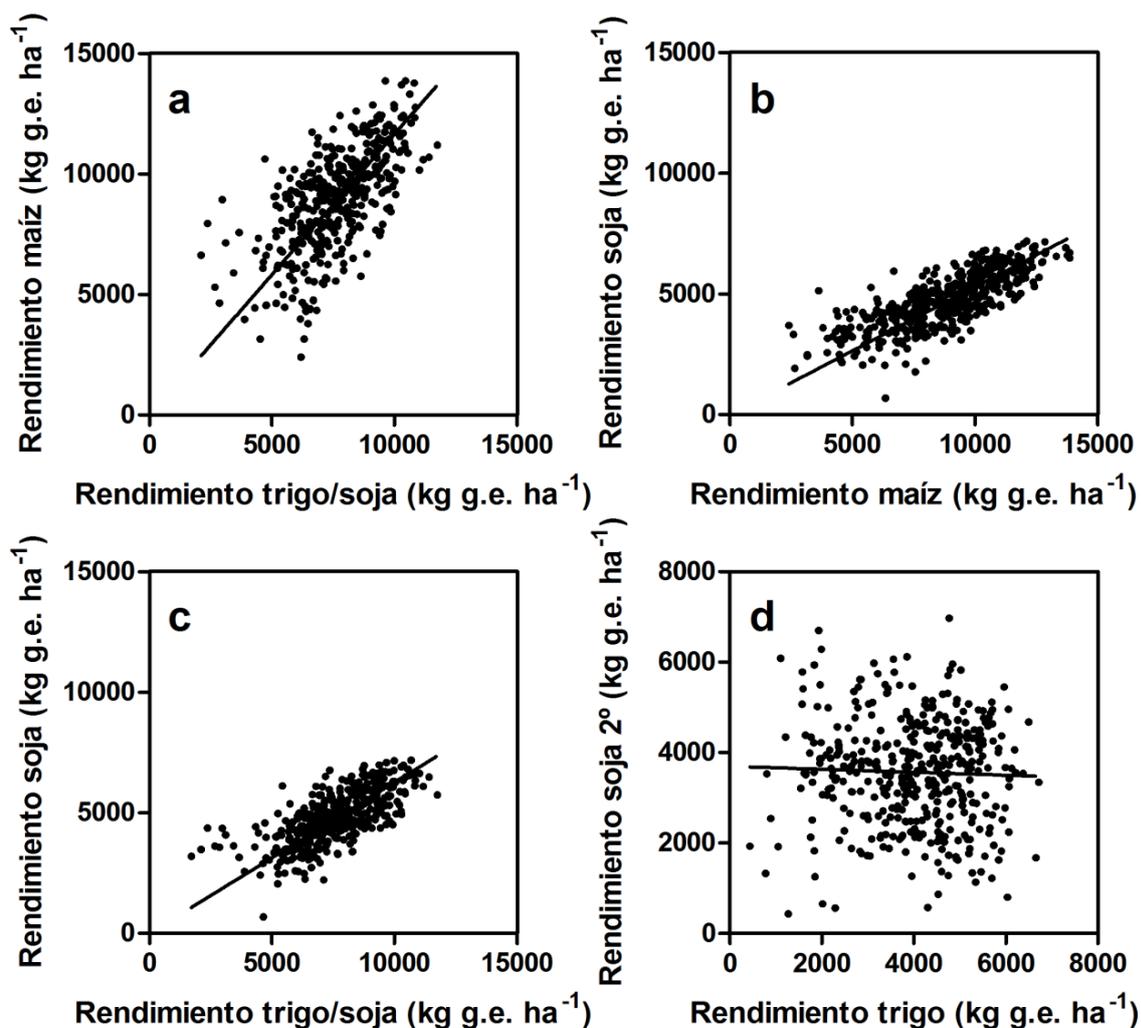


Figura 2.5. Correlaciones entre los rendimientos (a, b y c están forzadas por 0:0) de a) trigo/soja y maíz ($m=1,17$; $R^2=0,35$; $p<0,0001$); b) maíz y soja de primera ($m=0,53$; $R^2=0,52$; $p<0,0001$); c) trigo/soja y soja de primera ($m=0,63$; $R^2=0,43$; $p<0,0001$); y d) trigo y soja de segunda ($m=-0,04$; $R^2=0,00$; $p=0,4713$). Los datos incluidos en este análisis son los rendimientos promedio por grupo CREA para cada año, expresados en términos de kilogramos glucosa equivalente por hectárea (kg g.e. ha⁻¹).

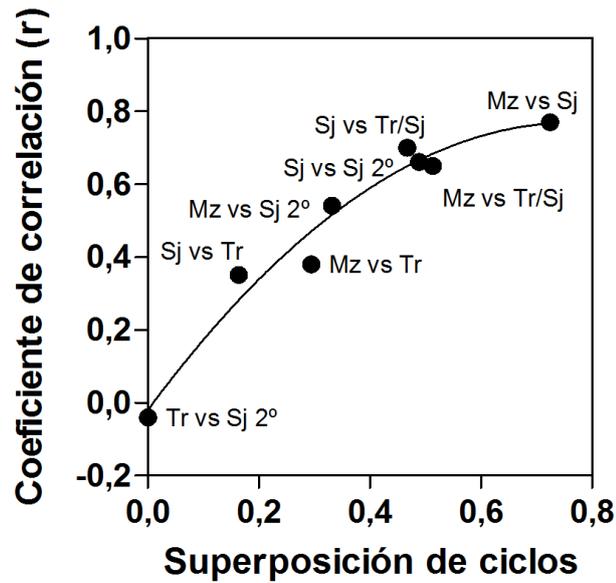


Figura 2.6. Coeficientes de correlación de Pearson, presentados en el Cuadro 3, en función de la superposición de los ciclos de crecimiento de los cultivos ($y = -0,02 + 2,06x - 1,35x^2$). El periodo de superposición de ciclos entre dos sistemas de cultivos se estimó como el número de días en los que ambos presentan cultivos en crecimiento dividido el número de días en los que al menos uno de ellos presenta cultivos en crecimiento. Se incluyeron todos los pares de comparaciones posibles entre maíz (Mz), soja (Sj), soja de segunda (Sj 2°), trigo (Tr) y el cultivo doble trigo/soja (Tr/Sj).

2.3.3 Patrones espaciales de rendimientos

La latitud, como era esperable, fue un determinante importante de la temperatura y las variables asociadas, tales como el Q primaveral y el período libre de heladas (Figura 2.7). Las temperaturas promedio de primavera y verano disminuyeron 0,64 y 0,36°C por cada grado de latitud incrementado, respectivamente. Asociado a esto, el período libre de heladas se redujo en 10,3 días por cada grado de aumento en la latitud. El Q primaveral también aumentó hacia latitudes elevadas.

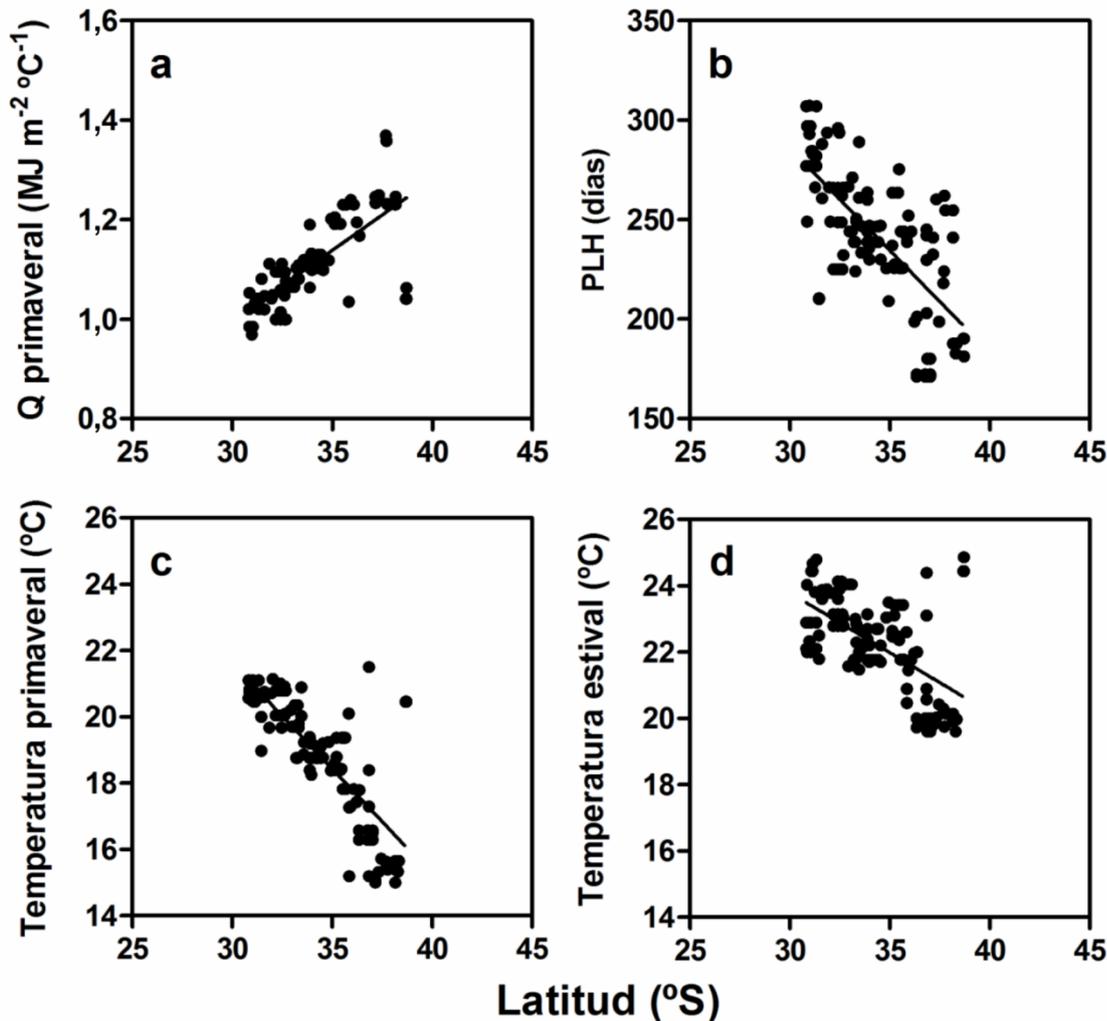


Figura 2.7. a) Cociente fototermal (Q) primaveral ($m=0,28$; $R^2=0,54$; $p<0,0001$); b) periodo libre de heladas (PLH; $m=-10,3$; $R^2=0,49$; $p<0,0001$); c) temperatura primaveral ($m=-0,64$; $R^2=0,63$; $p<0,0001$) y d) estival ($m=-0,36$; $R^2=0,34$; $p<0,0001$) de cada grupo CREA en función de la latitud ($^{\circ}$ S). Para realizar el análisis se utilizaron los valores promedio durante el periodo 2003-2008.

El análisis espacial de los rendimientos promedio (2003-2008) de los tres principales sistemas de cultivos de la región evidenció una gran variabilidad intra-regional (Figura 2.8). Los patrones de rendimientos fueron muy similares para maíz y soja. Las zonas de mayor productividad se encontraron en el centro de la región (zona núcleo pampeana), y los rendimientos disminuyeron hacia los bordes de la misma. En cambio, el cultivo de trigo tuvo los rendimientos más altos hacia el sudeste de la región, donde también se encontraron los menores rendimientos promedio de soja de segunda. Sin embargo, la suma de los rendimientos de trigo y soja de segunda tuvo un patrón muy similar al de los cultivos simples de maíz y soja.

En línea con el análisis de las pendientes (Figura 2.5), los mapas confirman que los rendimientos promedio de los cultivos simples de soja fueron inferiores a los del cultivo doble trigo/soja en todas las zonas de la región (IC 95%; Cuadro 2.1). Por el contrario, los rendimientos de este cultivo doble no superaron a aquellos de los cultivos simples de maíz en ninguna de las zonas de estudio (IC 95%; Cuadro 2.1). Sin embargo, se encontró una gran variabilidad al mapear los rendimientos del cultivo doble relativos a los de los cultivos simples dentro de la Región Pampeana. Estos rendimientos relativos se incrementaron hacia ambientes menos productivos, fuera de la zona núcleo pampeana; i.e. en el noreste (LIS y SFC) y sur de la región (SUO y MYS; Figura 2.9).

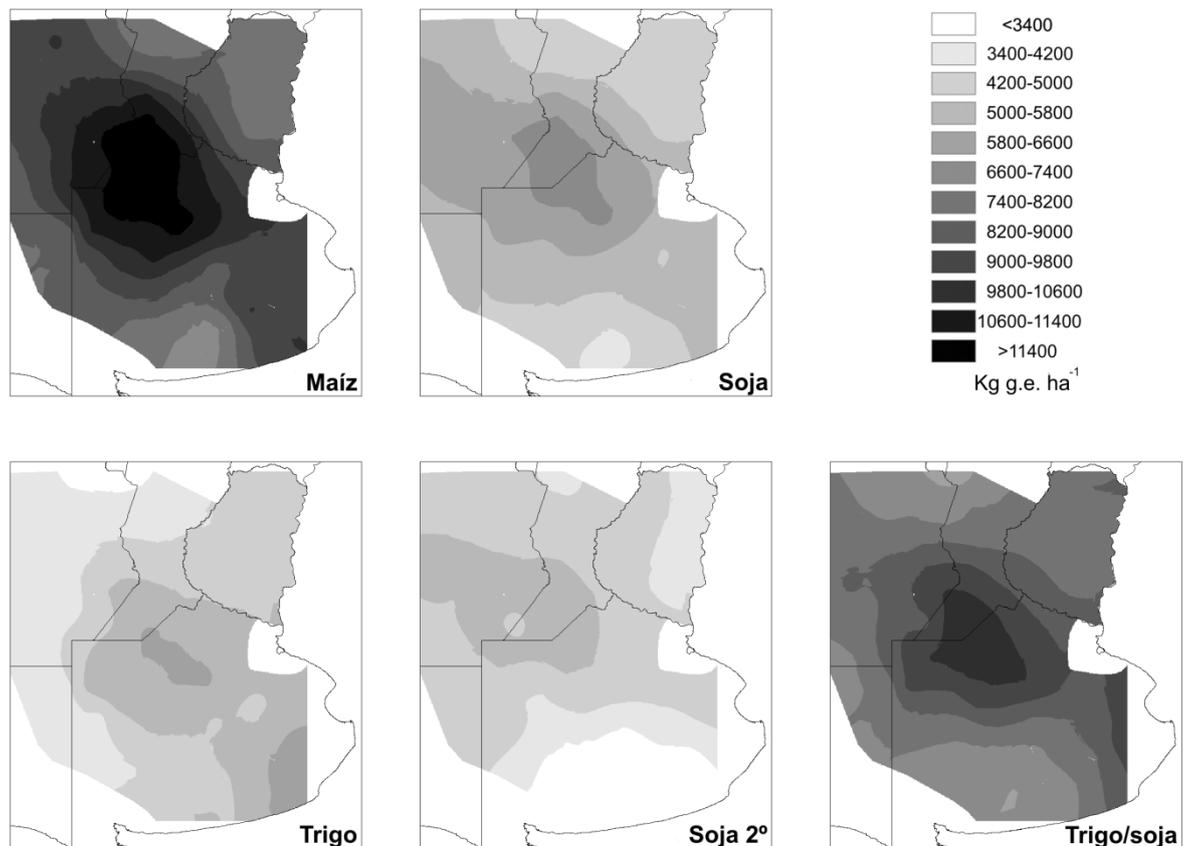


Figura 2.8. Distribución espacial de los rendimientos promedio de los sistemas de cultivos (Kriging ordinary), expresados como kilogramos de glucosa equivalente por hectárea (kg g.e. ha⁻¹), en la Región Pampeana durante el periodo 2003-2008. Los valores de los rendimientos se incrementan hacia las áreas oscuras.

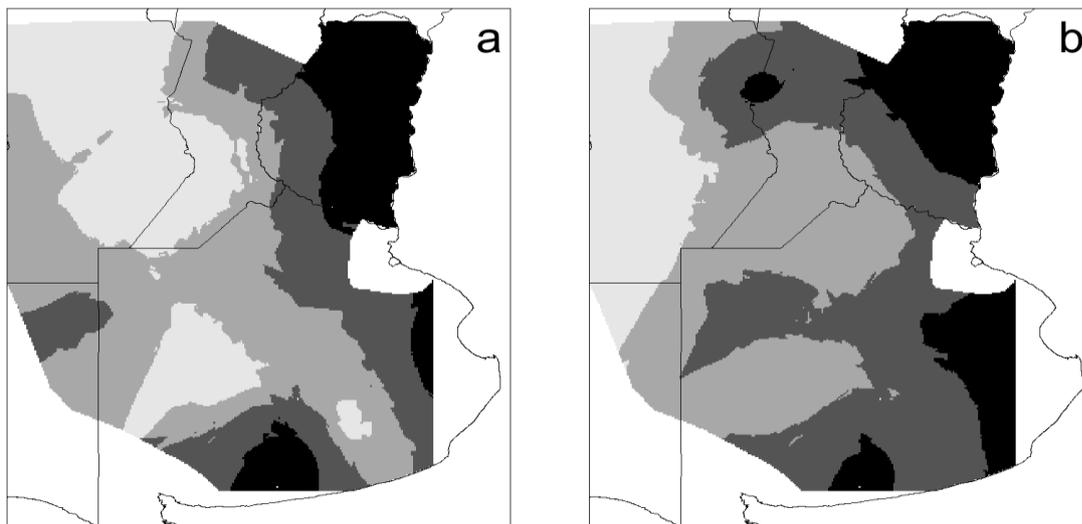


Figura 2.9. Rendimiento del cultivo doble trigo/soja relativo a aquellos de maíz (a) y soja (b) (Kriging ordinary), en promedio para el periodo 2003-2008. Los cuartiles (C) de rendimientos relativos se indican con diferentes colores, incrementándose hacia las áreas oscuras. Cuartiles para la relación entre el cultivo doble y maíz: 1°C=0,74-0,83; 2°C=0,83-0,88; 3°C=0,88-0,94; 4°C=0,94-1,04. Cuartiles para la relación entre el cultivo doble y soja: 1°C=1,31-1,48; 2°C=1,48-1,61; 3°C=1,61-1,74; 4°C=1,74-1,92.

2.4 Discusión

2.4.1 *Factores ambientales y rendimientos*

La lluvia y la temperatura fueron los principales factores ambientales asociados con los rendimientos de los cultivos estudiados (Cuadros 2.1-2.3; Figuras 2.2-2.4). La lluvia, como determinante principal de la disponibilidad de agua, se encuentra entre los factores limitantes más importantes de los sistemas de producción en secano a nivel global (Bunting et al., 1982; Hall et al., 1992); mientras que la temperatura es conocida como un determinante universal del desarrollo y los rendimientos potenciales de los cultivos (van Ittersum y Rabbinge, 1997). Ambos factores explicaron una fracción importante de las variaciones de rendimientos intra-regionales. Por otro lado, la radiación incidente presentó una leve variación en la región durante el periodo analizado (Cuadro 2.2).

En una llanura como la Región Pampeana, es esperable que las variaciones de la temperatura presenten patrones geográficos claros (por ejemplo, latitudinales; Figura 2.7) y que las lluvias estén sujetas a una gran variación interanual (Prohaska, 1976; Hall et al., 1992, Podestá et al., 1999). Por esta razón, resulta de gran interés analizar el efecto de estas variaciones sobre la productividad de los principales cultivos extensivos.

A diferencia de trabajos previos basados en modelos de simulación de cultivos (Magrin et al., 1997; Lobell et al., 2005; Asseng et al., 2011), en este capítulo el efecto de la temperatura fue evaluado con un análisis de frontera que determinó los máximos rendimientos alcanzados en condiciones de cultivo a campo. Los efectos de las precipitaciones fueron estudiados luego a través de la distancia entre los datos de rendimiento alcanzados y dicha frontera (Figura 2.4).

Los resultados presentados en este capítulo fueron obtenidos a partir de una extensa base de datos. Esto permitió determinar los efectos del ambiente sobre los rendimientos alcanzables de los cultivos simples y dobles, para así definir el conjunto de condiciones ambientales que favorecen el logro de una productividad mayor en los cultivos dobles, tanto en términos absolutos como relativos a los cultivos simples. Esta información sería útil para identificar nuevas regiones en el mundo dónde la implementación de cultivos dobles contribuiría a incrementar la productividad de la tierra.

2.4.1.1 Efectos de la temperatura sobre los cultivos

El análisis de frontera demostró que los mayores rendimientos de maíz y de soja se obtuvieron con temperaturas moderadas durante el verano (Figura 2.3). Por un lado, por debajo del rango de temperaturas óptimas, los rendimientos son comúnmente afectados como resultado de una menor eficiencia en el uso de la radiación (Larcher, 1980; Andrade et al., 1992; Magrin et al., 1997), y debido a la reducción del periodo libre de heladas (Figura 2.7; Wang et al., 2007, 2014). Esto último implica el uso de cultivares de ciclo más corto y mayores riesgos de daño por efecto directo de las bajas temperaturas (Baker et al., 1989; Kurosaki y Yumoto, 2003; Boote et al., 2005; Ohnishi et al., 2010). Por otro lado, los rendimientos por encima del rango óptimo se afectaron porque el desarrollo de los cultivos se acelera acortándose la longitud del ciclo. Esto tiene como consecuencia la reducción de la intercepción de radiación durante las etapas de definición del rendimiento (Andrade et al., 1996; Andrade y Sadras, 2000). Otros autores encontraron patrones similares al analizar los efectos del cambio climático sobre los rendimientos de maíz y de soja en áreas templadas de Estados Unidos, África y China (Lobell y Asner, 2003; Lobell et al., 2011; Wang et al., 2014).

A diferencia de lo ocurrido con los cultivos simples de verano, los mayores rendimientos de trigo se obtuvieron con temperaturas promedio más bajas durante la primavera ($<18,3$ °C; Figura 2.3b), con altos valores de cociente foto-termal (Q; Figura 2.2, Cuadro 2.3; Magrin et al., 1993; Menéndez y Satorre, 2007). Para este cultivo, es conocido que las altas temperaturas durante la estación de crecimiento afectan el rendimiento en condiciones de campo (Evans et al., 1975; Manderscheid et al., 2003; Asseng et al., 2004; Lobell y Ortiz-Monasterio, 2007; García et al., 2015). Por el contrario, los rendimientos máximos de soja de segunda disminuyeron hacia ambientes frescos (temperaturas estivales promedio $<21,2$ °C), con mayor impacto que aquel

hallado en soja de primera. La fecha de siembra tardía, luego de la cosecha del trigo, expone a este cultivo a períodos con temperaturas más frías cuando se define su rendimiento hacia el fin del verano (Calviño et al., 2003; Monzon et al., 2007). Además, la cosecha del trigo se da con posterioridad en ambientes fríos hacia el sur de la región, incrementando el retraso en la fecha de siembra de soja de segunda.

2.4.1.2 Efecto de la lluvia sobre los rendimientos

Las precipitaciones tuvieron efectos significativos sobre los rendimientos de todos los cultivos analizados (Cuadro 2.3). Más aún, la distancia entre los rendimientos relevados y la regresión de frontera estuvo fuertemente explicada por la cantidad de lluvia. Como era de esperar, todos los cultivos redujeron la distancia al rendimiento potencial a medida que se incrementó la disponibilidad de agua de lluvia durante su ciclo de crecimiento (Figura 2.4). Sin embargo, la importancia relativa de esta variable fue mayor para los cultivos de soja de segunda, los que resultaron fuertemente afectados ante escenarios de bajas precipitaciones, posiblemente debido a la baja cantidad de agua en el suelo a la madurez del trigo (Hamblin y Tennant, 1987) y a que la siembra de la soja de segunda suele ser inmediatamente luego de la cosecha de trigo. Por el contrario, en trigo, la respuesta fue de menor magnitud, ya que es cultivado durante la estación fría, con baja demanda hídrica y, frecuentemente, buena disponibilidad de agua inicial en el suelo (Dardanelli et al., 2004).

Si bien se logró caracterizar la importancia de la lluvia sobre los rendimientos logrados, una gran parte de la variabilidad se debió a otros factores no analizados. Entre ellos, pueden destacarse el nivel inicial de agua almacenada, la infiltración efectiva, la capacidad de retención hídrica del suelo, el déficit de presión de vapor y el momento específico del estrés hídrico relativo al periodo de determinación de los rendimientos que también influyen la respuesta del cultivo a la lluvia.

Con altos niveles de precipitaciones aún se encontraron distancias a la regresión de frontera de al menos 15% en promedio. Esto señala la importancia de otros factores relacionados con la temperatura, tales como la amplitud térmica y los efectos directos de temperaturas extremas (p.ej. golpe de calor); o bien, debido a cuestiones tecnológicas o de manejo de los cultivos que incluyen deficiencias nutricionales o adversidades bióticas. Estos resultados son consistentes con investigaciones previas sobre los umbrales de rendimientos en la Región Pampeana (Monzon et al., 2013; Aramburu Merlos et al., 2015).

2.4.2 Análisis comparado de los rendimientos

Durante el periodo evaluado, los rendimientos de los cultivos simples de maíz y de soja estuvieron altamente correlacionados (Figura 2.5), porque presentan

requerimientos ambientales y estaciones de crecimiento similares (Figura 2.6). El trigo y la soja de segunda, en cambio, exploraron distintos periodos del año donde las condiciones en las que se definen los rendimientos son muy diferentes. La falta de superposición de sus ciclos (Figura 2.6), además de la gran dependencia de la soja de segunda a las condiciones climáticas posteriores a la madurez del trigo, determinaron que los rendimientos de ambos cultivos no estuvieran correlacionados (Figuras 2.2 y 2.5d). Si bien, esto puede ser interpretado como una posibilidad para obtener estabilidad productiva, cuando se consideró la productividad anual (trigo + soja de segunda) se obtuvieron altas correlaciones con la de los cultivos simples de maíz y soja (Cuadro 2.3; Figuras 2.2, 2.5a y c), dado que presentan gran superposición de las estaciones de crecimiento (Figura 2.6).

En la búsqueda por lograr los mayores rendimientos con el cultivo doble trigo/soja de segunda, los factores tendieron a contrabalancearse en la región. Si bien las temperaturas primaverales frescas permiten que los rendimientos de trigo sean mayores (Cuadro 2.3; Figuras 2.2 y 2.3), también reducen el periodo libre de heladas (Figura 2.7), afectando así los rendimientos de la soja de segunda (Calviño et al., 2003). Por el contrario, altas temperaturas primaverales reducen los rendimientos máximos de trigo (García et al., 2015), pero extienden el periodo libre de heladas permitiendo alcanzar altos rendimientos con soja de segunda. Además de estos compromisos, son necesarios altos niveles de precipitaciones para compensar la baja disponibilidad hídrica a la siembra de este cultivo de segunda.

2.4.3 Patrones espaciales de rendimientos

La temperatura resultó ser un factor determinante de la productividad de los sistemas de cultivo, incluso de su factibilidad. Los mayores rendimientos de los cultivos simples de verano se concentraron en la zona central de la Región Pampeana, mientras que los rendimientos de trigo fueron mayores hacia el sur de la región (Figura 2.8). El periodo libre de heladas y la temperatura mostraron patrones crecientes hacia el norte (Figura 2.7), permitiendo altos rendimientos de soja de segunda en esa zona (Figura 2.8). La interacción de los factores ambientales preponderantes para los cultivos de verano (periodo libre de heladas, temperatura y lluvia) e invierno (temperatura, Q primaveral y lluvia) determinaron un patrón de rendimientos consistente entre maíz, soja y trigo/soja, que coincidieron en alcanzar los máximos rendimientos en el centro de la Región Pampeana (SSF, NBA y OES; Figura 2.8). Este patrón observado puede atribuirse a la interacción de la temperatura con la disponibilidad de agua (considerando lluvias y agua almacenada en el suelo). Las precipitaciones anuales disminuyen desde el noreste hacia el sudoeste, pero los suelos profundos y francos se encuentran en la zona central mencionada. Teniendo en cuenta que los rendimientos del cultivo doble estuvieron correlacionados con aquellos de los cultivos simples de verano, y que trigo/soja demanda grandes cantidades de recursos, era esperable que los patrones de rendimientos resultaran similares a estos últimos.

Más allá de que los patrones de productividad de maíz, soja y del cultivo doble trigo/soja fueron similares, las magnitudes de los rendimientos difirieron entre sistemas de producción. El maíz y el cultivo doble trigo/soja fueron más productivos que el cultivo simple de soja en toda la Región Pampeana. El maíz normalmente es más eficiente que la soja en el uso de la radiación debido a su metabolismo C4, un coeficiente de extinción lumínico menor (Hesketh, 1963) y a la ausencia de costos energéticos asociados con la simbiosis. El cultivo de soja, por el contrario, es altamente dependiente del comportamiento de la fijación biológica de N. Este cultivo, además, requiere de concentraciones de N foliar muy superiores a las de maíz y trigo para alcanzar los máximos niveles de tasa fotosintética (Sinclair y Horie, 1989). Por otro lado, el cultivo doble aumenta la captura de recursos en comparación con los cultivos de soja de primera (Caviglia et al., 2004; Van Opstal et al., 2011). Con vistas a aumentar la producción de granos de la región, los resultados evidenciaron grandes oportunidades para la expansión de maíz y del cultivo doble. Además, los rendimientos relativos del cultivo doble se incrementaron hacia algunas de las áreas alejadas de la zona núcleo (LIS, SFC, SUE, MYS y SUO).

Los rendimientos relativos del cultivo doble se incrementaron hacia zonas menos productivas en el noreste de la región, siguiendo las isohietas históricas de precipitaciones anuales (Hall et al., 1992). En esta zona, la oferta anual de agua supera ampliamente la demanda de los cultivos simples de verano (Dardanelli et al., 2004). La implantación de trigo, previo a la soja de segunda, permitió la producción de biomasa durante el invierno y la primavera a partir del agua excedente. Sumado a esto, los rendimientos promedio de la soja de segunda fueron similares a los de la soja de primera (Figura 2.8), dado que el retraso en la fecha de siembra tendría poco impacto en climas cálidos. También, hubo altos rendimientos relativos en el sur, como consecuencia de rendimientos crecientes de trigo y decrecientes de maíz y de soja (Figura 2.9).

Solo el 15% del área considerada fue cultivada con cultivos dobles en LIS durante el periodo analizado por productores CREA (Cuadro 2.1), indicando que, si se produce una nueva expansión de esta práctica, el margen de adopción es amplio en dicha zona. Sin embargo, las posibilidades de expansión están sujetas a factores externos, como los precios internacionales y las políticas de mercado nacionales. De hecho, los factores locales han reducido el área cultivada con trigo en los últimos 5 años, tal como se mencionó en la introducción.

2.5 Conclusiones y comentarios finales

El capítulo incluye resultados derivados de la implementación de un análisis simple e innovador para determinar los efectos de ciertas variables ambientales sobre los rendimientos de los principales sistemas de cultivo de la Región Pampeana de Argentina. Así, se analizaron las interacciones complejas inherentes a los sistemas de producción extensivos y a la escala de trabajo elegida. Se identificaron respuestas diferenciales de cada cultivo ante las variaciones del ambiente, aun cuando los patrones espaciales de producción fueron similares. Sin embargo, los rendimientos de maíz siempre fueron los mayores y los de soja los menores. El cultivo doble trigo/soja fue más productivo que la soja de primera en cualquier lugar de la región, pero sus rendimientos tendieron a ser menores a los alcanzados en maíz. Dado que actualmente casi el 60% de área cultivada en Argentina es sembrada con soja de primera, los resultados indican que es factible incrementar la productividad de los sistemas sin dejar de cultivar soja, simplemente expandiendo el área con cultivos dobles.

Los mayores rendimientos de los tres sistemas de cultivo se lograron en la zona núcleo pampeana (norte de la provincia de Buenos Aires, sur de Sante Fe y sudeste de Córdoba). Sin embargo, los rendimientos relativos del cultivo doble aumentaron hacia algunas áreas de menor productividad, como la provincia de Entre Ríos y el sur de la provincia de Buenos Aires. Hacia el noreste de la Región Pampeana, la soja de segunda presentó rendimientos similares a los de la soja de primera, mientras que, hacia el sur, los rendimientos de los cultivos de primera fueron bajos y los de los trigos se incrementaron. No obstante, en cualquiera de los dos casos, las precipitaciones estivales tuvieron que ser abundantes para mantener rendimientos altos con cultivos de soja de segunda.

El cultivo doble, a pesar de que incrementaría el uso de recursos en comparación con los cultivos simples de verano, desaprovecha una fracción importante de la radiación incidente durante el periodo de máxima oferta (diciembre-enero), el que se extiende entre el secado del cultivo invernal y las etapas vegetativas iniciales de los cultivos de segunda. En este periodo, las altas temperaturas estivales favorecen la eficiencia en el uso de la radiación de cultivos como maíz y soja, siempre que otros recursos no limiten la fotosíntesis (Norman y Arkebauer 1991; Cirilo y Andrade 1994). Un modo viable de aumentar la productividad de los sistemas intensificados sería concentrarse en los meses de diciembre y enero. Por ejemplo, podrían explorarse diferentes etapas con cultivares de trigo, u otros cultivos invernales alternativos con ciclo más corto, como arveja o cebada, que permitan anticipar la siembra de la soja de segunda para aumentar la captura y/o la eficiencia en el uso de los recursos capturados. Esta última alternativa será puesta a prueba en los capítulos siguientes.

Por último, los estudios a escala regional, tal como el que aquí se presenta, no consideran las interacciones entre genotipos, ambiente y manejo de cultivo que podrían modificar sustancialmente los resultados a nivel de lote de producción. Sin embargo, el

estudio de los rendimientos de grupos de productores y las variables ambientales permitió resaltar la importancia relativa de cada una de esas variables en la definición de los rendimientos y para identificar los patrones de productividad a escala regional. Este tipo de análisis puede utilizarse como un primer paso para evaluar nuevas formas de producción y para el desarrollo de sistemas más productivos que incluyan diferentes especies cultivadas y tecnologías de producción innovadoras en esta u otras regiones.

-CAPÍTULO 3-

**3 SISTEMAS DE CULTIVOS TRADICIONALES Y EMERGENTES EN LA
REGIÓN PAMPEANA: USO DE RECURSOS Y PRODUCTIVIDAD³**

³Los contenidos de este capítulo han sido publicados en Andrade, J.F., Poggio, S.L., Ermácora, M. y Satorre, E.H. 2015. Productivity and resource use in intensified cropping systems in the Rolling Pampa, Argentina. *European Journal of Agronomy*, 67: 37-51.

3.1 Introducción

La Región Pampeana se ha caracterizado por su tradición triguera desde los inicios de la expansión de la agricultura. Hacia fines del siglo XX, la agricultura pampeana se concentró notablemente en la producción de cultivos durante estación cálida, como resultado de la expansión primero del maíz y, más recientemente, de la soja (Caviglia y Andrade, 2010). Por otro lado, la introducción del cultivo de soja y de la siembra directa promovieron que gran parte de la superficie cosechada con trigo comenzara a cultivarse también con soja de segunda, definiendo así un planteo productivo conocido como cultivo doble. Estos sistemas, que constan de sembrar consecutivamente dos cultivos por año en una misma superficie, en comparación con los cultivos simples, incrementan la captura de la oferta anual de los recursos durante la estación de crecimiento (Caviglia et al., 2004; Van Opstal et al., 2011).

Sin embargo, cuando la soja se cultiva inmediatamente luego de cosechar el trigo, su rendimiento es sensiblemente menor que cuando se realiza como cultivo único. Si bien la disminución de la productividad resulta principalmente del retraso en la fecha de siembra (Calviño et al., 2003; Monzon et al., 2007), también puede atribuirse a la menor disponibilidad hídrica provocada por el cultivo de invierno antecesor (Hamblin y Tennant, 1987) y a la ausencia de un periodo de barbecho entre la cosecha del trigo y la siembra de la soja de segunda. Estas razones motivan la evaluación de cultivos invernales alternativos al de trigo. Así, es esperable que haya cultivos invernales que, debido a características como madurez más temprana y/o diferente dinámica de uso del agua, contribuyan a aumentar la productividad de cultivo de soja sembrado a continuación. En consecuencia, los cultivos dobles resultantes también incrementarían la productividad anual.

Recientemente, restricciones impuestas a la comercialización de trigo promovieron el retroceso en la superficie dedicada al cultivo doble trigo/soja (Andrade y Satorre, 2015). Este planteo fue reemplazado por otros sistemas de producción agrícolas dependiendo del régimen de tenencia de la tierra. Por un lado, los productores arrendatarios incrementaron la proporción del área destinada a cultivos simples de verano, especialmente de soja, lo que acrecentó el dominio de este cultivo en los paisajes de la región. En cambio, muchos productores propietarios de la tierra optaron por la búsqueda de alternativas productivas para la estación invernal. Estos productores mantuvieron, en gran parte, los sistemas de cultivo doble con el propósito de obtener mayores rendimientos por unidad de superficie y, a su vez, lograr estabilidad económica y productiva. De esta manera, en gran parte de la Región Pampeana, se motivó la adopción masiva del cultivo de cebada y, en menor medida, del de colza. Paralelamente, también emergieron algunas alternativas de adopción más localizada, como es el caso del cultivo de arveja en el norte de la provincia de Buenos Aires (<http://www.siiia.gov.ar>).

Los cultivos invernales alternativos al trigo modifican los patrones de utilización de los recursos durante el invierno y la primavera. Por lo tanto, en los cultivos dobles, el reemplazo del trigo por otro cultivo invernal afectará indefectiblemente el uso de los recursos por los cultivos de segunda. Además, la implantación de los cultivos de segunda está fuertemente condicionada por el tipo de antecesor, dado que el período de barbecho entre cultivos es acotado en estos planteos intensificados. Cada uno de los cultivos mencionados anteriormente se diferencia del resto en numerosos factores; por ejemplo, los momentos de siembra y de cosecha y, en consecuencia, la longitud del ciclo, la demanda de recursos durante el ciclo, el tipo y la cantidad de residuos de cosecha, las condiciones edáficas e hídricas del suelo posteriores a la cosecha, entre otras (Bullock, 1992). Estas características definen el nivel de complementación entre las especies que forman cultivos dobles, sobre todo en cuanto a la captación y uso de los recursos y, por lo tanto, la productividad de los cultivos en la secuencia.

El maíz, en menor medida que la soja, también es considerado como un posible cultivo de segunda (Mercau y Otegui, 2014). Algunos trabajos han estudiado la ventaja nutricional de cultivar maíz luego de leguminosas sembradas como cultivos de cobertura durante el invierno (Clark et al., 1994; Clark et al., 1995). En la Región Pampeana no se recomienda cultivar especies con ciclos largos como antecesores del maíz, a causa de la gran susceptibilidad de este cultivo al estrés hídrico (Otegui et al., 1995). Sin embargo, todavía no han sido estudiados los efectos de incluir una leguminosa para cosecha, especialmente si es de ciclo corto, sobre la disponibilidad de recursos, y por lo tanto, sobre el rendimiento de maíz.

En los últimos años se han analizado muchas estrategias para aumentar la productividad de las tierras agrícolas. Una opción es elegir cultivares de ciclo más largo que los usuales, de modo de abarcar una mayor proporción de la estación de crecimiento (Capristo et al., 2007). Sin embargo, los posibles incrementos en la producción de biomasa no necesariamente son convertidos en granos (Egli, 2011). Alternativamente, dado que la agricultura en la Región Pampeana se centra principalmente en la producción de cultivos de verano, el diseño de secuencias intensificadas está orientándose a lograr el uso de una mayor proporción de los recursos disponibles durante el invierno (Caviglia y Andrade, 2010). Las innovaciones en el manejo de los cultivos apuntan al diseño de sistemas que sean ecológicamente más complejos como resultado de cultivar una mayor variedad de especies. No obstante, el diseño de estos sistemas debe basarse en tecnologías disponibles y de manejo sencillo, para que sean adoptadas en el corto plazo. Los cultivos dobles son una alternativa factible que cubre dichos requisitos. Por todo lo mencionado, la hipótesis evaluada en este capítulo postula que la siembra de un cultivo estival a continuación de otro invernal, conformando así un cultivo doble, contribuye a ocupar una mayor fracción de la estación de crecimiento, lo que, consecuentemente, incrementa el uso de los recursos disponibles. Sin embargo, reemplazar al trigo/soja por otros cultivos dobles alternativos, que incluyan cultivos invernales con menor explotación de recursos y/o de cosecha anticipada, incrementará

los rendimientos de los cultivos de segunda y, en consecuencia, el rendimiento global del cultivo doble.

En este Capítulo se aborda el objetivo específico II “*Valorar las posibilidades de aumentar la productividad anual como resultado de mayores capturas y/o eficiencias en el uso de los recursos, mediante la adopción de sistemas de cultivos dobles alternativos al de trigo/soja*”. Para alcanzar este objetivo, se llevaron a cabo experimentos a gran escala en tres ambientes contrastantes de la Pampa Ondulada, Argentina, y simulaciones en computadora, con el fin de explicar algunos de los aspectos relacionados con la definición de la productividad y el uso de recursos de los sistemas de producción de granos.

3.2 Materiales y métodos

3.2.1 Sitio y condiciones ambientales

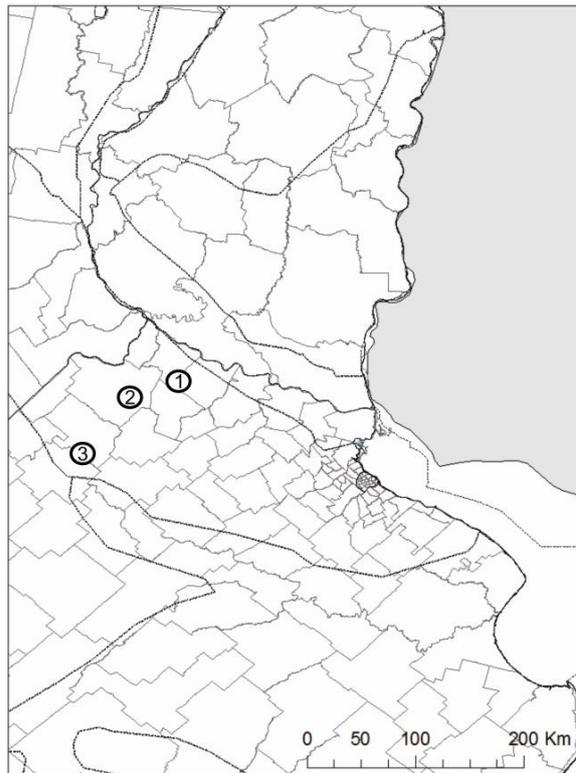


Figura 3.1. Sitios experimentales: San Pedro (1), Pergamino (2) y Junín (3).

Se realizaron tres experimentos en el norte de la provincia de Buenos Aires (NBA en Capítulo 1), dentro de la Pampa Ondulada. Los experimentos se instalaron en establecimientos agrícolas próximos a las localidades de San Pedro (33° 47' S; 60° 00' O; 1), Pergamino (33° 55' S; 60° 23' O; 2) y Junín (34° 23' S; 60° 48' O; 3; Figura 3.1). Los experimentos fueron llevados a cabo durante tres años, entre marzo de 2010 y marzo de 2013. Los resultados de este capítulo corresponden al primer año experimental. En todos los sitios los suelos eran Molisoles, Argiudoles Típicos, con 3% de materia orgánica, aproximadamente, pero con ciertas diferencias en sus horizontes argílicos (B_t ; entre 0,4 y 0,8 m de profundidad). El contenido de arcilla en el horizonte argílico es alto en San Pedro (50%; Serie Ramallo), algo menor en Pergamino (38%; Serie Urquiza) e inferior en Junín (28%; Serie Rojas; INTA, 1989).

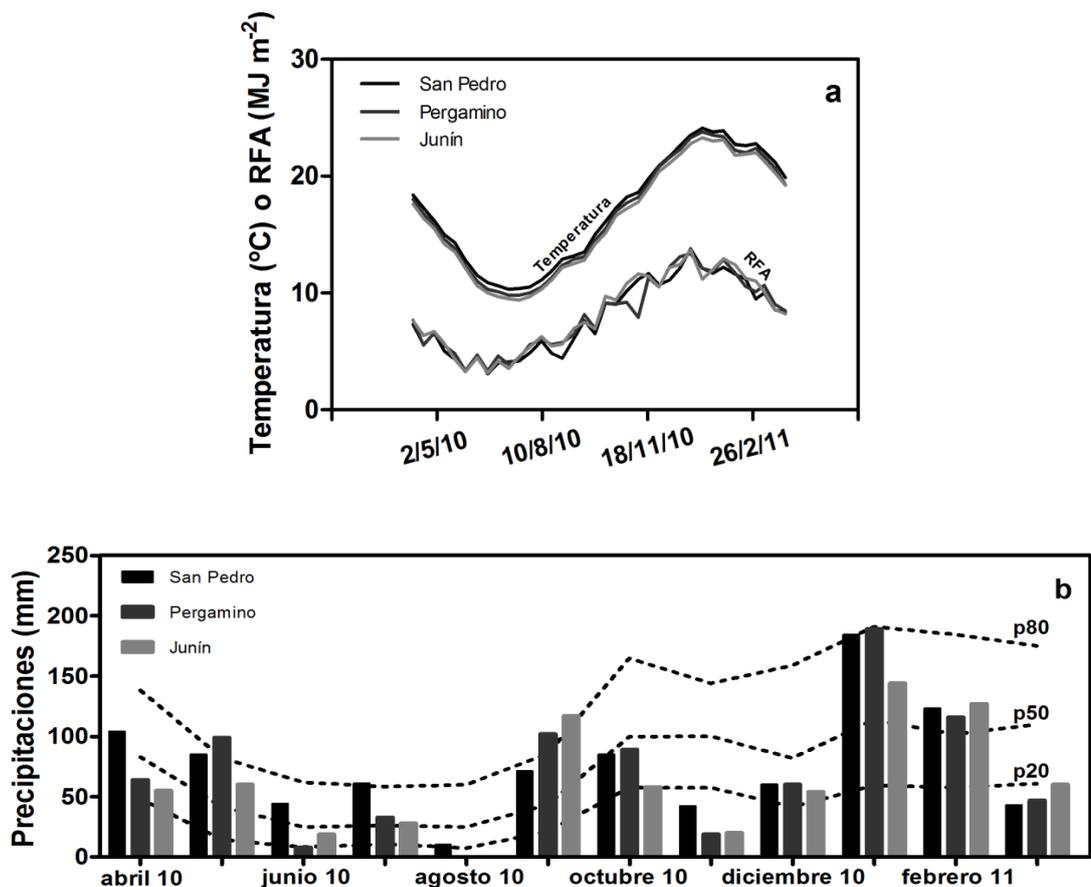


Figura 3.2. Condiciones ambientales entre abril de 2010 y marzo de 2011 para las tres localidades experimentales. a) Temperatura (°C) y radiación fotosintéticamente activa (RFA; MJ m⁻²). b) Precipitaciones durante la estación y los percentiles históricos (p20, p50, p80; 1971-2010; líneas punteadas), expresados en milímetros (mm).

3.2.2 *Diseño experimental y manejo*

En los experimentos se evaluaron siete sistemas de cultivos diferentes (denominados en adelante tratamientos), los que incluyeron dos cultivos simples de verano de maíz y de soja y cinco cultivos dobles, formados por secuencias de una especie invernal y otra estival. Los sistemas de cultivos dobles evaluados fueron colza/soja, cebada/soja, trigo/soja, arveja/soja y arveja/maíz. Cada establecimiento contó con un experimento en bloques completos aleatorizados con 2 repeticiones. Los ensayos fueron instalados y manejados con la maquinaria utilizada usualmente en los sistemas de producción de granos de la zona. La siembra se realizó directamente sobre el rastrojo del cultivo antecesor (soja en todos los casos). Todas las parcelas tuvieron 22 metros de ancho y 200 metros de largo, definiendo una superficie de 4400 m² por parcela, por lo que cada experimento cubrió un área ligeramente mayor a seis hectáreas.

Las especies y las secuencias de cultivos fueron elegidas según su relevancia en la zona de estudio. Los cultivos simples de maíz y soja y el cultivo doble trigo/soja son los sistemas de cultivo más difundidos en la región, mientras que los tratamientos restantes son cuatro alternativas de cultivos dobles que se han introducido recientemente en los sistemas productivos de la región, lo que sugiere que su cultivo es viable en términos económicos y ecológicos.

Los genotipos empleados (Cuadro 3.1) poseen buen comportamiento en cuanto a los niveles de productividad logrados en la zona de estudio. Las fechas de siembra, la densidad de plantas y el espaciamiento entre hileras se establecieron de acuerdo a las recomendaciones técnicas para alcanzar altos rendimientos en la región (Cuadro 3.1). El espaciamiento entre hileras varió levemente entre sitios dependiendo de la sembradora disponible en cada establecimiento. Por otro lado, los cultivos de soja de segunda fueron sembrados inmediatamente después de la cosecha de los cultivos invernales, mientras que los cultivos de maíz de segunda se sembraron cuando la humedad del suelo asegurara la germinación de las semillas.

Cuadro 3.1. Genotipo, fecha de siembra, densidad objetivo (pl m^{-2}) y distancia entre hileras (cm) utilizados para todos los cultivos en San Pedro (SP), Pergamino (Pe) y Junín (Ju).

Cultivo	Genotipo			Fecha de siembra			Densidad (pl m^{-2})	Distancia entre hileras(cm)		
	SP	Pe	Ju	SP	Pe	Ju		SP	Pe	Ju
Colza	SRM 2836	SRM 2836	SRM 2836	11/5	22/4	26/4	60	20	21	21
Cebada	Scarlett	Scarlett	Scarlett	10/6	9/6	17/6	280	17,5	21	17,5
Trigo	SRM Nogal	Bag. 11	Bag. 11	10/6	9/6	17/6	250	17,5	21	17,5
Arveja	Viper	Viper	Viper	26/7	17/7	14/7	90	17,5	21	17,5
Maíz	DK 747	DK 747	DK 747	25/9	18/9	23/9	8	50	52,5	52,5
Maíz 2°	DK 747	DK 747	DK 747	6/12	14/12	4/12	7	50	52,5	52,5
Soja	DM 4670	DM 4670	DM 3810	20/10	19/10	25/10	30	35	21	35
Soja 2°	A 4990	DM 4670	DM 3700	Cuadro 2	Cuadro 2	Cuadro 2	37	35	21	35

La fertilización se realizó antes de la siembra de los cultivos, siguiendo las recomendaciones para la zona de estudio. Para ello, el contenido de nutrientes en el suelo se analizó en cada parcela previo a la siembra de los cultivos. Además, los cultivos de soja y de arveja fueron inoculados antes de su siembra (*Bradirizhobium japonicum* y *Rhizobium leguminosarum* var. *pisi*, respectivamente). El control de malezas, plagas y enfermedades se realizó, en todos los casos, mediante control químico. Las aplicaciones de agroquímicos se realizaron con pulverizadoras autopropulsadas con el objetivo de mantener los niveles de estos componentes bióticos por debajo de umbrales que afecten el rendimiento de los cultivos.

3.2.3 Mediciones y análisis

Se midió la productividad de cada una de las secuencias propuestas y de los cultivos componentes de cada secuencia. La productividad se calculó por medio del rendimiento en grano y la biomasa aérea, expresándose en ambos casos como masa producida (kilogramos) por unidad de superficie (hectárea). El grano se recolectó con máquinas cosechadoras, propiedad de cada establecimiento. El peso de la masa de granos cosechada se obtuvo transfiriendo los mismos a una tolva con balanza, descontándose luego su contenido de humedad. Conociendo la superficie de cada parcela, se calculó el rendimiento expresado como peso seco de los granos equivalente a una hectárea. La producción de biomasa aérea se obtuvo luego de alcanzada la madurez fisiológica y previo a la cosecha del cultivo. En cada parcela se tomaron al menos tres sub-muestras de 1 metro cuadrado en todos los cultivos. En el caso del maíz, el índice de cosecha se calculó a partir de 15 plantas tomadas al azar. Luego, la biomasa aérea total de maíz se estimó a partir de los datos de rendimiento. El secado de las muestras de biomasa se realizó en estufa a 60° C hasta alcanzar peso constante. Finalmente, el aporte de rastrojo se calculó mediante la diferencia entre la biomasa total y el rendimiento en grano.

Asimismo, se calculó la productividad total de los sistemas evaluados, sumando los rendimientos en grano de cada uno de sus componentes. Para ello, en primer lugar, todos los rendimientos se expresaron en unidades equivalentes de glucosa (kilogramos equivalentes de glucosa, kg g.e.). Tal como se explicó en el capítulo anterior (Sección 2.2.1), los equivalentes de glucosa son la cantidad de glucosa necesaria para producir un kilogramo de grano, la que depende de la composición química de los granos. En función de la composición de los granos de cada cultivo, se estableció que se requieren 2,18, 1,20, 1,28, 1,26, 1,32, y 1,86 kg g.e. por kg de grano de colza, cebada, trigo, arveja, maíz y soja, respectivamente.

La captura de recursos fue medida en todos los tratamientos. La radiación incidente, el agua y los nutrientes fueron considerados en los análisis. La radiación fotosintéticamente activa (*RFA*) durante el ciclo de crecimiento (desde emergencia a madurez), la eficiencia de intercepción (e_i), la eficiencia en el uso de la radiación para producir biomasa (*EURb*) y el índice de cosecha (*IC*) fueron considerados como los determinantes ecofisiológicos del rendimiento de los cultivos (Ecuación 3.1).

$$Rto = RFA_i * e_i * EURb * IC \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

La eficiencia de intercepción de radiación (e_i) se midió periódicamente (10 a 15 días) con un sensor cuántico (Cavabar, Cavadevices, Argentina). En cada parcela, las mediciones se realizaron alrededor de mediodía (11 a 13 h), ubicando la barra sobre el canopeo del cultivo para determinar la radiación incidente, y por debajo para medir la radiación incidente no interceptada por el mismo (RFA_{ni}). De esta manera, se estimó la eficiencia de intercepción de radiación (e_i) al momento de cada medición (Ecuación 3.2). Luego, las eficiencias de intercepción entre mediciones se calcularon por extrapolación lineal.

$$e_i = 1 - \left(\frac{RFA_{ni}}{RFA} \right) \quad (\text{Ecuación 3.2})$$

Los datos de radiación global incidente ($MJ\ m^{-2}$) se obtuvieron de centrales meteorológicas ubicadas en las localidades próximas a los lotes experimentales. Los valores fueron convertidos a radiación fotosintéticamente activa incidente (*RFA*) multiplicando los de radiación global por 0,45 (Monteith, 1965). Con los datos de *RFA* y e_i diaria se calculó la *RFA* interceptada (RFA_i) durante todo el ciclo de cada cultivo.

El consumo de agua de cada cultivo se midió tomando muestras de suelo a la siembra y en madurez fisiológica, a intervalos de 20 cm desde la superficie hasta 180 cm de profundidad. Se aplicó el método gravimétrico, que consiste en pesar las muestras al momento del muestreo y luego de secarlas en estufa a 110° C hasta llegar a peso constante. De esa manera, se obtuvo el porcentaje de agua contenido en la muestra, el que, afectado por la densidad aparente del suelo (Carta Suelos de la República

Argentina, INTA, Argentina), se utilizó para calcular el contenido de humedad al momento de muestreo expresado como lámina de agua (mm). Además, durante el ciclo de cada cultivo, se registraron las precipitaciones por medio de pluviómetros instalados a menos de 100 metros de cada experimento. Con estos datos se calculó el agua evapotranspirada utilizando la fórmula de balance hídrico (Ecuación 3.3).

$$ET = (As - Am) + pp \quad (\text{Ecuación 3.3})$$

donde ET es el agua evapotranspirada por el cultivo, As y Am son los contenidos de agua en el suelo al momento de siembra y la madurez fisiológica del cultivo, respectivamente, y pp son las precipitaciones acumuladas entre ambos momentos. Todos los términos de la ecuación se expresaron como lámina de agua (mm). Cabe destacar que en Junín, durante los muestreos previos a la siembra de los cultivos invernales, la napa freática se ubicó a una profundidad aproximada de 130 cm (datos no presentados).

La eficiencia en el uso de los recursos fue calculada como el cociente entre productividad y captura de recursos. La producción de biomasa aérea por unidad de RFA_i y ET fue calculada para cada especie componiendo sistemas de cultivo simple o doble, así como el rendimiento en grano de cada sistema por unidad de recurso utilizado.

Para tener un valor de referencia de la calidad de los rastrojos, en al menos dos parcelas de cada tratamiento se determinó el contenido de nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S) en los rastrojos de todos los cultivos invernales. El rastrojo se obtuvo a partir de los restos de biomasa luego de separar los granos. El material luego fue molido a un tamaño inferior a 0,2 mm. Los mismos análisis también se realizaron en los granos de soja cosechados en todos los tratamientos y sitios, para reflejar retrospectivamente el estado nutricional de los cultivos durante su crecimiento. Las técnicas utilizadas para los análisis fueron Kjeldahl, colorimetría y turbidimetría para N, P y S, respectivamente (Sadzawka et al., 2007).

Los análisis estadísticos fueron realizados mediante Infostat (Di Rienzo et al., 2011). Los efectos de los tratamientos se evaluaron mediante un análisis de la varianza (ANOVA) para cada sitio y las asociaciones entre variables se contrastaron con análisis de regresión.

3.2.4 Experimentos simulados

Los cultivos simples y dobles fueron también simulados implementando los modelos de simulación CERES (Ritchie y Otter, 1985) y CROPGRO (Boote et al., 1998), mediante el uso de la plataforma DSSAT v.4.5 (Hoogenboom et al., 2012). CROPGRO-soybean, CERES-maize, CERES-wheat (Monzon et al., 2013), y CERES-

barley fueron adaptados, calibrados y evaluados localmente para analizar el comportamiento de los sistemas de cultivos en un mayor rango de condiciones ambientales (39 años de datos climáticos; 1971-2010). CROPGRO-cowpea fue modificado, calibrado y evaluado para simular cultivos de arveja. La precisión de los modelos para simular arveja y cebada fue evaluada mediante análisis de regresión y del cuadrado medio del error (RMSE; Cuadro 3.7; Fila et al., 2003). El cultivo de colza no fue analizado mediante esta aproximación debido a la falta de información experimental suficiente para evaluar el desempeño de los modelos en este cultivo.

En las mismas localidades experimentales se establecieron tres valores iniciales de disponibilidad de agua en el suelo al 1 de junio (bajo: 45%, intermedio: 67% y alto: 100% de agua útil). Las siembras de trigo y de cebada se establecieron el 10 de junio, y la de arveja el 15 de julio. Los cultivos simples de maíz y soja se sembraron el 25 de septiembre y el 1 de noviembre, respectivamente. Los cultivos de segunda se sembraron al día siguiente de la fecha promedio de cosecha de los cultivos invernales. La fecha de cosecha se estimó 15 días después de la madurez fisiológica de trigo y de cebada (Monzon et al., 2007) y 7 días después de la madurez fisiológica de arveja, dado que los modelos de simulación estiman la madurez fisiológica. La información de agua en el suelo a la madurez de los cultivos invernales, o después de los periodos de barbecho, fue utilizada como la condición inicial de los cultivos estivales. La distribución de probabilidades de agua en el suelo fue incluida en el análisis de estos cultivos. Los percentiles 20, 50 y 80 fueron establecidos para un análisis más completo y sensible ante posibles cambios ambientales. Los rendimientos fueron expresados como grano seco cosechado luego de considerar 7% de pérdidas de cosecha para soja y 3,5% para los demás cultivos (Ermácora, comunicación personal). No se consideraron efectos nutricionales o adversidades bióticas.

3.3 Resultados

3.3.1 Análisis comparado de los cultivos invernales

3.3.1.1 Intercepción de radiación solar

La cantidad de radiación interceptada acumulada, desde emergencia a madurez, y los patrones de eficiencia de intercepción durante el invierno-primavera difirieron entre los cultivos invernales. En todos los experimentos, la arveja fue el cultivo que acumuló la menor cantidad de radiación fotosintéticamente activa (RFA) interceptada. Por el contrario, el trigo y la colza alcanzaron los mayores niveles de intercepción acumulada, siendo similares entre sí en la cantidad total, aunque difirieron en la dinámica de intercepción (Figura 3.4). En todos los casos, el trigo interceptó más RFA acumulada que la cebada a lo largo de su ciclo (Cuadro 3.2).

3.3.1.2 Uso del agua

El trigo y la colza fueron los cultivos invernales con mayor evapotranspiración (ET) en San Pedro. Al igual que en los patrones de RFA interceptada acumulada, la colza y/o el trigo fueron los cultivos que evapotranspiraron más agua en todos los experimentos, mientras que la arveja utilizó la menor cantidad de agua entre todos los cultivos invernales en las tres localidades (Cuadro 3.2).

La inclusión de cualquiera de los cultivos de invierno previo a los cultivos de soja y maíz redujo la disponibilidad de agua a la siembra de dichos cultivos estivales, en comparación con los correspondientes periodos de barbecho. Esto fue especialmente notorio entre 0 y 0,8 m de profundidad (Figura 3.3a y 3.3b). Asimismo, los patrones de utilización de agua del suelo resultaron en disponibilidades hídricas diferentes en madurez de los cultivos invernales. Es por esta razón que la colza dejó un alto contenido de agua disponible en el suelo, especialmente en Junín. En cambio, el trigo dejó menos agua disponible en el suelo para la soja de segunda en San Pedro y Junín. En Pergamino, la tendencia fue similar aunque no significativa (Figura 3.3a). En todos los sitios se encontró agua libre, por encima de capacidad de campo, a más de un metro de profundidad. Esto se observó principalmente en Junín, dada la presencia de una napa freática a aproximadamente 130 cm de profundidad.

Cuadro 3.2. Análisis comparado de los cultivos invernales [colza, cebada, trigo, arveja antes de maíz (M) y de soja (S)]. Se incluye el rendimiento, la biomasa aérea total y de los rastrojos, expresados en kilogramos de materia seca por hectárea (kg ha^{-1}), el índice de cosecha (IC), radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada (RFAint; MJ m^{-2}), evapotranspiración (ET; mm), disponibilidad de agua en el suelo a la madurez (mm) y fecha de siembra de la soja de segunda cultivada a continuación de todos los cultivos invernales.

Cultivo invernacional	Rendimiento (kg ha^{-1})	Biomasa (kg ha^{-1})	Rastrojo (kg ha^{-1})	IC	RFAint (MJ m^{-2})	ET (mm)	Agua a madurez (mm)	Fecha madurez	Fecha siembra soja 2°
San Pedro									
Colza	2083	7906	5824	0,26	625 a	383 a	218 b	13-nov	23-nov
Cebada	5311	13461	8151	0,40	535 b	345 b	217 b	03-nov	18-nov
Trigo	5629	13956	8327	0,41	641 a	401 a	178 c	20-nov	06-dic
Arveja (S)	2592	6396	3804	0,41	406 c	242 c	250 a	17-nov	23-nov
Arveja (M)	2628	6430	3803	0,41	409 c	227 c	261 a	17-nov	-
					***	***	***		
Pergamino									
Colza	1906	6877	4972	0,28	687 a	439 a	312 a	08-nov	18-nov
Cebada	5055	11897	6842	0,43	516 c	392 bc	240 b	12-nov	25-nov
Trigo	4618	10707	6089	0,43	595 b	406 ab	236 b	02-dic	16-dic
Arveja (S)	2977	7080	4104	0,42	405 d	362 c	249 b	17-nov	25-nov
Arveja (M)	2909	6876	3967	0,42	404 d	366 bc	257 b	17-nov	-
					***	***	**		
Junín									
Colza	2352	8133	5781	0,29	559 ab	318 b	403 a	11-nov	04-dic
Cebada	4298	12236	7938	0,35	536 b	321 b	371 b	11-nov	04-dic
Trigo	4756	13286	8531	0,36	613 a	423 a	306 d	01-dic	23-dic
Arveja (S)	2810	7192	4382	0,39	406 c	334 b	318 cd	20-nov	04-dic
Arveja (M)	2734	7469	4734	0,37	413 c	312 b	336 c	20-nov	-
					***	***	***		

Letras diferentes indican diferencias significativas (LSD, $p < 0,05$); * $p < 0,1$; ** $p < 0,05$; *** $p < 0,01$ (ANOVA).

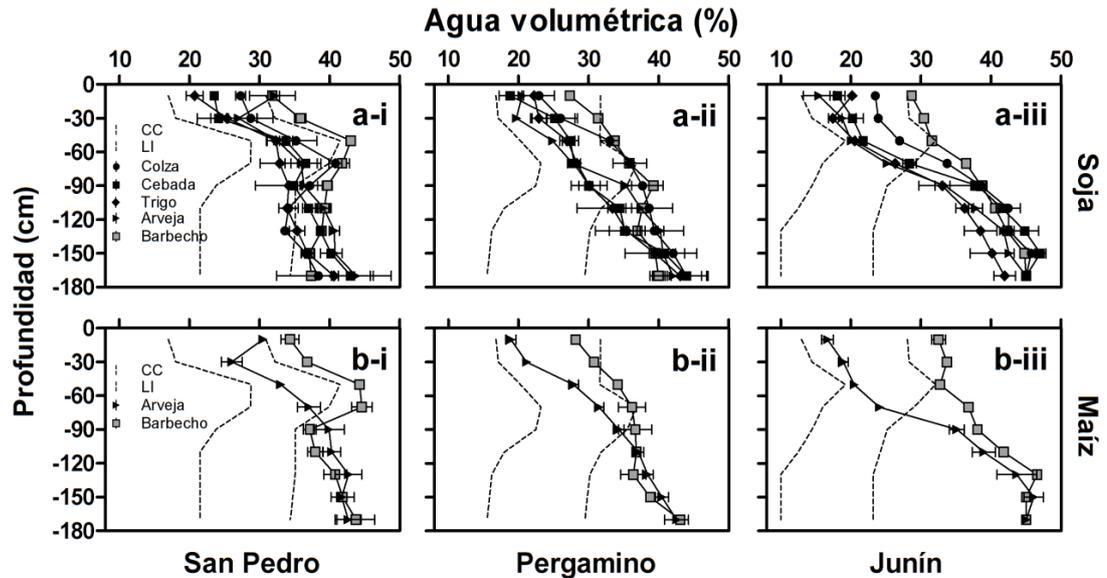


Figura 3.3. Perfiles de humedad en el suelo luego de los cultivos invernales y de los periodos de barbecho, previo a la siembra de soja (a) o maíz (b). El contenido de agua en el suelo es expresado como porcentaje volumétrico (%). Las líneas punteadas indican los límites inferior (LI) y superior (CC: capacidad de campo) de agua disponible. Los cuadrados grises indican el contenido de agua luego de un periodo de barbecho. Los símbolos negros representan el contenido de agua a la madurez de colza (círculos), cebada (cuadrados), trigo (rombos) y arveja (triángulos). Las barras horizontales indican +/- el desvío estándar.

3.3.1.3 Fecha de madurez

La madurez de la arveja ocurrió luego de la de colza y cebada, pero su periodo entre madurez y cosecha fue el más corto entre los cultivos invernales. Por otro lado, el trigo fue cosechado entre 15 y 20 días más tarde que las otras alternativas. De esta manera, las fechas en que se sembró la soja de segunda fueron similares entre los antecesores arveja, colza y cebada, mientras que fue unos 20 días más tarde cuando el antecesor fue trigo (Cuadro 3.2). Cabe destacar que, en las tres localidades, la humedad en los primeros centímetros del suelo permitió la siembra de los cultivos de soja de segunda inmediatamente luego de la cosecha de sus antecesores.

3.3.1.4 Rastrojos

La cantidad y las características de los rastrojos variaron sustancialmente entre las especies cultivadas. Trigo y cebada aportaron la mayor cantidad de rastrojos (7649 y 7643 kg ha⁻¹, respectivamente), algo menos colza (6242 kg ha⁻¹), mientras que la menor cantidad fue aportada por el cultivo de arveja (4130 kg ha⁻¹). En tanto que la concentración de nitrógeno (N; %) en los rastrojos fue de 0,61, 0,35, 0,29 y 0,24% en arveja, colza, cebada y trigo, respectivamente (datos no presentados).

3.3.2 Efecto de los antecesores sobre los cultivos de soja

Las diferencias en productividad se estudiaron sobre la base de los componentes ecofisiológicos del rendimiento (Ecuación 3.1). Así, la RFA incidente (RFA_i) durante la estación de crecimiento de cada cultivo (desde emergencia a madurez), la eficiencia de interceptación (e_i), la eficiencia de uso de la radiación interceptada (EUR_b) y el índice de cosecha (IC) fueron analizados como los determinantes ecofisiológicos del rendimiento en grano de cada cultivo (Ecuación 3.1).

La RFA incidente acumulada durante la estación de crecimiento de los cultivos de soja fue mayor en la soja de primera que en cualquiera de las sojas de segunda. En cambio, al analizar únicamente las sojas de segunda en todos los experimentos, la RFA incidente desde siembra a madurez fue similar cuando los antecesores fueron colza (S_{CO}), cebada (S_{CE}) o arveja (S_{AR}), pero fue significativamente menor luego de trigo (S_{TR}) (Cuadro 3.3).

La eficiencia de interceptación de la RFA (e_i) también resultó afectada en los cultivos de soja, por lo que, como consecuencia, la RFA interceptada acumulada de emergencia a madurez difirió entre tratamientos (Cuadro 3.3). Los cultivos de soja de primera, además de haber recibido los niveles más altos de RFA incidente, interceptaron una mayor proporción en comparación con las sojas de segunda. Entre las sojas de segunda, la eficiencia de interceptación de S_{TR} y S_{AR} fue mayor en San Pedro, mientras que S_{TR} fue la más eficiente en Junín, y S_{CO} y S_{AR} lo fueron en Pergamino. En general, S_{CE} estuvo siempre entre las sojas con menor capacidad de interceptación de RFA (Cuadro 3.3; Figura 3.4). El producto de RFA incidente y de la eficiencia de interceptación (e_i) determinó que S_{AR} fuera de las sojas de segunda que más RFA interceptaron en todos los sitios (Cuadro 3.3).

La variabilidad en la cantidad de RFA interceptada estableció diferencias entre tratamientos en los niveles de producción de biomasa. El motivo es que no hubo grandes diferencias en la EUR_b , excepto en San Pedro, donde la EUR_b de S_{TR} fue menor que en los demás tratamientos. De esta manera, la soja de primera acumuló más biomasa que cualquiera de las sojas de segunda en todos los experimentos, y entre estas, S_{AR} presentó los valores más altos. Por último, el IC no difirió significativamente ($p > 0,1$; Cuadro 3.3) entre tratamientos en ninguno de los tres sitios.

Cuadro 3.3. Análisis comparado de los cultivos de soja de primera (indicado con barbecho como actividad previa) y de segunda sembrados luego de diferentes cultivos invernales. Se presentan valores correspondientes a la radiación fotosintéticamente activa (RFA; MJ m⁻²) incidente, eficiencia de intercepción (e_i), RFA interceptada (int) acumulada, eficiencia en el uso de la RFA para producir biomasa (EURb; g MJ⁻¹), evapotranspiración (ET; mm), eficiencia en el uso del agua para producir biomasa (EUAb; kg ha⁻¹ mm⁻¹), índice de cosecha (IC), biomasa aérea y rendimiento (kg ha⁻¹).

Actividad previa	RFA (MJ m ⁻²)	e _i		RFAint (MJ m ⁻²)		EURb (g MJ ⁻¹)		ET (mm)		EUAb (kg ha mm ⁻¹)		Biomasa (kg ha ⁻¹)		IC	Rto (kg ha ⁻¹)	
San Pedro																
Barbecho	1535	0,64	a	973	a	0,90	a	584	a	15,0	a	8774	a	0,44	3883	a
Colza	1331	0,45	c	603	c	0,98	a	483	c	12,3	b	5908	b	0,44	2574	c
Cebada	1394	0,46	c	646	c	0,94	a	458	cd	13,3	ab	6094	b	0,42	2544	c
Trigo	1067	0,57	b	603	c	0,70	b	441	d	9,6	c	4211	c	0,53	2210	d
Arveja	1359	0,54	b	736	b	0,90	a	520	b	12,7	ab	6615	b	0,45	2979	b
		***		***		*		***		**		***		ns	***	
Pergamino																
Barbecho	1497	0,68	a	1011	a	0,88		536	a	16,5	a	8867	a	0,47	4177	a
Colza	1395	0,57	b	795	b	0,82		489	ab	13,4	bc	6551	b	0,46	3031	b
Cebada	1378	0,45	c	615	c	0,87		484	ab	11,1	cd	5356	c	0,46	2484	c
Trigo	1165	0,46	c	542	d	0,86		445	b	10,5	d	4651	c	0,53	2433	c
Arveja	1406	0,56	b	787	b	0,86		469	b	14,5	ab	6799	b	0,49	3306	b
		***		***		ns		*		***		***		ns	***	
Junín																
Barbecho	1490	0,63	a	934	a	0,98	ab	430	c	21,2	a	9105	a	0,45	4079	a
Colza	1371	0,41	c	558	b	1,19	a	491	a	13,4	b	6581	b	0,44	2910	bc
Cebada	1371	0,41	c	563	b	1,05	ab	466	bc	12,7	b	5913	bc	0,47	2782	c
Trigo	1151	0,56	b	639	b	0,86	b	386	d	14,2	b	5483	c	0,47	2564	d
Arveja	1371	0,46	c	630	b	0,96	b	473	b	12,7	b	6020	bc	0,49	2953	b
		***		***		*		***		***		***		ns	***	

Letras diferentes indican diferencias significativas (LSD, p<0,05); *p<0,1; **p<0,05; ***p<0,01; ns: diferencias no significativas (ANOVA).

Los rendimientos en grano de los cultivos de soja se asociaron positivamente con la RFA interceptada acumulada (Figura 3.5b), siendo la fecha de siembra el principal determinante de la variabilidad de la RFA interceptada (Figura 3.5a). Así, la soja de segunda siempre rindió menos que la soja de primera, con una reducción de rendimiento entre 31 y 34%, como el promedio de todos los tratamientos. Los rendimientos de la soja de segunda también difirieron significativamente según el cultivo antecesor (p<0,01). Como promedio de los tres experimentos, S_{AR} tuvo un rendimiento de 3079 kg ha⁻¹, S_{CO} de 2838 kg ha⁻¹, S_{CE} de 2603 kg ha⁻¹ y S_{TR} de 2402 kg ha⁻¹. Estadísticamente, el rendimiento de S_{AR} fue mayor que el de S_{TR} y S_{CE} en todas las localidades, y al de S_{CO} en San Pedro. También, el rendimiento de S_{CO} superó a los de S_{TR} en los tres experimentos, mientras que S_{CE} fue más productiva que S_{TR} en San Pedro y Junín (Cuadro 3.3).

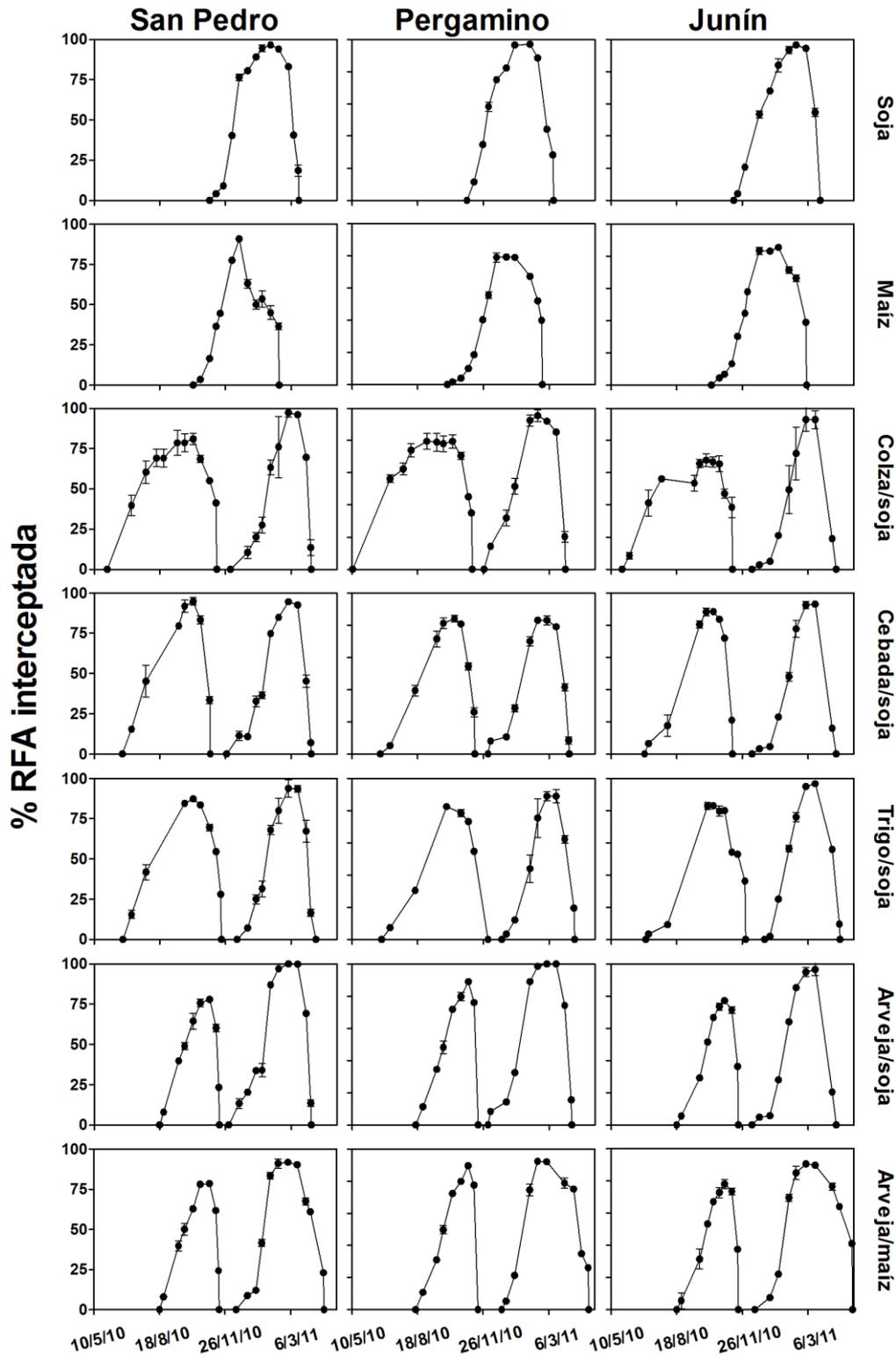


Figura 3.4. Dinámica de la intercepción de la radiación fotosintéticamente activa (RFA; %) en los siete sistemas de cultivos, desde mayo de 2010 a mayo de 2011. Cada punto corresponde al valor de intercepción obtenido en cada medición. Las barras indican +/- el desvío estándar.

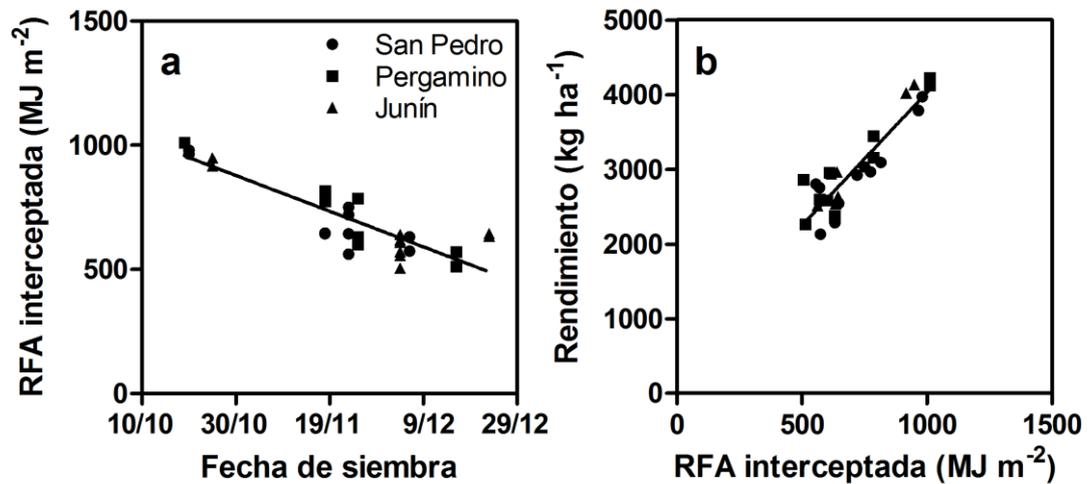


Figura 3.5. a) Intercepción de radiación fotosintéticamente activa (RFA; MJ m^{-2}) por parte de cultivos de soja en función de la fecha de siembra ($R^2=0,834$), y b) rendimiento de la soja (kg ha^{-1}) en función de la RFA interceptada ($R^2=0,831$). Todos los cultivos de soja (simple y de segunda) de todas las localidades fueron incluidos en el análisis. Cada punto corresponde a una repetición.

El uso del agua por parte de los cultivos de soja también presentó variabilidad según los cultivos antecesores en San Pedro y Junín ($p<0,01$). Allí, la evapotranspiración (ET) en S_{TR} fue menor que en cualquier otro cultivo de soja, mientras que el uso de agua en S_{CO} y S_{AR} fue el mayor en Junín y San Pedro, respectivamente. En Pergamino, el efecto de los diferentes antecesores no fue evidente sobre las sojas de segunda (LSD, $p>0,05$; Cuadro 3.3). La comparación entre la ET de las sojas de primera y de segunda resultó errática en todos los sitios (Cuadro 3.3). No obstante, la soja de primera siempre estuvo entre los cultivos de soja que utilizaron el agua evapotranspirada con mayor eficiencia, mientras que S_{TR} tuvo una baja eficiencia en el uso del agua para producir biomasa (EUAb) en San Pedro y Pergamino (Cuadro 3.3; LSD, $p<0,05$).

El estado nutricional de los cultivos fue analizado retrospectivamente, a partir de la composición de nutrientes de los granos cosechados. El contenido de fósforo (P) y azufre (S) en los granos de soja fue afectado por los cultivos antecesores ($p<0,05$; Cuadro 3.4), mientras que el nitrógeno (N) no difirió significativamente ($p>0,1$). El porcentaje de S de los granos de S_{AR} estuvo entre los valores más altos en todos los experimentos, siendo siempre mayor que en S_{CE} y S_{TR} . En cambio, el porcentaje de P en S_{AR} fue de los más bajos, mientras que S_{CO} estuvo entre los mayores en Junín y Pergamino (Cuadro 3.4).

Cuadro 3.4. Composición nutricional de los granos de soja según el sistema en el que se cultivó. Se analizó la composición de nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S) en todos los cultivos de soja y en todos los sitios. Los valores son porcentajes de la materia seca de los granos.

Actividad previa	San Pedro			Pergamino			Junín								
	N	P	S	N	P	S	N	P	S						
Barbecho	5,62	0,48	c	0,25	a	5,13	0,51	bc	0,17	b	5,06	0,46	b	0,21	b
Colza	5,77	0,49	c	0,22	a	5,20	0,54	a	0,14	c	5,23	0,51	a	0,22	ab
Cebada	5,62	0,53	a	0,18	b	5,12	0,52	ab	0,14	c	5,51	0,48	ab	0,20	b
Trigo	5,49	0,52	ab	0,19	b	5,18	0,51	bc	0,15	c	4,99	0,46	b	0,21	b
Arveja	5,94	0,50	bc	0,24	a	5,51	0,49	c	0,20	a	5,43	0,45	b	0,23	a
	ns	***	***	ns	***	***	ns	**	**	**					

Letras diferentes indican diferencias significativas (LSD, $p < 0,05$); * $p < 0,1$; ** $p < 0,05$; *** $p < 0,01$; ns: diferencias no significativas (ANOVA).

La concentración de azufre en los granos de soja de segunda denotó diferencias nutricionales durante el crecimiento de estos cultivos. A su vez, rendimiento de soja de segunda se asoció positivamente con la concentración de S en los granos, especialmente cuando se comparan S_{CO} , S_{CE} y S_{AR} para excluir efectos de fechas de siembra (Figura 3.6). También la RFA interceptada se asoció con un alto nivel de S y, a su vez, algo que también valió para el IC (Cuadro 3.3).

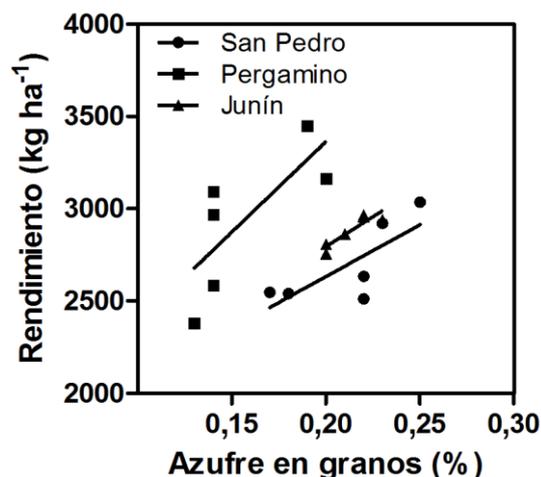


Figura 3.6. Rendimiento de soja de segunda (kg ha^{-1}) luego de cebada, arveja y colza en función de la concentración de azufre en sus granos en San Pedro (círculos; $R^2=0,59$), Pergamino (cuadrados, $R^2=0,56$) y Junín (triángulos, $R^2=0,82$).

3.3.3 Maíz como cultivo de primera y de segunda

El cultivo de maíz luego de arveja (M_{AR}) fue sembrado más tarde que los cultivos simples de maíz, sembrados hacia fines de septiembre (Cuadro 3.1), la fecha óptima en la región. Consecuentemente, la RFA incidente durante el ciclo de maíz fue menor en los cultivos de segunda. Sin embargo, M_{AR} compensó parcialmente esta reducción en la disponibilidad de RFA mediante eficiencias de intercepción mayores, lo que resultó en valores de RFA interceptada acumulada similares a los alcanzados en los cultivos simples de maíz. Además, la EURb fue mayor en M_{AR} que en el maíz de primera, especialmente en San Pedro, lo que resultó en una mayor biomasa final. En Pergamino, los patrones tendieron a ser similares a los obtenidos en San Pedro. En cambio, los maíces de primera y de segunda se comportaron de modo similar en Junín (Cuadro 3.5).

Cuadro 3.5. Comportamiento de cultivos de maíz de primera (indicado con barbecho como actividad previa) y segunda luego de diferentes cultivos invernales. Se presentan valores correspondientes a la radiación fotosintéticamente activa (RFA; $MJ m^{-2}$) incidente, la eficiencia de intercepción (e_i), RFA interceptada (int) acumulada, eficiencia en el uso de la RFA para producir biomasa (EURb; $g MJ^{-1}$), evapotranspiración (ET; mm), eficiencia en el uso del agua para producir biomasa (EUAb; $kg ha^{-1} mm^{-1}$), índice de cosecha (IC), biomasa aérea y rendimiento ($kg ha^{-1}$).

Actividad previa	RFA ($MJ m^{-2}$)	e_i	RFAint ($MJ m^{-2}$)	EURb ($g MJ^{-1}$)	ET (mm)	EUAb ($kg ha^{-1} mm^{-1}$)	Biomasa ($kg ha^{-1}$)	IC	Rendimiento ($kg ha^{-1}$)
San Pedro									
Barbecho	1496	0,48 b	720	1,96 b	557	25,3	14098	0,43	6099
Arveja	1142	0,61 a	695	2,33 a	596	27,3	16182	0,53	8617
		**	ns	**	*	***	**	*	**
Pergamino									
Barbecho	1593	0,51	813	1,94	529 a	29,9	15787	0,49	7705
Arveja	1299	0,58	758	2,30	507 b	34,3	17386	0,54	9397
		ns	ns	*	**	ns	ns	ns	**
Junín									
Barbecho	1679	0,54	909	2,05	580 a	32,1	18599	0,53	9810
Arveja	1471	0,53	772	2,14	514 b	32,1	16492	0,56	9267
		ns	*	ns	**	ns	**	**	*

Letras diferentes indican diferencias significativas (LSD, $p < 0,05$); * $p < 0,1$; ** $p < 0,05$; *** $p < 0,01$; ns: diferencias no significativas (ANOVA).

La ET en los cultivos de maíz de primera fue mayor que en M_{AR} en Pergamino y Junín. En cambio, no hubo diferencias en San Pedro. En esta localidad, la EUAb en el maíz de primera fue afectada por un periodo de déficit hídrico que inició en noviembre y se extendió durante el periodo crítico para la generación del número de granos (desde el 4/12/2010 al 3/1/2011; Figura 3.2) de establecimiento del número de granos, lo que fue agravado por la presencia del horizonte argílico (B_t con baja conductividad hidráulica).

3.3.4 *Análisis global de los sistemas evaluados*

Los siete sistemas evaluados se diferenciaron en el uso de los recursos disponibles en la estación de crecimiento ($p < 0,01$). En todos los sitios, la inclusión de cultivos invernales previo a la siembra de maíz o de soja incrementaron la cantidad de recursos capturados. El cultivo doble arveja/maíz, en comparación con el cultivo de maíz de primera, aumentó la RFA interceptada entre 30 y 53% y la ET entre 43 y 65% (Cuadro 3.6). Por su parte, los cultivos dobles que incluyeron soja como cultivo de segunda, en comparación con soja de primera, aumentaron la proporción de RFA interceptada entre 11 y 46% y la ET entre 30 y 88%. Entre los cultivos dobles, la mayor captura de recursos se logró en el de trigo/soja en Junín, en el de colza/soja en Pergamino, y en ambos en San Pedro. Por el contrario, la menor captura de recursos se observó en el cultivo doble de arveja/soja en todos los casos (Cuadro 3.6).

Los sistemas de cultivo que incluyeron maíz fueron los más eficientes en la utilización de los recursos. La inclusión de arveja antes de maíz incrementó la captura de recursos, sin afectar mayormente la eficiencia en el uso de recursos en comparación con el cultivo simple de maíz. La incorporación de cultivos invernales antes de soja aumentó tanto la cantidad de recursos capturados, como también la EUR para producir granos (EURg), especialmente en los cultivos dobles con cereales invernales. Sin embargo, en Pergamino y Junín, la EUA para la producción de granos fue menor en los cultivos dobles con soja que en el cultivo simple de soja (Cuadro 3.6).

Cuadro 3.6. Uso de recursos y productividad de los diferentes sistemas de cultivo. Se incluyen la radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAint; MJ m⁻²), la eficiencia en el uso de la RFAint para producir granos (en unidades equivalentes de glucosa; EURg), la evapotranspiración (ET; mm), la eficiencia en el uso del agua para producir granos (EUAg; kg ha⁻¹ mm⁻¹), el rendimiento en unidades equivalentes de glucosa (kg g.e. ha⁻¹) y el rendimiento de los sistemas de cultivos relativo al cultivo simple de su especie estival.

Sistema de cultivo	RFAint (MJ m ⁻²)	EURg (g MJ ⁻¹)	ET (mm)	EUAg (kg ha ⁻¹ mm ⁻¹)	Rto glucosa (kg g.e. ha ⁻¹)	Rto relativo						
San Pedro												
Soja	973	c	0,74	d	584	e	12,4	cd	7223	e	1	d
Maíz	720	d	1,12	b	557	e	14,5	b	8051	de	1	d
Colza/soja	1228	a	0,76	d	866	a	10,8	e	9327	c	1,29	c
Cebada/soja	1180	ab	0,94	c	803	c	13,8	b	11105	b	1,54	b
Trigo/soja	1244	a	0,91	c	842	ab	13,4	bc	11315	b	1,57	b
Arveja/soja	1141	ab	0,77	d	762	d	11,6	de	8806	cd	1,22	c
Arveja/maíz	1104	b	1,33	a	820	bc	17,9	a	14685	a	1,83	a
	***		***		***		***		***		***	
Pergamino												
Soja	1011	c	0,77	d	538	c	14,5	b	7770	c	1	c
Maíz	813	d	1,25	b	529	c	19,3	a	10170	b	1	c
Colza/soja	1481	a	0,66	e	927	a	10,6	d	9791	b	1,26	b
Cebada/soja	1131	b	0,95	c	876	ab	12,3	c	10686	b	1,38	b
Trigo/soja	1136	b	0,92	c	851	b	12,3	c	10437	b	1,34	b
Arveja/soja	1192	b	0,83	d	831	b	11,9	cd	9899	b	1,28	b
Arveja/maíz	1162	b	1,38	a	873	ab	18,4	a	16069	a	1,58	a
	***		***		***		***		***		***	
Junín												
Soja	934	d	0,81	d	430	d	17,7	c	7586	f	1	d
Maíz	909	d	1,42	a	580	c	22,4	a	12950	b	1	d
Colza/soja	1116	bc	0,95	c	809	ab	13,0	d	10540	cd	1,39	ab
Cebada/soja	1099	bc	0,94	c	786	b	13,2	d	10332	d	1,36	b
Trigo/soja	1252	a	0,87	cd	810	ab	13,4	d	10855	c	1,43	a
Arveja/soja	1036	c	0,87	cd	806	ab	11,2	e	9032	e	1,19	c
Arveja/maíz	1185	ab	1,32	b	827	a	19,0	b	15678	a	1,22	c
	***		***		***		***		***		***	

Letras diferentes indican diferencias significativas (LSD, $p < 0,05$); * $p < 0,1$; ** $p < 0,05$; *** $p < 0,01$; ns: diferencias no significativas (ANOVA).

Las figuras 7a y 7b muestran los rendimientos expresados en glucosa de todos los tratamientos relacionados a la RFA interceptada acumulada y al agua ET, respectivamente. Las pendientes de las líneas discontinuas muestran eficiencias de uso de los recursos de referencia. El producto de la captura y la eficiencia en el uso de los recursos determinó que el cultivo doble arveja/maíz sea ampliamente el sistema de mayor rendimiento en grano, mientras que el cultivo simple de soja tuvo los rendimientos más bajos expresados en equivalentes de glucosa (Cuadro 3.6). Los cultivos dobles que incluyeron soja como cultivo de segunda mostraron poca variación entre ellos la utilización de recursos y en la eficiencia de uso de los mismos. En las

figuras 7a y 7b se ven agrupados y claramente diferenciados de la soja de primera. Sin embargo, trigo/soja y cebada/soja tuvieron rendimientos similares, mientras que el de colza/soja fue significativamente menor que ambos en San Pedro y arveja/soja obtuvo los menores rendimientos entre los cultivos dobles en San Pedro y Junín (Cuadro 3.6).

Finalmente, la siembra de los cultivos invernales aquí evaluados como antecesores de un cultivo estival en la misma estación, aumentó la productividad de la tierra entre 19 y 57% cuando el cultivo de verano fue soja, y entre 22 y 83% cuando fue maíz (Cuadro 3.6).

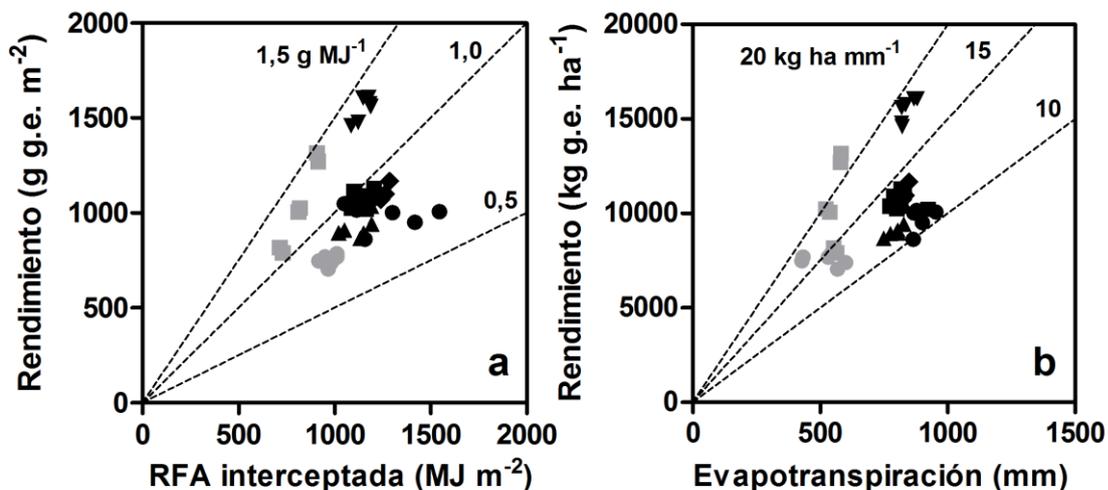


Figura 3.7. Rendimiento de los sistemas de cultivos [expresado en unidades equivalentes de glucosa (g.e.) por unidad de área] relacionado con a) la radiación fotosintéticamente activa (RFA) interceptada (MJ m^{-2}) y b) la evapotranspiración (mm). Las líneas punteadas indican las eficiencias de uso de los recursos de referencia. Los símbolos oscuros corresponden a los cultivos dobles de arveja/maíz (triángulos invertidos), arveja/soja (triángulos), colza/soja (círculos), cebada/soja (cuadrados) y trigo/soja (rombos). Los símbolos grises corresponden a los cultivos simples de maíz (cuadrados) y soja (círculos). Cada punto corresponde a una repetición.

3.3.5 Experimentos simulados

En los cultivos de trigo y cebada, los rendimientos promedio fueron menores y más variables entre años en los escenarios con restricciones hídricas al 1° de junio que las situaciones con mayor disponibilidad de agua en esa fecha. Sin embargo, esto no fue así en arveja. Considerando que los experimentos a campo fueron sembrados con niveles de agua disponible cercanos al 100% (datos no mostrados), los rendimientos obtenidos experimentalmente fueron similares a los promedios simulados para Junín,

mientras que fueron, aproximadamente, 10% y 30% más altos en Pergamino y en San Pedro, respectivamente (Cuadros 3.2 y 3.7).

Tal como ocurrió en los experimentos a campo, los contenidos de agua en el suelo fueron menores en la madurez de los cultivos invernales que al final de los periodos de barbecho previos a los cultivos simples de verano (Figura 3.8). No obstante, es de destacar que en los cultivos de arveja usualmente hubo más cantidad de agua remanente en madurez que luego de trigo o cebada, la que quedó disponible para los cultivos de segunda, tal como indica la mediana en la curva del percentil 50 (Figura 3.8). Los percentiles 20 y 80 siguieron patrones muy similares en la madurez de los cultivos invernales. Las fechas de siembra de maíz y de soja como cultivos de segunda fueron más tardías que los cultivos simples. Dadas las fechas de madurez de los cultivos invernales y el periodo definido hasta la cosecha, la fecha de siembra de S_{CE} fue la más temprana entre las sojas de segunda, adelantándose unos pocos días a la de S_{AR} (3 días, en promedio), mientras que la de S_{TR} , comparativamente, fue mucho más tardía (21 días, en promedio).

Cuadro 3.7. Rendimientos de los cultivos invernales simulados a partir de tres condiciones hídricas iniciales (45, 67 y 100% de la máxima cantidad de agua útil). Evaluación de los coeficientes genéticos de cebada para rendimiento: RMSE (raíz del cuadrado medio del error)=353 kg ha⁻¹; pendiente de la regresión=0,99; ordenada al origen=2,4; R²=0,51. Evaluación de los coeficientes genéticos de cebada para fenología: RMSE=3,2 días. Evaluación de los coeficientes genéticos de arveja para rendimiento: RMSE=319 kg ha⁻¹; pendiente=0,60; ordenada al origen=1080; R²=0,83. Evaluación de los coeficientes genéticos de arveja para fenología: RMSE=5,8 días.

Cultivo	Condición hídrica del suelo al 1 de junio					
	Seco (45%)		Intermedio (67%)		Húmedo (100%)	
	Rendimiento (kg ha ⁻¹); (Desvío estándar)					
San Pedro						
Cebada	3892	(±909)	4126	(±693)	4164	(±660)
Trigo	3825	(±956)	3995	(±790)	4018	(±765)
Arveja	2033	(±412)	2057	(±395)	2059	(±396)
Pergamino						
Cebada	3648	(±1055)	4234	(±763)	4474	(±581)
Trigo	3518	(±1040)	4051	(±815)	4166	(±753)
Arveja	2158	(±546)	2212	(±474)	2219	(±458)
Junín						
Cebada	4253	(±751)	4651	(±535)	4748	(±502)
Trigo	4272	(±821)	4695	(±576)	4777	(±541)
Arveja	2526	(±494)	2567	(±497)	2568	(±498)

La arveja fue el cultivo antecesor que maximizó los rendimientos de la soja de segunda. En comparación con las demás alternativas, los efectos positivos de arveja como antecesor se debieron a los efectos combinados de la fecha temprana de cosecha y la mayor probabilidad de que haya más agua disponible en el suelo en madurez. Por estas razones, cuando se analiza el estado hídrico inicial correspondiente al percentil 50, los rendimientos de S_{AR} fueron mayores a los de S_{CE} y S_{TR} en Pergamino y Junín. Luego, cuando la condición hídrica inicial se estableció en el percentil 80, los rendimientos de S_{CE} y S_{TR} se incrementaron más que los de S_{AR} (Cuadro 3.8).

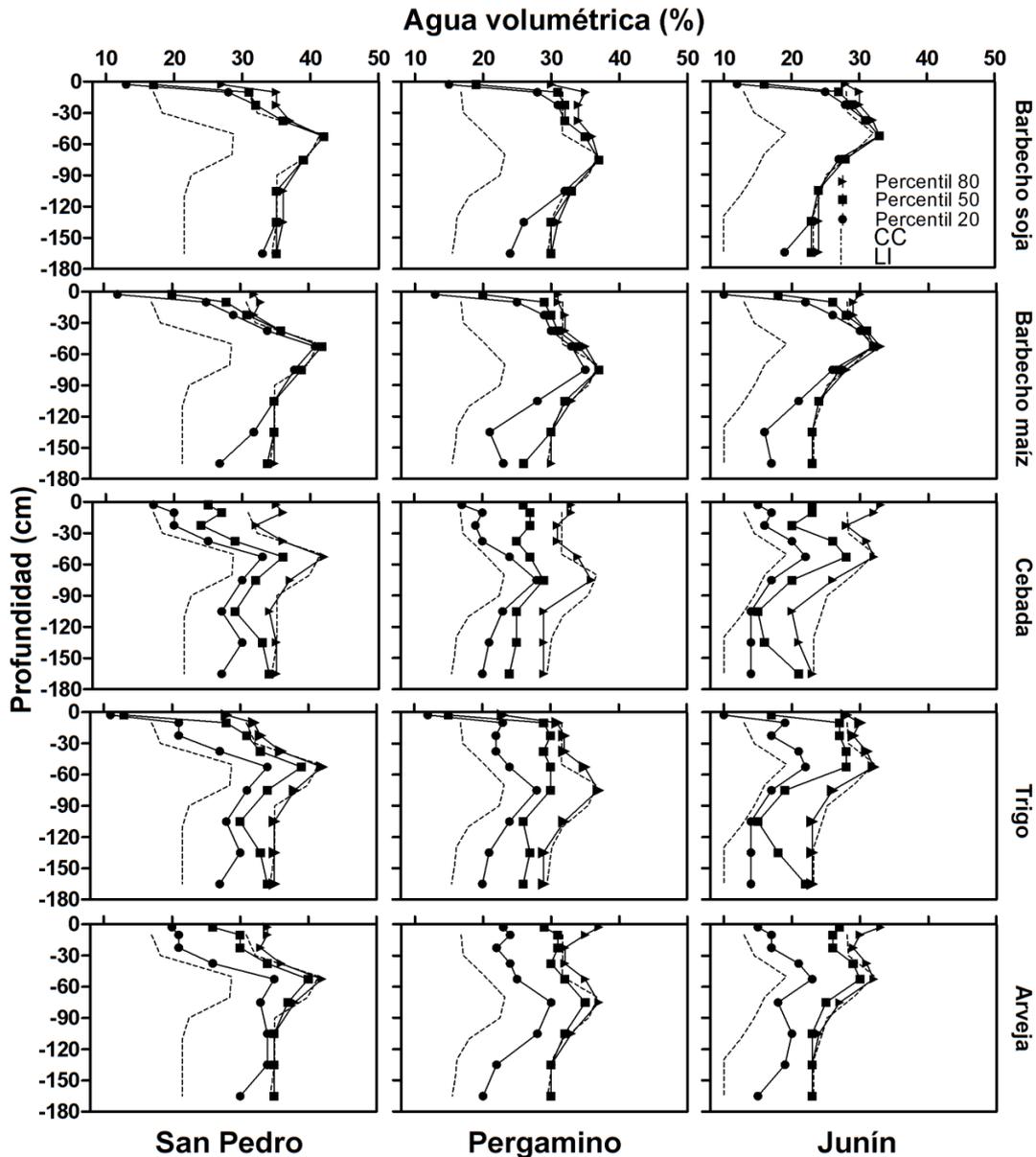


Figura 3.8. Perfiles de humedad de suelo simulados en la madurez fisiológica de los cultivos invernales o luego de los periodos de barbecho previos a la siembra de cultivos simples de maíz y soja. El contenido hídrico está expresado como contenido volumétrico de agua (%). Las líneas discontinuas indican los límites inferior (LI) y superior (CC: capacidad de campo) de almacenamiento de agua en el perfil del suelo. Los triángulos representan el percentil 80 de probabilidad, los cuadrados el percentil 50 y los círculos el percentil 20.

En concordancia con los resultados obtenidos en los experimentos a campo, todos los cultivos de soja de segunda rindieron menos que los de primera, mientras que los rendimientos promedio de maíz de primera fueron menores que los de M_{AR} en San Pedro y Pergamino, sin que hubiera diferencias en Junín (Cuadro 3.8).

Cuadro 3.8. Rendimientos simulados de los cultivos estivales como cultivos simples o de segunda. Se consideraron tres condiciones hídricas iniciales de acuerdo a los cultivos previos o su periodo de barbecho (percentiles 20, 50 y 80 de probabilidad en la Figura 3.8). Los subíndices junto al cultivo estival indican el cultivo invernal antecesor de los cultivos de segunda (CE: cebada, TR: trigo, AR: arveja).

Cultivo estival	Rendimiento (kg ha ⁻¹); (Desvío estándar)					
	Percentil 20		Percentil 50		Percentil 80	
San Pedro						
Soja	2805	(±904)	2805	(±903)	2806	(±904)
Maíz	8053	(±2827)	8707	(±1885)	8699	(±1872)
Soja _{CE}	2407	(±862)	2648	(±839)	2772	(±781)
Soja _{TR}	2452	(±785)	2697	(±662)	2737	(±615)
Soja _{AR}	2410	(±818)	2651	(±796)	2644	(±801)
Maíz _{AR}	9045	(±1929)	9744	(±1567)	9889	(±1441)
Pergamino						
Soja	3514	(±948)	3589	(±888)	3596	(±885)
Maíz	7922	(±3239)	8640	(±2386)	8672	(±2371)
Soja _{CE}	2745	(±1036)	3222	(±909)	3570	(±709)
Soja _{TR}	2781	(±795)	3229	(±628)	3405	(±483)
Soja _{AR}	2544	(±955)	3380	(±708)	3451	(±684)
Maíz _{AR}	8470	(±2215)	9545	(±1415)	9548	(±1411)
Junín						
Soja	3812	(±869)	3834	(±853)	3841	(±855)
Maíz	9734	(±2951)	10020	(±2166)	10041	(±2146)
Soja _{CE}	2902	(±1228)	3333	(±1021)	3658	(±774)
Soja _{TR}	2687	(±1012)	3070	(±777)	3247	(±621)
Soja _{AR}	2777	(±1100)	3452	(±813)	3517	(±785)
Maíz _{AR}	8814	(±2525)	10333	(±1349)	10349	(±1348)

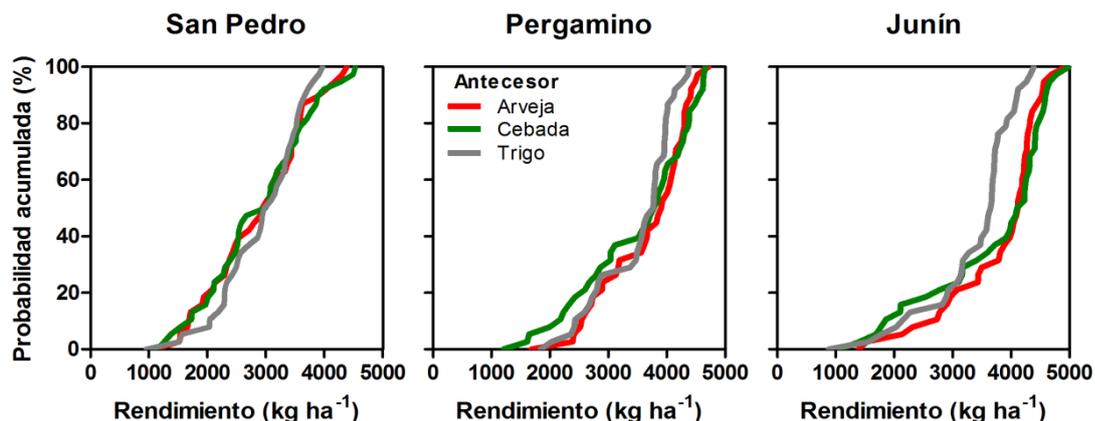


Figura 3.9. Probabilidad acumulada de obtener rendimientos (kg ha^{-1}) de soja de segunda por debajo del valor del eje “x”, sembrada a continuación de arveja (rojo), cebada (verde) y trigo (gris) en San Pedro, Pergamino y Junín. La condición hídrica inicial corresponde a la del percentil 50 (Figura 3.8).

Las curvas de probabilidad acumulada de las simulaciones indican que los rendimientos máximos alcanzables en soja de segunda fueron similares entre S_{AR} y S_{CE} , siendo ambos superiores a los de S_{TR} . En cambio, cuando se presentaron situaciones limitantes, las probabilidades de tener rendimientos de S_{TR} similares a los dos tratamientos restantes se incrementaron. Por último, se observa que la probabilidad de obtener bajos rendimientos de soja de segunda fue mayor con S_{CE} que con S_{AR} (Figura 3.9).

3.4 Discusión

Los sistemas de cultivo doble, donde especies invernales y estivales son cultivadas en secuencia, aumentaron la captura de los recursos disponibles durante la estación de crecimiento así como la productividad anual, en comparación con los respectivos cultivos simples de verano. Sin embargo, este incremento varió según la especie invernal que antecedió a la soja de segunda. Los cultivos invernales difirieron en sus rendimientos y en el modo en el que afectaron la productividad de la soja de segunda. Esto se debió, principalmente, a las diferencias en los retrasos de la fecha de siembra y a efectos nutricionales (Figuras 3.5 y 3.6; Cuadro 3.4). La importancia del agua disponible a la siembra se determinó, luego, mediante simulaciones en computadora. Estos hallazgos amplían el conocimiento previo sobre las posibilidades de aumentar la productividad de las tierras agrícolas mediante el uso de secuencias de cultivos dobles (Caviglia et al., 2004; Caviglia y Andrade, 2010; Van Opstal et al., 2011). Además, los resultados presentados aquí también proveen información sobre los patrones de utilización de recursos y la eficiencia de uso en secuencias diversificadas en zonas templadas con periodos prolongados sin heladas.

3.4.1 Cultivos simples vs cultivos dobles

Los sistemas de cultivo doble incrementaron la productividad de la tierra en comparación con los cultivos simples de su componente estival, como consecuencia de un uso más completo del agua y la radiación disponibles durante la estación de crecimiento (Cuadro 3.6). La mayor cantidad de recursos capturados por los cultivos dobles se debió a que los cultivos invernales tomaron recursos no capturados por los cultivos simples de maíz o soja (Figura 3.4), aun cuando los cultivos de segunda tuvieron menor disponibilidad inicial de recursos o su capacidad para tomarlos haya sido limitada. De esta manera es posible sugerir que los recursos disponibles anualmente fueron subutilizados en los cultivos simples de verano. Mientras que la radiación no puede almacenarse, la disponibilidad de agua solo puede diferirse hasta cierto punto según sea la capacidad de almacenamiento del suelo. Además, en muchos casos, los cultivos dobles aumentaron la captura de recursos sin afectar negativamente su eficiencia de uso, en comparación con los cultivos simples de su componente estival (Cuadro 3.6; Figura 3.7).

3.4.2 Análisis comparado de los cultivos invernales

Los cultivos invernales difirieron en algunos atributos asociados con el uso de los recursos. Trigo y colza fueron los cultivos invernales con mayor captura de recursos, mientras que el uso de recursos fue más restringido en arveja, como consecuencia de su ciclo de crecimiento corto. Se podría inferir que, cuanto mayor sea la captura de recursos por el cultivo invernal, menor será la disponibilidad de recursos para el cultivo

de segunda sembrado a continuación. Sin embargo, la dinámica temporal de utilización de los recursos es otro elemento clave a ser considerado en la secuencia de cultivos. El trigo presentó una estación de crecimiento extendida y su madurez fue más tardía que en los otros cultivos invernales, haciendo así un gran uso de los recursos disponibles. A su vez, el ciclo de crecimiento de colza fue aún más largo, porque comenzó a principios del otoño, utilizando recursos no accesibles para los otros cultivos invernales (Figura 3.4).

Se encontraron diferencias marcadas en la disponibilidad de agua a la madurez de los cultivos invernales. La arveja dejó gran cantidad de agua disponible a más de un metro de profundidad en comparación con los cereales invernales. Esto puede atribuirse a la corta duración del ciclo de arveja, y a que la densidad de raíces profundas es mucho menor que en trigo y cebada (Hamblin y Tennant, 1987). En colza, por el contrario, el suelo se recargó antes de madurez, posiblemente debido a la baja evapotranspiración durante el llenado de granos, cuando usualmente ya senesció una alta proporción del área foliar en este cultivo. Las precipitaciones ocurridas hacia fines de enero y durante febrero (Figura 3.2) satisficieron en gran medida los requerimientos de las sojas de segunda durante sus periodos críticos, atenuando los posibles efectos del contenido de humedad inicial sobre los rendimientos. Los periodos críticos para la definición de los rendimientos de las sojas de segunda se extendieron desde el 6 de febrero hasta el 17 de marzo para S_{CO} , S_{CE} y S_{AR} , y aproximadamente entre el 19 de febrero y el 23 de marzo para S_{TR} , como promedio de los tres experimentos (datos no presentados). Sin embargo, las diferencias en la disponibilidad hídrica a la siembra podrían determinar que los rendimientos sean muy variables si las lluvias son escasas durante el ciclo de los cultivos, tal como mostraron las simulaciones.

3.4.3 La productividad de la soja fue variable entre cultivos simples y dobles

La cantidad de RFA interceptada acumulada fue el principal determinante de las diferencias de productividad entre los cultivos de soja, siendo la fecha de siembra el factor clave en la modulación de la intercepción de radiación. Por esta razón, la soja de primera interceptó más radiación y, consecuentemente, rindió más que todas las sojas de segunda en todos los experimentos. Asimismo, S_{TR} tuvo la menor productividad porque su siembra fue la más tardía entre todas las sojas de segunda.

Los rendimientos de S_{AR} , S_{CE} y S_{CO} difirieron a pesar de que las sojas fueron sembradas en fechas similares. Los cultivos antecesores habrían afectado de manera diferente tanto el contenido inicial de nutrientes, como las tasas de mineralización de la materia orgánica. Los cultivos invernales con gran demanda de nutrientes pueden reducir el estado nutricional del suelo a la siembra del cultivo de segunda (Eriksen et al., 1998), mientras que la calidad del rastrojo, relativizada entre las concentraciones de C, N y S, influye sobre las tasas de mineralización de la materia orgánica, pudiendo determinar periodos de inmovilización de nutrientes en el suelo (Studdert y Echeverría,

2000; Dominguez et al, 2005). Tanto la cantidad de rastrojos como la concentración de nutrientes fueron similares en trigo y cebada. Ambos cultivos produjeron grandes volúmenes de rastrojos con baja concentración de nitrógeno. La colza produjo rastrojos menos voluminosos pero con mayor porcentaje de N que ambos cereales. En cambio, el rastrojo de arveja tuvo las mayores concentraciones de nitrógeno entre todos los cultivos de invierno evaluados, aunque fue el menos voluminoso. La concentración de S en los rastrojos fue similar en todos los cultivos invernales. Sin embargo, la cantidad total fue mayor en trigo y cebada debido al mayor volumen de rastrojos.

Estas diferencias nutricionales fueron relevantes en la definición de los rendimientos de las sojas de segunda sembradas en fechas similares (i.e., luego de cosechar arveja, colza y cebada). La concentración de S en granos difirió ampliamente entre las sojas de segunda. Esto sería consecuencia de las diferencias entre cultivos invernales en la captura de este nutriente y en la calidad de sus rastrojos, lo que habría afectado las tasas de mineralización de manera distinta. La concentración de S en granos de soja suele usarse en retrospectiva para determinar si hubo déficit nutricional durante el crecimiento de los cultivos, siendo 0,23% el umbral de suficiencia reportado (Hitsuda et al., 2004). La soja de segunda con antecesor arveja presentó los mayores porcentajes de S en granos, siendo algo inferiores luego de colza, y menores aún después de cebada. Se debe destacar que los cultivos de arveja fueron fertilizados con una dosis baja de S (10 kg ha^{-1}), lo que siguió las recomendaciones aplicadas usualmente para este cultivo en la Pampa Ondulada. De acuerdo a los componentes ecofisiológicos del rendimiento, la cantidad de radiación interceptada y el índice de cosecha fueron menores en los tratamientos que presentaron bajos contenidos de S en grano (Cuadro 3.4). De esta manera, el rendimiento de soja estuvo positivamente correlacionado con la concentración de S en los granos, en coincidencia con estudios previos (Hitsuda et al., 2004; Gutierrez Boem et al., 2007).

Los ejercicios con modelos de simulación permitieron estimar apropiadamente los efectos de los cultivos invernales como antecesores en cultivos dobles con soja o con maíz en una serie de 39 años de información climática, basándose solamente en modificaciones de la disponibilidad inicial de agua y la fecha de siembra de los cultivos de segunda. El modelo empleado simula el drenaje del agua excedente al nivel de capacidad de campo. Por esta razón, fueron notorias las diferencias entre la disponibilidad de agua simulada (Figura 3.8) y los valores observados en los experimentos previo a la siembra de los cultivos de segunda (Figura 3.3). En los experimentos a campo, el gran volumen de lluvias durante el otoño y primavera de 2010 (Figura 3.2) determinó la presencia de agua libre sub-superficial en Junín y Pergamino, detectada consistentemente en todos muestreos de suelo realizados durante dicho año. Las condiciones experimentadas en los suelos en Pergamino y Junín escapan al universo de situaciones simuladas. Los resultados de las simulaciones resultan aplicables a condiciones o años sin presencia de agua libre en horizontes sub-superficiales, en tanto que los resultados obtenidos correspondieron a una condición de escasa limitación de agua a lo largo del ciclo por la presencia de napa. Las condiciones de Pergamino y Junín

favorecen las diferencias entre antecesores debidas a la fecha de siembra del cultivo de segunda, en tanto que las simulaciones, al no contemplar la presencia de agua libre, atenúan el efecto de la fecha de siembra y conducen sus resultados a la interacción de estos dos factores.

Al comparar los resultados de las simulaciones de las sojas de segunda entre sí, la arveja tuvo ventajas comparativas como antecesor con respecto al resto de los cultivos invernales. Los rendimientos promedio de S_{AR} superaron a los de S_{CE} y S_{TR} en Pergamino y Junín, mientras que no hubo grandes diferencias en San Pedro, cuando se estableció la condición hídrica inicial mediana (p50). Además, con esa situación inicial, el rendimiento de S_{AR} fue mayor que el de S_{TR} en el 70 y 87% de los años simulados en Pergamino y Junín, respectivamente (datos no presentados). Las diferencias promedio entre tratamientos obtenidas a partir de simulaciones fueron menores que las esperadas. Una primera razón de esto es que no se contemplaron limitaciones nutricionales en esta aproximación. Otra explicación es que el contenido inicial de agua disponible sería poco importante en la determinación de los rendimientos de las sojas de segunda, debido a que las precipitaciones en la zona analizada son abundantes durante febrero-marzo (Figura 3.2), coincidiendo con el periodo crítico en soja de segunda. Por último, las características climáticas de cada año particular explicarían parte de las diferencias entre antecesores.

Por esta última razón, resulta necesario interpretar las curvas de probabilidad acumulada en las simulaciones (Figura 3.9). Los rendimientos máximos alcanzables con S_{AR} y S_{CE} fueron marcadamente superiores a los de S_{TR} , en años donde las lluvias habrían sido abundantes. Por lo tanto, esas diferencias observadas pueden atribuirse a la fecha de siembra más temprana de S_{AR} y S_{CE} . Sin embargo, cuando se presentaron situaciones limitantes, se incrementaron las probabilidades de obtener rendimientos de S_{TR} similares a los de S_{AR} y S_{CE} , o incluso fueron mayores. Según el modelo, en años secos, el retraso que provoca el trigo en la fecha de siembra de la soja de segunda define la ubicación del periodo crítico del cultivo en una época con un balance hídrico más favorable. En esos casos, también se observa que se incrementa la probabilidad de obtener menores rendimientos con S_{CE} que con S_{AR} , lo que se debería a la diferencia en la disponibilidad hídrica inicial (Figura 3.8), dado que tuvieron fechas de siembra similares.

Si bien, los cultivos invernales alternativos al trigo en los experimentos a campo permitieron lograr mayores rendimientos con soja de segunda, esto no sobre-compensó la menor productividad durante la estación fresca debida al reemplazo de trigo por colza, arveja o cebada. Sin embargo, los productores agrícolas normalmente priorizan el cultivo de soja por su rentabilidad. Asimismo, los cultivos invernales alternativos al trigo resultan interesantes para mantener la productividad anual y, al mismo tiempo, aumentar el rendimiento de la soja de segunda.

Aunque en la Región Pampeana la superficie cultivada con arveja y colza es mucho menor que la de trigo, los efectos sobre los cultivos de segunda observados aquí sugieren alternativas para una reformulación de las prácticas agronómicas usuales en la región. Los cambios propuestos contribuirían a aumentar la productividad anual de los cultivos dobles o, al menos, la de la soja de segunda. A pesar de que la probabilidad de ocurrencia de la última helada limita las fechas de floración tempranas en trigo, el uso de cultivares de ciclo corto aumentaría la disponibilidad hídrica a la siembra y permitiría adelantar la siembra de los cultivos de segunda en algunos días. Además, las deficiencias de S observadas luego de los cereales podría resolverse mediante la fertilización del cultivo invernal o de la soja de segunda (Gutierrez Boem et al., 2007).

3.4.4 Maíz y soja se comportaron diferente como cultivos de segunda

El cultivo simple de maíz exploró un amplio rango de condiciones climáticas. A pesar de que los experimentos fueron realizados en la misma campaña, la variabilidad entre sitios en los tipos de suelo definió dinámicas diferentes en la disponibilidad y el uso del agua. El estrés hídrico fue elevado en San Pedro, intermedio en Pergamino y bajo, o prácticamente inexistente, en Junín. Este efecto es evidente en la Figura 3.4, donde se observa su impacto sobre la intercepción de radiación del maíz sembrado en San Pedro. Posiblemente, el horizonte argílico limitó el almacenamiento de agua e incrementó los efectos del déficit hídrico durante diciembre. En cambio, en Junín, el nivel de la napa freática, aproximadamente a 1,3 m de profundidad, mitigó la posibilidad de que hubiera estrés hídrico en maíz. Esta variabilidad ambiental permite una interpretación más amplia de los resultados. Por este motivo, los rendimientos de maíz fueron más variables que los de soja. A medida que el estrés hídrico aumentó, el rendimiento de maíz disminuyó y, en consecuencia, se incrementó el rendimiento relativo del cultivo doble arveja/maíz.

El régimen hídrico en la Pampa Ondulada presenta escasez de lluvias desde octubre a principios de enero en uno de cada cuatro años, fenómeno climático conocido como “La Niña” (<http://www.noaa.gov>). A su vez, este período coincide con niveles altos de déficit de presión de vapor (DPV), lo que aumenta la probabilidad de estrés hídrico en maíz (Maddonni, 2012). En los experimentos presentados en esta tesis, el rendimiento de maíz de segunda fue mayor que el de primera cuando hubo estrés hídrico. Además, los rendimientos de maíz no difirieron significativamente entre cultivos simples y dobles en ausencia de estrés hídrico.

Las simulaciones de cultivos de maíz arrojaron diferencias de rendimiento promedio que, en ningún caso, superaron los 1100 kg ha⁻¹ entre el maíz de primera y M_{AR} (Cuadro 3.8). Sin embargo, el desvío estándar de los cultivos de maíz de primera fue siempre mayor al de M_{AR}. Esto se debe a que el periodo crítico de los cultivos de maíz de primera ocurre en fecha más temprana que en el caso de M_{AR}, con mayores niveles de RFA y temperatura, que incrementa los rendimientos potenciales (Cirilo y

Andrade, 1994) pero, a su vez, exacerbaban los efectos negativos de eventuales periodos de estrés hídrico. A pesar de que el rendimiento potencial de maíz es alto en siembras tempranas, en años secos los rendimientos son extremadamente bajos, reduciendo el promedio y generando una gran variabilidad en los rendimientos (Cuadro 3.8). Por esta razón, las siembras tardías de maíz se están adoptando entre los productores de la región, tanto como cultivos de segunda a continuación de la cosecha de cultivos invernales, como luego de un periodo de barbecho más extenso (Mercau y Otegui, 2014; Sibaja et al., 2014).

En estas latitudes templadas, el retraso en la fecha de siembra de maíz tendría menos desventajas que en la soja. Esto se evidencia cuando ambos cultivos son comparados con sus respectivos cultivos simples sembrados en fechas óptimas. Cuando los cultivos de maíz y de soja son sembrados en fechas tardías, exploran periodos del año en los que la RFA incidente y la temperatura media disminuyen diariamente, en especial durante el periodo de determinación del rendimiento (Cirilo y Andrade, 1994; Kantolic y Slafer, 2001). La reducción del fotoperiodo es aún más importante, ya que juega un rol importante acelerando las etapas reproductivas en soja y, a su vez, se reduce la radiación total incidente durante el período crítico (Kantolic y Slafer, 2001). En cambio, la duración del período crítico del maíz no es sensible al fotoperiodo (Birch et al., 1998).

3.5 Conclusiones

La soja simple fue el tratamiento de menor rendimiento anual, en los experimentos a campo, por su captura de recursos baja y eficiencia de uso moderada. Los cultivos dobles con soja como cultivo de segunda superaron los rendimientos de la soja simple debido a su mayor captura de recursos (Cuadro 3.6; Figura 3.7). En comparación con estos cultivos dobles, el cultivo simple de maíz capturó menos recursos pero los utilizó con una mayor eficiencia, produciendo rendimientos más altos cuando el agua no fue limitante. El cultivo doble arveja/maíz fue el más productivo de todos los sistemas evaluados. Esto se debió a que la inclusión de arveja como cultivo invernal aumentó la captura total de recursos y, simultáneamente, se mantuvieron los niveles de eficiencia de uso de recursos en comparación con los cultivos simples de maíz (Figura 3.7).

Los resultados presentados en este capítulo comprobaron que los cultivos dobles son una alternativa viable para aumentar la productividad agrícola en ambientes templados. Además, es de destacar que estos resultados fueron obtenidos en condiciones de campo mediante la aplicación de las tecnologías de producción actuales. Diseñar nuevas secuencias de cultivos dobles es un modo viable para mejorar la productividad anual o al menos incrementar el rendimiento del componente más rentable al cambiar la dinámica de uso de los recursos disponibles. No obstante, a partir de los resultados

presentados hasta aquí, cabe preguntarse en qué medida se puede incrementar la frecuencia de cultivos dobles en las secuencias de cultivos. Con el propósito de responder a este interrogante, en el próximo capítulo se estudiarán los efectos de la intensificación con cultivos dobles sobre los cultivos siguientes en la secuencia.

-CAPÍTULO 4-

**4 DIVERSIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CULTIVOS COMO
HERRAMIENTA PARA INTENSIFICAR LAS ROTACIONES**

4.1 Introducción

Los sistemas de producción de granos en las Pampas de Argentina han sido altamente simplificados en las últimas décadas, donde la soja (*Glycine max* L. Cerril) es actualmente el cultivo dominante (<http://www.siiia.gov.ar>; <http://www.fao.org>). Como se mencionó previamente (Capítulo 3), la expansión del monocultivo de soja es promovida, principalmente, por los productores que arriendan los campos, porque una parte importante de los propietarios de la tierra alquilan sus lotes a productores especializados en este cultivo (Caviglia y Andrade, 2010). Así, los productores arrendatarios no reparan en la pérdida de productividad que resulta del cultivo continuo de soja en años sucesivos (Studdert y Echeverría, 2000; Novelli et al., 2011). Los productores propietarios de la tierra que cultivan, en cambio, deciden alternar cultivos de soja y de maíz (*Zea mays* L.) en años sucesivos. Estos productores, también implementan cultivos dobles (Francis y Smith, 1985), en los que cultivan soja luego de cosechar trigo (*Triticum aestivum* L.).

Como se describió en capítulos anteriores (Sección 3.3.4), los cultivos dobles permiten incrementar la productividad anual de la tierra y, simultáneamente, aumentar la estabilidad de los rendimientos (Sección 2.3.2) con respecto a los cultivos simples. Los cultivos dobles han sido ampliamente adoptados por los productores pampeanos (Calviño y Monzon, 2009), los que cultivan típicamente la secuencia soja-trigo/soja-maíz, obteniendo así cuatro cosechas en tres años consecutivos. Con el objetivo de aumentar la productividad de las secuencias de cultivos, como también la cantidad de rastrojos incorporada anualmente, la soja de primera podría reemplazarse por maíz u otro cultivo doble. Para alcanzar dicho objetivo, algunas de las opciones viables incluyen el reemplazo de trigo por cultivos invernales alternativos, como colza (*Brassica napus* L.), cebada (*Hordeum vulgare* L.) y arveja (*Pisum sativum* L.), así como la siembra de maíz como cultivo de segunda. Esto requiere llevar adelante investigaciones en las que se evalúen las posibilidades de incrementar el número de cultivos dobles para diseñar secuencias más diversas, productivas y estables. Esta hipótesis se basa en que las rotaciones de cultivos incrementan las eficiencias en la captura y el uso de los recursos de los cultivos que las componen.

La intensificación en el uso de la tierra podría afectar el desempeño de los cultivos incluidos en las secuencias, porque la reducción de los periodos de barbecho incrementaría los efectos de los cultivos antecesores sobre los siguientes en la secuencia. Esto, combinado con el mayor consumo de agua por los cultivos dobles, descrito en el capítulo anterior, reduciría el agua disponible para los cultivos que siguen en la secuencia. Además, las características de los residuos de cosecha podrían afectar diferencialmente a los cultivos siguientes en la rotación al modificarse la dinámica de nutrientes en el suelo (Kumar y Goh; 1999; Dominguez et al., 2005). En este sentido, muchos trabajos demostraron las ventajas productivas de incluir legumbres invernales en las secuencias de cultivos (Kumar y Goh, 1999; Danga et al., 2009; Seymour et al., 2012).

Este capítulo responde al objetivo específico III “*Analizar la productividad y la captación y utilización de recursos de los cultivos que componen la secuencia trigo/soja-maíz sembrada a continuación de cultivos simples y de distintos sistemas de cultivos dobles, para determinar las posibilidades de intensificar aún más las secuencias de cultivos en la Región Pampeana*”. Por esta razón se continuaron los experimentos detallados en el Capítulo anterior con una misma secuencia de cultivos en todos los tratamientos, para determinar los efectos de diversos cultivos simples y dobles sobre los mismos.

4.2 Materiales y métodos

4.2.1 Sitios y condiciones ambientales

Los experimentos presentados aquí son la continuación de la primera etapa experimental cuyos resultados se presentaron en el capítulo anterior. La segunda etapa se llevó adelante en los mismos tres sitios entre abril de 2011 y marzo de 2013, correspondiendo al segundo y tercer año del experimento instalado en marzo de 2010. Esta etapa constó en cultivar en todas las parcelas experimentales los mismos sistemas de cultivos en cada uno de los dos años; primero el cultivo doble trigo/soja y el cultivo simple de maíz al año siguiente, con el que se dio por finalizado el experimento.

La radiación solar incidente fue similar en los tres sitios, excepto durante el verano 2013, cuando se registraron los valores más bajos en Pergamino. Por otro lado, la temperatura promedio fue, en general, más alta en San Pedro que en Pergamino y Junín en las dos temporadas estudiadas en este capítulo (Figura 4.1a).

Las precipitaciones anuales históricas son similares para los tres sitios, promediando aproximadamente 1050 mm en el periodo 1971-2010. Durante el periodo abril 2011-marzo 2012, las precipitaciones fueron levemente inferiores a ese valor, siendo 879, 920 y 953 mm para Junín, Pergamino y San Pedro, respectivamente. Entre abril 2012 y marzo 2013, las precipitaciones superaron el promedio histórico, alcanzando valores de 1176, 1244 y 1482 mm, en el mismo orden. En ambos periodos, las precipitaciones fueron relativamente altas durante la estación cálida (entre octubre y marzo), siendo comparativamente más bajas durante la estación fría (junio-julio). Así, la distribución temporal fue similar a la histórica (Figura 4.1b). Sin embargo, hubo un breve periodo con escasas precipitaciones en diciembre de 2011, particularmente en Junín. Las precipitaciones también fueron escasas en enero de 2013, pero las abundantes lluvias ocurridas en los meses previos atenuaron su posible impacto sobre los cultivos (Figura 4.1b).

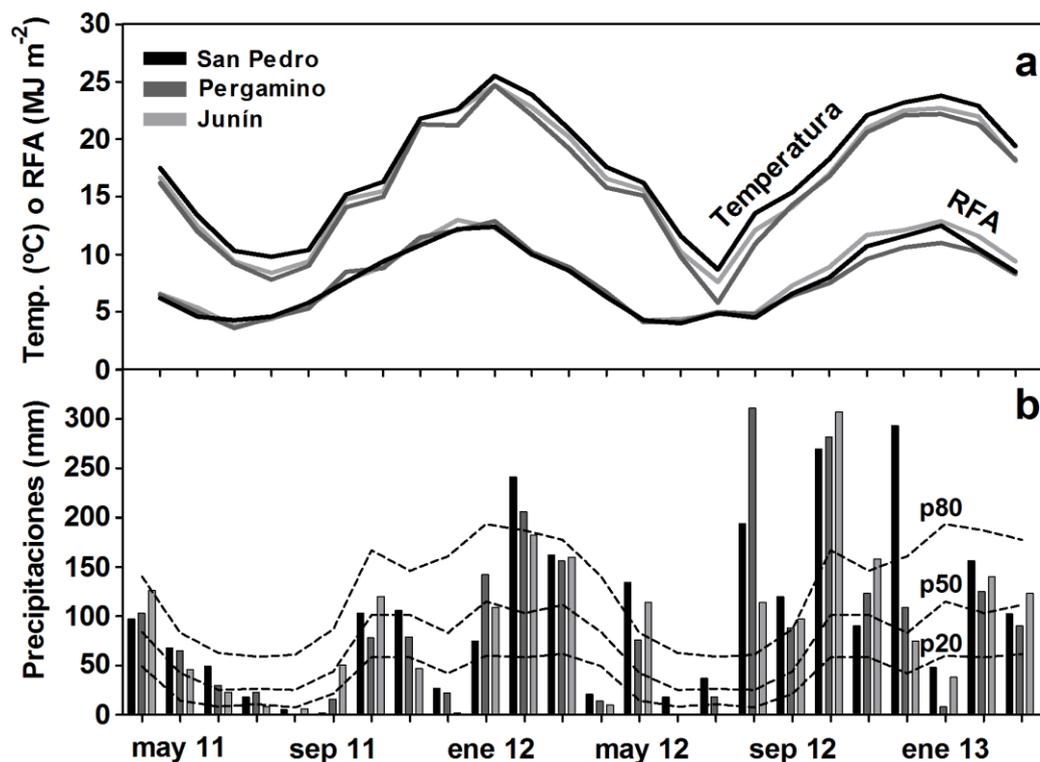


Figura 4.1. Condiciones climáticas durante el segundo y tercer año en los tres sitios experimentales (abril de 2011-marzo de 2013). a) Valores promedio mensuales de temperatura (°C) y radiación fotosintéticamente activa incidente (RFA; MJ m⁻²). b) Precipitaciones mensuales acumuladas (mm) en cada sitio y los percentiles (p20, p50 y p80) de probabilidad de precipitaciones acumuladas (mm) en base a mediciones históricas mensuales (1971-2010) como promedio de los tres sitios.

4.2.2 *Diseño experimental y manejo*

Se evaluaron siete tratamientos en cada uno de los tres experimentos. Éstos solo difirieron en los cultivos antecesores evaluados en el capítulo anterior. Los sistemas de cultivo antecesores a esta secuencia fueron colza/soja (CO/S), trigo/soja (TR/S), cebada/soja (CE/S), arveja/soja (AR/S) y arveja/maíz (AR/M) como cultivos dobles, y el maíz (MZ) y la soja (SJ) como cultivos simples de primera. Luego, en todas las parcelas se cultivó la misma secuencia compuesta por el cultivo doble trigo/soja de segunda en el primer año y el cultivo simple de maíz el año siguiente.

Los cultivos fueron manejados de la misma forma que los productores de la región, con el fin de crear condiciones similares a las de los lotes comerciales. Así, los cultivos se instalaron en siembra directa con la maquinaria utilizada típicamente en el área de estudio. Las variedades e híbridos sembrados fueron los elegidos normalmente por los productores por su alto potencial de rendimiento en la región. Asimismo, la

fecha de siembra de los cultivos, su densidad y espaciamiento entre hileras, se definieron según las recomendaciones técnicas para la región. No obstante, la distancia entre hileras varió levemente entre experimentos dependiendo de la sembradora disponible en cada sitio (Cuadro 4.1).

Cuadro 4.1. Genotipos, fechas de siembra, densidades objetivo y espaciamientos entre hileras utilizados en los cultivos de trigo, soja de segunda y maíz en todos los sitios. En cada sitio, todos los tratamientos fueron conducidos de la misma manera para las cuatro variables mencionadas.

Cultivo	Manejo	San Pedro	Pergamino	Junín
Trigo	Genotipo	Bag 11	Bag 11	Bag 11
	Fecha de siembra	11/6	10/6	12/6
	Densidad (pl m ⁻²)	290	320	275
	Espaciamiento (cm)	17,5	21	17,5
Soja de segunda	Genotipo	DM 4250	DM 3810	DM 4210
	Fecha de siembra	7/12	2/12	9/1
	Densidad (pl m ⁻²)	39	35	32
	Espaciamiento (cm)	35	21	42
Maíz	Genotipo	DK 692	DK 747	DK 747
	Fecha de siembra	28/9	15/9	23/9
	Densidad (pl m ⁻²)	7,2	7,1	7,4
	Espaciamiento (cm)	50,0	52,5	52,5

El contenido de nutrientes en el suelo fue medido 20 días antes de la siembra de los cultivos de trigo y maíz. En la campaña agrícola 2011-2012, se fertilizó a la siembra para complementar el nivel de nutrientes en el suelo y suplir la demanda combinada de trigo y soja de segunda, según las recomendaciones técnicas zonales (i.e., nutrientes en suelo más fertilizante a la siembra: N=160 kg ha⁻¹; P-Bray>15 ppm). La soja de segunda se sembró luego de la cosecha de trigo. La semilla de soja fue inoculada previamente con *Bradyrhizobium japonicum*. Los cultivos de maíz sembrados en la última estación de crecimiento (2012-2013) fueron fertilizados con dosis sub-óptimas de nitrógeno (100 kg ha⁻¹ de N a la siembra, considerando el N del suelo más el fertilizante). El objetivo de esta práctica fue amplificar las posibles diferencias remanentes de los cultivos antecesores. Cuando fue necesario, las malezas, plagas y enfermedades fueron controladas con productos químicos aplicados con una pulverizadora autopropulsada. En este sentido, se hizo una aplicación adicional de fungicidas (estrobilurina + triazol) en los cultivos de trigo sembrados sobre TR/S para lentificar el progreso de la mancha amarilla (*Drechslera tritici*).

4.2.3 Toma de muestras y análisis

Las mediciones fueron tomadas en los cultivos siguiendo un protocolo de muestreos. Específicamente, el protocolo incluyó mediciones para determinar la producción de biomasa, el rendimiento en grano, rastrojo y el uso de agua, radiación y nutrientes, para luego calcular las respectivas eficiencias de uso. Las mediciones se tomaron de la misma manera que en los cultivos que iniciaron las secuencias en la campaña agrícola 2010-2011, las que fueron detalladas en el capítulo anterior (Sección 3.2.3). En trigo y maíz, la cantidad de N total en la parte aérea de las plantas se calculó sumando los contenidos parciales en grano y rastrojo. Los valores se expresaron en kilogramos por hectárea. Dada la distribución y cantidad de lluvias durante la estación 2012-2013, en el balance hídrico de los cultivos de maíz se consideró la precipitación efectiva en lugar de la precipitación acumulada, aplicando el método de curva número para estimar escorrentía (USDA, 1986). Además, en los cultivos de trigo y maíz se realizaron mediciones del contenido de clorofila foliar (Minolta SPAD-502 plus) alrededor de la floración. Estas mediciones se tomaron como una medida complementaria para evaluar el nivel nutricional de los cultivos en cada tratamiento (Varvel et al., 1997; Falótico et al., 1999).

Los análisis estadísticos se realizaron con el software Infostat (Di Rienzo et al., 2011). Los efectos de los tratamientos se evaluaron con análisis de la varianza (ANOVA) en cada sitio, mientras que se utilizó análisis de regresión de mínimos cuadrados para estudiar las asociaciones entre variables.

4.3 Resultados

4.3.1 Condiciones al inicio de la secuencia trigo/soja-maíz

Los siete sistemas de cultivos realizados durante el primer año del experimento (descritos en el Capítulo 3) generaron diferentes condiciones iniciales para los cultivos de trigo siguientes. Las diferencias se observaron tanto en la disponibilidad de agua y de nutrientes en el suelo, como en la cantidad y el tipo de residuos de cosecha (Cuadro 4.2).

El agua disponible a la siembra del trigo difirió entre tratamientos en San Pedro y Pergamino. El contenido de agua en el suelo fue mayor luego de cultivos simples que de cultivos dobles, aunque las diferencias no fueron consistentes entre experimentos cuando sólo se compararon los cultivos dobles (Cuadro 4.2). En Junín, la alta disponibilidad de agua inicial en el suelo en todos los tratamientos, que excedió la capacidad de campo normal en el tipo de suelo predominante, fue sostenida por la presencia de una napa sub-superficial. El nitrógeno y el azufre disponibles a la siembra

del trigo también difirió entre tratamientos. El N edáfico tendió a ser más abundante luego de maíz o soja de primera que de los cultivos dobles (Cuadro 4.2). Por otro lado, el azufre extractable en suelo presentó los menores valores luego de TR/S en San Pedro, con una tendencia similar en Pergamino. El fósforo, en cambio, no presentó diferencias entre cultivos antecesores (datos no presentados).

La cantidad de rastrojo acumulada durante la campaña 2010-2011 varió desde 4690 hasta 12778 kg ha⁻¹ (Cuadro 4.2). A su vez, la concentración de N también difirió entre los tipos de rastrojo, aunque fue analizada sólo en algunas parcelas. El contenido de N en los rastrojos de trigo y cebada fue bajo (ca. 0,25-0,30%), mientras que en los rastrojos de soja y arveja la concentración fue sensiblemente mayor (ca. 0,60%). En colza y maíz los valores de concentración de N en sus rastrojos fueron intermedios (ca. 0,35 y 0,45%, respectivamente).

Cuadro 4.2. Condiciones iniciales para los cultivos de trigo en todos los tratamientos y sitios. Las variables que se presentan son: lámina de agua por encima del punto de marchitez permanente (mm); nitrógeno en suelo (N; 0-60 cm); azufre extractable (S; 0-20 cm); y cantidad de rastrojo de los cultivos antecesores (kg ha⁻¹). Los tratamientos se refieren a los cultivos que iniciaron la secuencia: soja (SJ), maíz (MZ), colza/soja (CO/S), cebada/soja (CE/S), trigo/soja (TR/S), arveja/soja (AR/S) y arveja/maíz (AR/M).

Tratamiento	Agua inicial (mm)		N inicial en suelo (kg ha ⁻¹)		S extractable en suelo (ppm)		Rastrojo invernol (kg ha ⁻¹)		Rastrojo estival (kg ha ⁻¹)	
San Pedro										
SJ	232	ab	49		3,2	bc	0	d	4891	b
MZ	235	a	53		3,3	b	0	d	8000	a
CO/S	196	bc	43		5,2	a	5824	b	3335	c
CE/S	227	ab	50		5,1	a	8151	a	3549	c
TR/S	203	abc	31		2,5	c	8327	a	2001	d
AR/S	185	c	45		3,1	bc	3804	c	3637	c
AR/M	198	bc	44		3,0	c	3803	c	7565	a
	*		ns		***		***		***	
Pergamino										
SJ	252	a	53	b	3,2		0	e	4690	b
MZ	254	a	71	a	3,5		0	e	8083	a
CO/S	247	ab	47	bc	2,6		4972	c	3521	c
CE/S	253	a	37	cde	2,8		6842	a	2872	cd
TR/S	223	b	33	de	1,9		6089	b	2218	d
AR/S	233	ab	43	bcd	2,0		4104	d	3493	c
AR/M	226	b	26	e	2,7		3967	d	7990	a
	*		***		ns		***		***	
Junín										
SJ	408	ab	46	a	2,6		0	e	5026	c
MZ	425	ab	27	cd	3,5		0	e	8789	a
CO/S	433	a	31	bc	3,1		5781	c	3671	d
CE/S	406	ab	27	cd	3,3		7938	b	3131	de
TR/S	434	a	29	cd	3,5		8531	a	2920	e
AR/S	396	b	35	b	4,1		4382	d	3067	de
AR/M	391	b	26	d	4,1		4735	d	7225	b
	*		***		ns		***		***	

Letras diferentes indican diferencias significativas (LSD, $p < 0,05$); * $p < 0,1$; ** $p < 0,05$; *** $p < 0,01$; ns: diferencias no significativas (ANOVA).

4.3.2 Efecto de los antecesores sobre los cultivos siguientes en las secuencias

4.3.2.1 Trigo

a) Uso de la radiación y rendimiento

La RFA incidente durante el ciclo de los cultivos fue la misma para todos los tratamientos en cada uno de los experimentos. Sin embargo, los cultivos antecesores afectaron la eficiencia de intercepción de RFA de los cultivos de trigo ($p < 0,05$). Comparando los niveles de intercepción acumulada de RFA de los cultivos de trigo

entre los tratamientos, los valores mayores se observaron luego de AR/S y soja, mientras que los menores se obtuvieron después de TR/S y CE/S (Cuadro 4.3).

Cuadro 4.3. Análisis comparado de los cultivos de trigo luego de diferentes sistemas de cultivo. Se presentan datos de radiación interceptada acumulada (RFAint; MJ m⁻²), eficiencia en el uso de la radiación para producir biomasa aérea (EURb; g MJ⁻¹), evapotranspiración (ET; mm), eficiencia en el uso del agua para producir biomasa (EUAb; kg ha⁻¹mm⁻¹), biomasa aérea (kg ha⁻¹), índice de cosecha (IC) y rendimiento (Rto; kg ha⁻¹). Los tratamientos (Trat) se refieren a los cultivos que iniciaron la secuencia: soja (SJ), maíz (MZ), colza/soja (CO/S), cebada/soja (CE/S), trigo/soja (TR/S), arveja/soja (AR/S) y arveja/maíz (AR/M).

Trat	RFAint (MJ m ⁻²)		EURb (g MJ ⁻¹)		ET (mm)	EUAb (kg ha ⁻¹ mm ⁻¹)		Biomasa (kg ha ⁻¹)		IC		Rto (kg ha ⁻¹)	
San Pedro													
SJ	547	ab	2,24	b	406	30,2	b	12263	b	0,39	b	4742	b
MZ	473	d	2,36	a	420	26,6	b	11181	c	0,39	b	4319	c
CO/S	518	bc	2,22	bc	399	28,9	b	11476	c	0,38	b	4401	c
CE/S	436	e	2,03	d	420	21,2	c	8853	d	0,43	a	3822	d
TR/S	373	f	2,12	cd	352	22,6	c	7911	e	0,38	b	3002	e
AR/S	564	a	2,41	a	371	36,6	a	13575	a	0,37	b	5037	a
AR/M	495	cd	2,32	ab	399	28,8	b	11487	c	0,39	b	4421	c
	***		***		ns	***		***		**		***	
Pergamino													
SJ	526	ab	1,98	ab	425	24,6	ab	10426	a	0,38	c	3918	ab
MZ	508	ab	2,09	a	419	25,3	ab	10612	a	0,38	c	4006	a
CO/S	500	ab	1,63	cd	403	20,2	c	8133	b	0,43	a	3513	bc
CE/S	459	bc	1,82	bc	370	22,5	bc	8305	b	0,40	abc	3290	c
TR/S	413	c	1,40	d	364	15,9	d	5765	c	0,42	ab	2443	d
AR/S	553	a	1,96	ab	400	27,3	a	10853	a	0,39	abc	4246	a
AR/M	483	abc	2,12	a	391	26,3	a	10262	a	0,39	bc	3947	ab
	**		***		ns	**		***		*		***	
Junín													
SJ	594	ab	2,10	b	345	36,1	a	12479	ab	0,39		4881	b
MZ	516	c	2,22	ab	370	30,9	bc	11455	bcd	0,41		4674	bc
CO/S	577	b	2,16	ab	371	33,7	ab	12519	ab	0,39		4796	b
CE/S	514	c	2,14	b	367	30,0	cd	10997	cd	0,41		4467	c
TR/S	469	d	2,20	ab	381	27,1	d	10298	d	0,40		4099	d
AR/S	625	a	2,08	b	387	33,6	ab	12989	a	0,40		5166	a
AR/M	525	c	2,33	a	364	33,5	abc	12208	abc	0,40		4827	b
	***		*		ns	*		**		ns		***	

Letras diferentes indican diferencias significativas (LSD, p<0,05); *p<0,1; **p<0,05; ***p<0,01; ns: diferencias no significativas (ANOVA).

Los cultivos antecesores también modificaron la EURb del trigo, especialmente en San Pedro y Pergamino ($p < 0,01$). En estas localidades, la EURb de los cultivos de trigo sembrados a continuación de los cultivos dobles que incluyeron arveja, o después de cultivos simples, fue mayor que en los cultivados luego de TR/S (Cuadro 4.3).

En general, los cultivos de trigo luego de soja y AR/S mostraron elevadas eficiencias de interceptación de RFA (e_i) y conversión en biomasa (EURb) en todos los sitios. En consecuencia, ambos tratamientos presentaron los valores más altos de biomasa de trigo en todos los experimentos. En cambio, los antecesores TR/S y CE/S afectaron negativamente ambas eficiencias, resultando en bajos niveles de producción de biomasa (Cuadro 4.3). Finalmente, el IC sólo presentó diferencias significativas en San Pedro, donde el IC de trigo fue más alto luego de CE/S (Cuadro 4.3).

La alta variabilidad en los rendimientos de trigo fue explicada por los cambios en las contribuciones de e_i , EURb e IC (Ecuación 3.1; $p < 0,01$). Los resultados fueron consistentes entre experimentos, los que presentaron altos rendimientos de trigo luego de AR/S, soja, maíz, y AR/M; mientras que los rendimientos luego de TR/S y CE/S fueron notablemente más bajos (Cuadro 4.3). El trigo luego de AR/S alcanzó el mayor rendimiento en San Pedro y Junín y estuvo entre los más productivos en Pergamino. Por el contrario, el trigo luego de TR/S tuvo el rendimiento más bajo en todos los experimentos. Las diferencias de rendimiento entre estos dos tratamientos contrastantes (AR/S y TR/S) fueron 2034, 1803 y 1066 kg ha⁻¹ en San Pedro, Pergamino y Junín, respectivamente.

b) *Uso del agua*

El periodo crítico de los cultivos de trigo abarcó todo el mes de octubre de 2011 (datos no presentados), donde las precipitaciones fueron similares a la mediana histórica (Figura 4.2). El agua evapotranspirada (ET) varió entre 345 y 420 mm, sin presentar diferencias significativas entre tratamientos ($p > 0,1$), a pesar de la gran variabilidad en la producción de biomasa. En consecuencia, la eficiencia en el uso del agua (EUAb) fue mayor en los tratamientos con alta producción de biomasa, especialmente en San Pedro y Pergamino ($p < 0,05$; Cuadro 4.3).

c) *Absorción de nitrógeno*

La absorción de N por parte de los cultivos de trigo difirió entre tratamientos en San Pedro y Pergamino ($p < 0,05$; Cuadro 4.6). El trigo luego de AR/S y soja presentaron la mayor absorción de N. Por el contrario, esta fue afectada en gran medida cuando los cultivos antecesores fueron TR/S y CE/S, observándose reducciones de entre 43 y 33% en comparación con AR/S. Las tendencias fueron similares en Junín, con reducciones de 29 y 21% cuando los cultivos previos fueron TR/S y CE/S, respectivamente (Cuadro 4.6).

Los cultivos de trigo con mayor absorción de N fueron, a su vez, los más eficientes para interceptar RFA y convertirla en biomasa aérea. Los incrementos en las eficiencias de interceptación y utilización de la RFA resultaron en mayores rendimientos de trigo (Figura 4.2). Así, la interceptación de RFA se redujo cuando la absorción de N fue menor a 120 kg N ha^{-1} , mientras que la EURb recién resultó afectada cuando la absorción de N fue reducida severamente, cayendo por debajo de 90 kg N ha^{-1} (Figuras 4.2a y 4.2b).

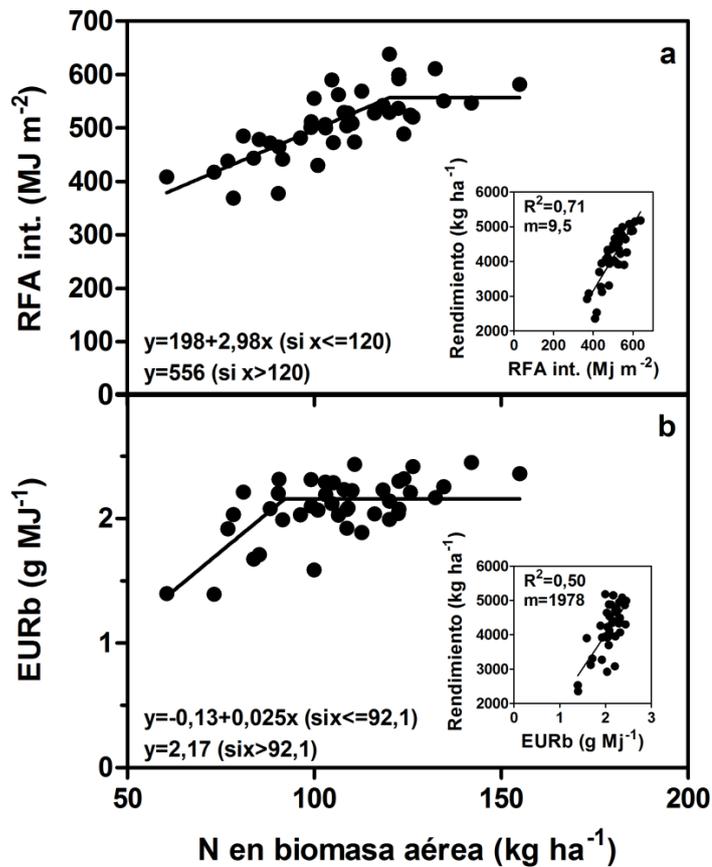


Figura 4.2. a) Radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada (RFA; MJ m^{-2}) desde emergencia a madurez, en función del nitrógeno (N) total contenido en la biomasa aérea del cultivo de trigo (kg ha^{-1}) [$R^2=0,59$], y rendimiento en grano (kg ha^{-1}) en función de la RFA interceptada por el cultivo (recuadro). b) Eficiencia en el uso de la RFA interceptada para producir biomasa (EURb; g MJ^{-1}) en función del nitrógeno (N) total contenido en la biomasa aérea del cultivo de trigo a madurez (kg ha^{-1}) [$R^2=0,42$], y rendimiento en grano (kg ha^{-1}) en función de la EURb del cultivo (recuadro). Se incluyen por los datos correspondientes a los tres sitios experimentales (San Pedro, Pergamino y Junín). Cada punto corresponde a una repetición.

Al igual que con las eficiencias de interceptación y de uso de la RFA interceptada calculadas, las mediciones de SPAD en la hoja bandera de trigo previo a floración presentaron los menores índices en las parcelas con TR/S como antecesor en San Pedro y Pergamino, mientras que los menores índices se registraron en Junín con antecesores TR/S y maíz (Cuadro 4.6).

4.3.2.2 Soja de segunda

Los rendimientos de soja de segunda variaron entre 1726 y 1769 kg ha⁻¹ en Junín, entre 1887 y 2134 kg ha⁻¹ en Pergamino y entre 1674 y 2441 kg ha⁻¹ en San Pedro (Cuadro 4.4). Los sistemas de cultivo que iniciaron las secuencias sólo afectaron significativamente los rendimientos de la soja de segunda en San Pedro, debido, principalmente, a las variaciones en la interceptación de RFA (Cuadro 4.4). Allí, las sojas de segunda rindieron más en las parcelas que habían sido cultivadas con arveja o cultivos simples de soja, que en aquellas donde hubo cereales invernales en el primer año. De esta manera, la clasificación de los tratamientos por rendimiento fue similar a la obtenida previamente en trigo. Por esta razón, las diferencias observadas en San Pedro, y en menor medida en Pergamino, estuvieron asociadas con la cantidad de rastrojos dejados por el cultivo de trigo antecesor ($p < 0,0001$ y $p = 0,1$, respectivamente; datos no mostrados).

Cuadro 4.4. Análisis comparado de los cultivos de soja de segunda luego de trigo, en parcelas que iniciaron la secuencia con diferentes sistemas de cultivo. Se presentan datos de radiación interceptada acumulada (RFAint; MJ m⁻²), eficiencia en el uso de la radiación para producir biomasa (EURb; g MJ⁻¹), evapotranspiración (ET; mm), eficiencia en el uso del agua para producir biomasa (EUAb; kg ha⁻¹mm⁻¹), biomasa aérea (kg ha⁻¹), índice de cosecha (IC) y rendimiento (Rto; kg ha⁻¹). Los tratamientos se refieren a los cultivos que iniciaron la secuencia: soja (SJ), maíz (MZ), colza/soja (CO/S), cebada/soja (CE/S), trigo/soja (TR/S), arveja/soja (AR/S) y arveja/maíz (AR/M).

Tratamiento	RFAint (MJ m ⁻²)	EURb (g MJ ⁻¹)	ET (mm)	EUAb (kg ha ⁻¹ mm ⁻¹)	Biomasa (kg ha ⁻¹)	IC	Rto (kg ha ⁻¹)				
San Pedro											
SJ	533	ab	0,86	bcd	433	15,2	4588	0,49	2262	a	
MZ	509	ab	0,89	b	409	16,4	4531	0,47	2144	ab	
CO/S	508	ab	0,89	bc	433	15,0	4510	0,48	2151	ab	
CE/S	468	bc	0,84	d	427	13,4	3950	0,45	1801	bc	
TR/S	404	c	0,97	a	427	13,6	3920	0,43	1674	bc	
AR/S	566	a	0,88	bcd	467	14,8	4957	0,49	2441	a	
AR/M	528	ab	0,85	cd	421	15,4	4470	0,51	2280	a	
	*		***		ns	ns	ns	ns	**		
Pergamino											
SJ	469		0,99		358	18,4	4646	0,42	1927		
MZ	506		0,89		383	16,4	4498	0,43	1939		
CO/S	457		0,92		373	15,8	4179	0,45	1887		
CE/S	474		0,93		414	14,3	4387	0,44	1912		
TR/S	475		0,90		378	16,1	4283	0,44	1889		
AR/S	504		0,89		388	16,0	4503	0,45	2011		
AR/M	539		0,94		364	19,7	5079	0,42	2134		
	ns		ns		ns	ns	ns	ns	ns		
Junín											
SJ	365		1,13		427	ab	13,0	b	4111	0,42	1730
MZ	355		1,13		444	a	12,1	b	4017	0,44	1776
CO/S	360		1,08		436	a	12,0	b	3894	0,44	1726
CE/S	360		1,10		390	c	14,2	ab	3950	0,44	1755
TR/S	357		1,11		412	abc	13,2	b	3957	0,44	1743
AR/S	368		1,19		395	bc	15,5	a	4391	0,40	1769
AR/M	364		1,19		418	abc	14,1	ab	4341	0,41	1769
	ns		ns		*		*		ns	ns	ns

Letras diferentes indican diferencias significativas (LSD, p<0,05); *p<0,1; **p<0,05; ***p<0,01; ns: diferencias no significativas (ANOVA).

4.3.2.3 Maíz

a) Uso de la radiación y rendimiento

Los maíces cultivados en el tercer año experimental (2012-2013) también difirieron en la intercepción de RFA. Este cultivo presentó los mayores niveles de intercepción acumulada en las parcelas en las que la secuencia se inició con soja o con AR/S en todos los experimentos. En cambio, los maíces en parcelas previamente cultivadas con maíz o AR/M siempre presentaron una baja eficiencia en la intercepción de RFA. En cuanto a la EURb, sólo en Pergamino hubo diferencias significativas entre

tratamientos, donde las parcelas que iniciaron la secuencia con soja presentaron los maíces con EURb más alta, mientras que los menos eficientes fueron los maíces cultivados en las parcelas que iniciaron con AR/M.

Las variaciones en la intercepción de RFA determinaron un rango amplio de producción de biomasa en los cultivos de maíz (Cuadro 4.5). A su vez, como el índice de cosecha fue similar entre tratamientos, las diferencias en la producción de biomasa se trasladaron también a los rendimientos en grano. Al igual que con la capacidad de interceptar RFA, los mayores rendimientos de maíz se lograron en las parcelas que iniciaron la secuencia con el cultivo simple de soja o con AR/S. En cambio, los maíces cultivados en parcelas donde la secuencia se inició con maíz o AR/M tuvieron los rendimientos más bajos en todos los experimentos (Cuadro 4.5).

b) *Uso del agua*

El agua evapotranspirada (ET) por los cultivos de maíz varió entre 464 y 615 mm, considerando todos los tratamientos y experimentos. Sin embargo, sólo hubo diferencias significativas en San Pedro, donde las parcelas cultivadas previamente con maíz simple presentaron los valores mayores de ET, mientras que los más bajos se observaron en las parcelas que iniciaron la secuencia con CE/S y AR/M ($p < 0,01$, Cuadro 4.5).

La eficiencia en el uso del agua evapotranspirada (EUAb, ET) en los cultivos de maíz varió entre 22,5 y 35,7 $\text{kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$. Sólo en Pergamino hubo diferencias significativas entre tratamientos, como consecuencia de que la producción de biomasa difirió entre tratamientos sin que variaran las cantidades de agua evapotranspirada (Cuadro 4.5). Por este motivo, los valores de EUAb más altos se estimaron en los tratamientos con mayor producción de biomasa, obtenida en las parcelas que iniciaron la secuencia con soja o AR/S ($p < 0,05$).

Cuadro 4.5. Análisis comparado de los cultivos de maíz luego de trigo/soja, en parcelas que iniciaron la secuencia con diferentes sistemas de cultivo. El rendimiento (Rto; kg ha⁻¹) fue analizado como la resultante de la captura de recursos, la eficiencia en el uso de los mismos y el índice de cosecha. Por esto se presentan datos de radiación interceptada (RFAint; MJ m⁻²), eficiencia en el uso de la radiación para producir biomasa (EURb; g MJ⁻¹), evapotranspiración (ET; mm), eficiencia en el uso del agua para producir biomasa (EUAb; kg ha⁻¹mm⁻¹), biomasa aérea (kg ha⁻¹) e índice de cosecha (IC). Los tratamientos (Trat) se refieren a los cultivos que iniciaron la secuencia: soja (SJ), maíz (MZ), colza/soja (CO/S), cebada/soja (CE/S), trigo/soja (TR/S), arveja/soja (AR/S) y arveja/maíz (AR/M).

Trat	RFAint (MJ m ⁻²)	EURb (g MJ ⁻¹)	ET (mm)	EUAb (kg ha ⁻¹ mm ⁻¹)	Biomasa (kg ha ⁻¹)	IC	Rto (kg ha ⁻¹)					
San Pedro												
SJ	655	ab	2,43	568	bc	28,0	15921	a	0,45	7212	a	
MZ	587	c	2,45	609	a	23,8	14366	ab	0,43	6192	b	
CO/S	596	bc	2,28	597	ab	22,8	13606	b	0,46	6310	b	
CE/S	605	bc	2,21	525	d	22,5	13376	b	0,46	6160	b	
TR/S	600	bc	2,26	540	cd	25,3	13606	b	0,46	6203	b	
AR/S	667	a	2,48	571	b	28,9	16482	a	0,46	7644	a	
AR/M	577	c	2,29	534	d	24,7	13184	b	0,44	5776	b	
	*	ns	***	ns	**	ns	***					
Pergamino												
SJ	679	a	2,52	a	480	35,7	a	17095	a	0,48	8270	a
MZ	611	bc	2,39	ab	500	29,1	c	14565	c	0,46	6681	bc
CO/S	648	ab	2,32	b	498	30,0	bc	14973	bc	0,46	6991	abc
CE/S	645	ab	2,30	bc	525	28,2	c	14792	c	0,46	6836	abc
TR/S	654	ab	2,39	ab	543	28,8	c	15597	abc	0,48	7466	ab
AR/S	695	a	2,37	ab	495	33,3	ab	16449	ab	0,49	8027	ab
AR/M	589	c	2,12	c	464	26,9	c	12448	d	0,47	5822	c
	**	**	ns	**	***	ns	*					
Junín												
SJ	812	ab	1,87	608	24,9	15164	ab	0,52	7841	a		
MZ	743	e	1,87	593	23,4	13870	d	0,50	6894	c		
CO/S	760	de	1,92	563	25,8	14550	bc	0,49	7193	b		
CE/S	790	bc	1,79	582	24,3	14130	cd	0,50	7069	bc		
TR/S	775	cd	1,83	615	23,1	14151	cd	0,49	6982	c		
AR/S	829	a	1,86	612	25,1	15359	a	0,52	7919	a		
AR/M	716	f	1,84	577	22,9	13135	c	0,51	6670	c		
	***	ns	ns	ns	***	ns	***					

Letras diferentes indican diferencias significativas (LSD, $p < 0,05$); * $p < 0,1$; ** $p < 0,05$; *** $p < 0,01$; ns: diferencias no significativas (ANOVA).

c) Absorción de nitrógeno

Los contenidos de nitrógeno no difirieron entre tratamientos tanto en los granos como en los órganos vegetativos ($p > 0,1$). Sin embargo, el %N tendió a ser bajo en la parte vegetativa de las plantas de maíz de parcelas previamente cultivadas con AR/M. Al considerar la absorción total de N, hubo diferencias significativas entre tratamientos en San Pedro y Junín, mientras que en Pergamino la variación fue muy alta entre tratamientos sin que hubiera diferencias estadísticamente significativas (Cuadro 4.6). En general, la absorción de N fue mayor en los maíces cultivados en las parcelas que

iniciaron la secuencia con AR/S o soja que aquellas parcelas que iniciaron la secuencia con maíz o AR/M (Cuadro 4.6).

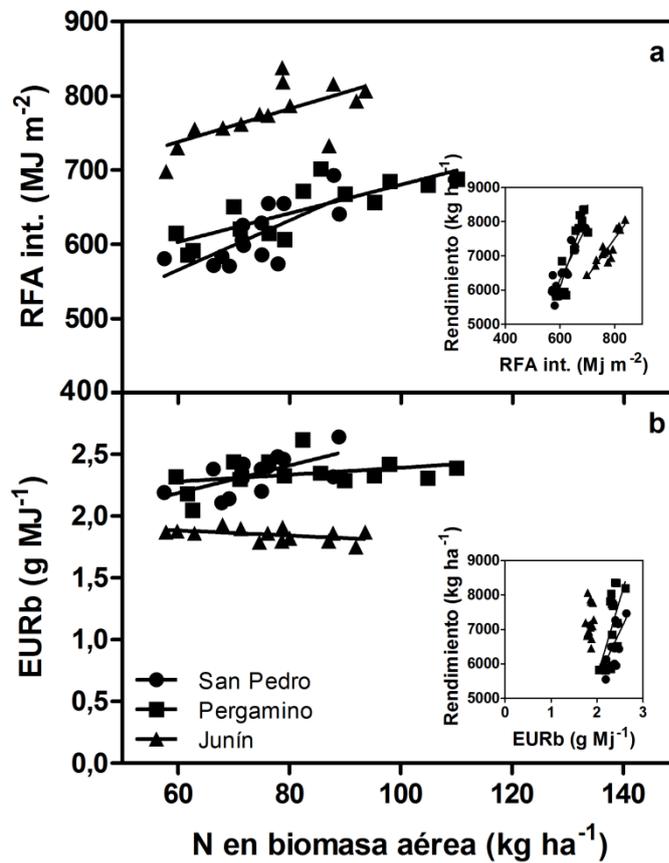


Figura 4.3.a) Radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada (RFA; MJ m⁻²) desde emergencia a madurez, en función del nitrógeno (N) total contenido en la biomasa aérea del cultivo de maíz a madurez [kg ha⁻¹; R²=0,51 (San Pedro); 0,65 (Pergamino); 0,43 (Junín); p<0,01], y rendimiento en grano (kg ha⁻¹) en función de la RFA interceptada por el cultivo [recuadro; R²=0,81 (San Pedro); 0,83 (Pergamino); 0,80 (Junín); p<0,0001]. b) Eficiencia en el uso de la RFA interceptada para producir biomasa (EURb; g MJ⁻¹) en función del nitrógeno (N) total contenido en la biomasa aérea del cultivo de maíz [kg ha⁻¹; R²=0,40 (San Pedro); 0,12 (Pergamino); 0,22 (Junín); p<0,01 (San Pedro)], y rendimiento en grano (kg ha⁻¹) en función de la EURb del cultivo [recuadro; R²=0,36 (San Pedro); 0,35 (Pergamino); 0,00 (Junín); p<0,05 (San Pedro y Pergamino)]. Cada punto corresponde a una repetición.

Los cultivos de maíz con mayor absorción de N fueron los más eficientes en la intercepción de RFA en todos los sitios, y también tuvieron la EURb más alta en San Pedro (Figura 4.3a y b). Estos incrementos en las eficiencias de intercepción y de uso de la RFA, por su asociación con la absorción de N, se reflejaron en mayores rendimientos en grano en los maíces (recuadros de la Figura 4.3).

Las mediciones de SPAD en antesis presentaron una clasificación en el ordenamiento de tratamientos similar a los obtenidos para la absorción de N y la intercepción de RFA (Cuadro 4.6). En este sentido, los cultivos de maíz en secuencias iniciadas con soja o AR/S siempre estuvieron entre los índices más altos de SPAD, mientras que los maíces en secuencias que empezaron con maíz o AR/M siempre estuvieron en el grupo con los índices de SPAD más bajos (Cuadro 4.6).

Cuadro 4.6. Contenido total de nitrógeno (N; kg ha⁻¹) en la biomasa aérea e índice de SPAD alrededor de antesis de los cultivos de trigo y maíz. En trigo, los valores de SPAD se obtuvieron midiendo en la hoja bandera, mientras que en maíz se midió en la hoja de la espiga, la superior y la inferior. Los tratamientos se refieren a los cultivos que iniciaron la secuencia: soja (SJ), maíz (MZ), colza/soja (CO/S), cebada/soja (CE/S), trigo/soja (TR/S), arveja/soja (AR/S) y arveja/maíz (AR/M).

Tratamiento	Trigo				Maíz			
	Captura de N (kg ha ⁻¹)		Índice SPAD		Captura de N (kg ha ⁻¹)		Índice SPAD	
San Pedro								
SJ	126,5	ab	43,8	ab	77,6	b	53,3	ab
MZ	108,0	bc	42,9	b	74,8	b	48,3	cd
CO/S	111,5	bc	44,2	a	73,2	b	51,0	abc
CE/S	96,2	c	43,6	ab	69,7	bc	49,6	c
TR/S	84,4	c	41,6	c	72,1	b	50,6	bc
AR/S	148,5	ab	44,6	a	88,4	a	53,7	a
AR/M	111,5	bc	44,0	ab	61,9	c	46,6	d
	**		**		***		***	
Pergamino								
SJ	112,4	a	43,9	bc	90,2		52,4	a
MZ	104,0	ab	44,8	ab	77,7		46,9	bc
CO/S	91,9	bc	42,9	de	82,3		48,9	ab
CE/S	81,1	cd	43,8	cd	80,5		48,3	abc
TR/S	66,9	d	42,7	e	82,6		49,1	ab
AR/S	117,6	a	45,6	a	97,0		51,8	a
AR/M	88,6	bc	44,8	ab	62,2		44,6	c
	***		***		ns		**	
Junín								
SJ	113,7		44,3	bcd	90,7	a	53,6	ab
MZ	117,9		43,6	d	61,4	c	49,8	bc
CO/S	114,5		45,3	ab	69,7	bc	47,9	c
CE/S	106,0		44,7	abc	86,0	ab	49,8	bc
TR/S	89,4		44,1	cd	75,4	abc	49,2	bc
AR/S	126,3		45,3	a	78,8	abc	54,8	a
AR/M	117,1		44,4	abcd	72,5	abc	49,1	bc
	ns		**		*		*	

Letras diferentes indican diferencias significativas (LSD, $p < 0,05$); * $p < 0,1$; ** $p < 0,05$; *** $p < 0,01$; ns: diferencias no significativas (ANOVA).

4.4 Discusión

En este capítulo no sólo se encontraron secuencias de cultivos que permitirían continuar intensificando los esquemas de rotación de cultivos en la Región Pampeana con vistas en incrementar la productividad, sino que además se obtuvo información relevante para el diseño de nuevas secuencias intensificadas (ver Capítulo 6, Sección 6.3). En los capítulos anteriores se demostró que los cultivos dobles son una opción viable para aumentar la productividad anual de la tierra. Los resultados presentados en este capítulo indican que está práctica, bien implementada, no afectaría negativamente a los rendimientos de los cultivos siguientes en la rotación. Los resultados prueban que la repetición de cultivos de cereales en las secuencias reduce sus rendimientos, mientras que las secuencias diversificadas permiten que los cereales alcancen rendimientos más altos. Los cultivos antecesores, a través de los patrones de uso de recursos y la calidad de los rastrojos, tendrían una gran influencia sobre la dinámica de ciertos nutrientes en el suelo y, por lo tanto, sobre la nutrición de los cultivos siguientes en la secuencia, siendo este un punto clave para diseñar exitosamente secuencias de cultivos intensificadas.

En trigo y maíz la absorción de N disminuyó en las secuencias con mayor participación de cereales (Cuadro 4.6). Este proceso es normalmente afectado cuando existe una oferta limitada de N, una demanda reducida o alguna combinación de ambos (Lemaire y Gastal, 2009). Una reducción en la demanda de N sería esperable cuando el crecimiento del cultivo es afectado por otros factores, como plagas, enfermedades, malezas, o incluso por co-limitación de otros nutrientes. En los experimentos de este trabajo, las adversidades bióticas fueron efectivamente controladas en todos los tratamientos. En cambio, se detectaron variaciones en el estado nutricional de los cereales mediante mediciones del contenido de clorofila foliar (índice de SPAD), aún cuando el N disponible en el suelo a la siembra había sido homogeneizado con una fertilización de base.

Las diferencias en la absorción de N entre tratamientos estarían relacionadas con la dinámica de la descomposición de los rastrojos de los cultivos antecesores y con los periodos de inmovilización de nutrientes, que afectan la fertilidad actual y están determinados por la calidad y cantidad de residuos (Kumar y Goh, 1999; Domínguez et al., 2005). En este sentido, los rastrojos de leguminosas son degradados rápidamente debido a su alta concentración de proteínas y su baja cantidad de lignina y otros inhibidores, tal como los compuestos polifenólicos, presentando una menor inmovilización de nitratos durante la descomposición de los rastrojos que en los de cereales (Jensen, 1994, Echeverría y García, 2005).

Cuando la absorción de N es limitada, las plantas reducen el N soluble en hojas y/o la expansión de las hojas, causando la reducción en la EUR, la RFA interceptada, o en ambas, dependiendo de la severidad del déficit (Lemaire y Gastal, 2009; Massignam et al., 2012). En este trabajo, las diferencias en la absorción de N en el trigo y el maíz

resultaron en una amplia variabilidad en la intercepción de RFA y en la EUR, determinando diferencias en los rendimientos de ambos cultivos en los distintos tratamientos.

4.4.1 Efectos de los antecesores sobre el trigo

Los cultivos de trigo presentaron grandes diferencias en su estado nutricional durante la estación de crecimiento. La absorción total de N difirió entre tratamientos, a pesar de que los niveles iniciales de N en el suelo habían sido igualados a la siembra por medio de fertilización. Los cultivos de trigo que más N absorbieron presentaron mayores eficiencias de intercepción y de uso de la RFA que los tratamientos con menor absorción de N, los que presentaron reducciones en el área foliar y en los valores de SPAD. En concordancia con trabajos previos (Gallagher y Biscoe, 1978), la intercepción de RFA fue más susceptible que la EUR cuando la absorción de N se restringió. En este sentido, la intercepción de RFA se redujo cuando la absorción de N fue menor a 120 kg ha^{-1} , pero la EUR no resultó afectada hasta valores inferiores a 92 kg ha^{-1} . Estas reducciones en la intercepción de RFA estuvieron fuertemente asociadas con las caídas en los rendimientos en grano (Figura 4.2).

Los rastrojos de cereales de invierno y de leguminosas presentaron las menores y mayores concentraciones de N, respectivamente. Los rastrojos con alta relación C:N disminuyen la mineralización e incrementan los periodos de inmovilización de nutrientes (Kumar y Goh, 2002; Domínguez et al., 2005; Danga et al., 2009), y, por lo tanto, afectan la disponibilidad de N en el suelo y su absorción por los cultivos (Kumar y Goh, 1999; Seymour et al., 2012). Los resultados aquí obtenidos concuerdan con aquellos de Kumar y Goh (2002), quienes demostraron que la absorción de N está asociada con la relación C:N de los rastrojos y, luego, con los rendimientos de los cultivos de trigo. En las parcelas donde se realizaron cultivos dobles en el primer año, las diferencias en la absorción de N por parte del trigo parecieron estar determinadas por las características de los rastrojos de los cultivos invernales más que por la de los cultivos de segunda.

Además, los cultivos de trigo sembrados a continuación de TR/S presentaron bajos contenidos de azufre (S) en el suelo a la siembra en Pergamino y, especialmente, en San Pedro (Cuadro 4.2). El S usualmente favorece la absorción de N de las plantas de trigo (Salvagiotti et al., 2009) y promueve la aparición de macollos (Alzueta et al., 2012). Considerando que se aplicaron altas dosis de fertilizante nitrogenado, es importante remarcar que la importancia del S aumenta a medida que la disponibilidad de N crece, afectando el rendimiento producido por unidad de N proveniente del fertilizante (Salvagiotti y Miralles, 2008). Por esta razón, el análisis de la disponibilidad de S en el suelo a la siembra del trigo debería implementarse, especialmente, al diseñar una secuencia de cultivos con alta proporción de trigo.

El rango de variación de agua evapotranspirada (ET) fue menor a 16% en los tres experimentos, sin que hubiera efectos significativos entre tratamientos. Sin embargo, los cultivos antecesores afectaron la eficiencia de uso del agua ET (Cuadro 4.3). Aquellos cultivos de trigo con alta absorción de N presentaron elevados valores de EUAb, seguramente debido a una reducción de la evaporación de agua desde el suelo como resultado de una mayor cobertura foliar y/o a un aumento de la eficiencia en el uso del agua transpirada (Caviglia y Sadras, 2001; Seymour et al., 2012). La intercepción de RFA por los cultivos reduce la incidencia de radiación a nivel del suelo y, por lo tanto, la evaporación es menor. Por otro lado, una alta concentración de N foliar puede derivar en mejoras en la capacidad fotosintética con solo pequeños aumentos en la tasa de transpiración (Cabrera-Bosquet et al., 2009).

4.4.2 Efecto de los antecesores sobre la soja de segunda

La soja de segunda respondió levemente al sistema de cultivo que inicio las secuencias. La conjunción de varios factores atenuaron las variaciones en la productividad de la soja de segunda. Primero, el retraso de la fecha de siembra y el consumo de agua de los trigos previos redujeron los rendimientos alcanzables y homogeneizaron el contenido de agua inicial entre tratamientos (datos no presentados); segundo, la fijación simbiótica de N posiblemente haya atenuado las diferencias residuales en la disponibilidad de este nutriente.

Sin embargo, la falta de lluvias luego de la madurez de los trigos antecesores restringió la disponibilidad de humedad en el estrato superficial del suelo al momento de sembrar la soja de segunda. Esta condición retrasó un mes la siembra de soja en Junín (9 de enero), mientras que se encontraba cerca del límite inferior necesario para la germinación de las semillas en San Pedro y Pergamino. En estos dos sitios, se encontraron más y mayores nódulos en plantas creciendo en las parcelas que presentaban mayores cantidades de rastrojos de trigo. Las grandes cantidades de rastrojos mantienen la humedad en la superficie del suelo, permitiendo niveles de germinación y nodulación apropiados cuando las lluvias escasean (Diaz Zorita y Fernandez Canigia, 1999). Por este motivo, el rendimiento de la soja de segunda estuvo asociado con la cantidad de rastrojos del trigo previo en Pergamino y, especialmente, en San Pedro (asociación no presentada; datos en Cuadros 4.3 y 4.4). En Junín, el retraso en la fecha de siembra redujo los rendimientos alcanzados. Además, las lluvias antes de la siembra atenuaron las posibles diferencias observadas entre tratamientos en los otros sitios (Cuadro 4.4).

4.4.3 Efectos de los cultivos antecesores sobre maíz.

La productividad de los cultivos de maíz varió ampliamente entre tratamientos, a pesar de que las parcelas presentaban similares contenidos de agua a la siembra, puesto

que todas habían sido cultivadas con trigo/soja en 2011/12, habiendo tenido diferentes cultivos en 2010/11. Sin embargo, es importante destacar que los cultivos de maíz fueron sub-fertilizados a la siembra, para así ampliar las diferencias entre tratamientos en la fertilidad del suelo y, en consecuencia, sus posibles respuestas en productividad.

La absorción de N por parte de los cultivos de maíz varió entre 62 y 91 kg ha⁻¹, valores por debajo de los esperados para lograr altos rendimientos en la Pampa Ondulada (Satorre et al., 2004). Los valores mayores correspondieron a los cultivos de maíz que crecieron en las secuencias iniciadas con AR/S o soja. En cambio, los menores valores fueron siempre obtenidos en las parcelas que iniciaron las secuencias con AR/M. Las limitaciones por N reducen la biomasa de maíz al afectar negativamente el área foliar y la tasa fotosintética y acelerando la senescencia foliar (Massingnam et al., 2009; Massingnam et al., 2011). En consecuencia, cuando las limitaciones de N son severas, el contenido de N foliar se asocia tanto con la intercepción de RFA como con la EUR (Massingnam et al., 2011). Esto concuerda con los resultados de este capítulo que mostraron una asociación entre los valores de SPAD en antesis y la intercepción de RFA (Cuadro 4.6).

Tal como se observó para el caso de trigo, los rendimientos de maíz también disminuyeron cuando este cultivo se repitió en las secuencias. Este efecto fue aún mayor cuando el antecesor fue maíz de segunda, el que se cosechó más tarde y dejó cantidades de rastrojos similares o mayores a los cultivos simples de maíz (Capítulo 3). La depresión de la disponibilidad de nitratos por inmovilización suele ocurrir cuando se degradan rastrojos con alta relación C:N (Kumar y Goh; 1999; Dominguez et al., 2005). El marcado déficit nutricional observado en los cultivos de maíz en las secuencias iniciadas con maíz simple o AR/M podría deberse a una combinación factores: i) la gran cantidad de rastrojos acumulados, ii) la alta proporción de residuos de cereales y iii) el nivel sub-óptimo de N inicial utilizado para homogeneizar los tratamientos (100 kg ha⁻¹). Con relación a la influencia de estos factores, D'Acunto (2015), realizó mediciones en tres tratamientos contrastantes de los experimentos de esta tesis. Como resultado, obtuvo diferencias significativas en la biomasa de rastrojo presente en el suelo previo a la siembra de maíz en las parcelas que iniciaron las secuencias con AR/M (10670 kg ha⁻¹), CE/S (7482 kg ha⁻¹) y soja de primera (5063 kg ha⁻¹). Incrementar los aportes de rastrojos contribuye a la sustentabilidad de los sistemas productivos (Viglizzo y Jobbágy, 2010). Sin embargo, debe equilibrarse la proporción de gramíneas y leguminosas en las secuencias para evitar mermas en la disponibilidad de N y mayores costos por fertilización.

Los rendimientos potenciales de maíz limitados por agua (Van ittersum et al., 2013) para el año 2012-13 fueron 8505, 12047 y 11404 kg ha⁻¹ en San Pedro, Pergamino y Junín, respectivamente. Esta información fue obtenida de cultivos sembrados en parcelas cercanas a los experimentos en condiciones sin limitaciones nutricionales. La diferencia porcentual entre el rendimiento potencial y el alcanzado en las parcelas que iniciaron la secuencia de cultivos con AR/S aumentó hacia los

ambientes con mayores rendimientos potenciales, desde 10% en San Pedro hasta 30% en Pergamino. En este sentido, la alternancia de cereales con leguminosas podría implementarse para reducir la dependencia de fertilizantes inorgánicos, especialmente en ambientes con restricciones edáficas y/o hídricas. Este tipo de práctica ha sido probada con éxito en estudios realizados en Togo (Sogbedji et al., 2006).

4.4.4 Comentarios finales de la discusión

La secuencia de cultivos soja-trigo/soja-maíz es la más común en la Pampa Ondulada debido a que permite lograr altos rendimientos y obtener cuatro cosechas en tres años consecutivos. Las nuevas alternativas a la secuencia típica surgen del reemplazo de la soja de primera que inicia la secuencia. La inclusión de arveja/soja de segunda como sistema inicial aumentó la productividad en la estación inicial sin impactos negativos y, en algunos casos, con efectos positivos en los cultivos que siguen en la secuencia.

Diversificar las especies cultivadas en las secuencias es clave para incrementar el índice de intensificación de los sistemas de producción de granos, referido al número de cultivos por unidad de tiempo. Esta sugerencia/recomendación se sostiene en que los cultivos de trigo sembrados luego de trigo/soja de segunda produjeron los rendimientos más bajos entre todos los tratamientos (Cuadro 4.3). Además, los cultivos de maíz en la última estación presentaron los menores rendimientos cuando fueron cultivados en parcelas previamente sembradas con maíz o arveja/maíz de segunda (Cuadro 4.5). Dado que las ventajas productivas de diversificar los sistemas de cultivos son universales (Bullock, 1992; Karlen et al., 1994; Berzenyi et al., 2000; Fischer et al., 2002; Grant et al., 2002; Seymour et al., 2012), el uso de secuencias más diversificadas debería ser evaluada en sistemas intensificados de otras regiones que ya implementan cultivos dobles a gran escala, como el sudeste de Estados Unidos, el norte de China, el sur de Asia y el sur de Brasil (Fischer et al., 2014), para determinar las posibilidades de incrementar los índices de intensificación y/o la productividad de los sistemas de producción de granos en esas regiones.

4.5 Conclusiones

Los resultados presentados en este capítulo indicaron que la absorción de nutrientes por los cereales en las secuencias puede ser afectada por los cultivos antecesores, independientemente de que se homogenice la disponibilidad de los nutrientes en el suelo. Esto se debió, posiblemente, al momento en el que residuos con alta relación C:N interactuaron con la fracción orgánica del suelo, inmovilizaron N desde el suelo, y deprimieron la cantidad de N-NO₃ disponible para los cultivos en

crecimiento. Las secuencias de cultivo intensificadas deben alternar cereales con legumbres y también con otros tipos de cultivos. Esto tiene como objetivo el logro de altos aportes de rastrojos que estén bien balanceados en carbono y nitrógeno.

Secuencias más intensificadas y diversas aparecen como opciones viables para afrontar los desafíos de diseñar sistemas más productivos, estables y resilientes, reduciendo simultáneamente el impacto ambiental. Sin embargo, la realización de más cultivos por año requiere más insumos externos, tales como pesticidas y combustible, y también podría aumentar la tasa de exportación de nutrientes. Estas posibles desventajas aún deben ser analizadas y contrastadas con las ventajas descritas en este capítulo.

-CAPÍTULO 5-

**5 IMPACTO DE SECUENCIAS DE CULTIVO INTENSIFICADAS SOBRE
LAS COMUNIDADES DE MALEZAS**

5.1 Introducción

Las malezas poseen varios atributos fisiológicos y ecológicos que les han permitido adaptarse a los cambios en los sistemas de producción desde los inicios de la agricultura (Baker, 1974; Sutherland, 2004; Radosevich et al., 2007a). La actividad del hombre, a través del diseño de los sistemas productivos, es el factor más importante que determina la abundancia, la presencia y la distribución espacial de las especies de malezas (Radosevich et al., 2007a). El diseño de los sistemas de producción incluye la organización de los cultivos en el tiempo (rotaciones) que define la disponibilidad de espacios en los que podrían proliferar las malezas.

Las especies vegetales que coexisten en determinado sitio forman comunidades e interactúan entre sí, tal como ocurre entre los cultivos y las malezas que los acompañan (Radosevich et al., 2007b; Poggio, 2012). Las interacciones que pueden ocurrir entre cultivos y las malezas acompañantes son los distintos tipos de competencia, la explotación, la alelopatía y la facilitación. En este contexto, la principal preocupación de los productores agrícolas es la pérdida de rendimiento generada por la competencia entre los cultivos y las malezas por recursos tales como la radiación, el agua y los nutrientes. Asimismo, la explotación de recursos por parte de las malezas durante el periodo de barbecho, previo a la implantación de los cultivos, también suele ser cuidadosamente monitoreada por los productores. Reducir las pérdidas de rendimiento es el principal motivo por el que los productores controlan las malezas (Radosevich et al., 2007b).

La captura de recursos por los cultivos está positivamente correlacionada con el nivel de supresión del crecimiento de las malezas acompañantes (Mohler y Liebman, 1987; Satorre y Ghera, 1987; Poggio, 2005; Poggio y Ghera, 2011). En este sentido, la abundancia de malezas puede utilizarse como un indicador de sub-utilización de los recursos disponibles (Radosevich et al., 2007b). Las prácticas agronómicas que incrementen la captura de recursos por los cultivos durante la estación de crecimiento, tal como los cultivos dobles, podrían reducir la frecuencia de las especies de maleza que compiten con los cultivos. Por esta razón, el estudio del uso de recursos en las secuencias de cultivos intensificadas, presentado en los capítulos anteriores, se complementará aquí con la caracterización de los cambios en las comunidades de malezas en las mismas condiciones productivas.

En los capítulos previos se mencionó que, en las Pampas de Argentina, los sistemas de cultivo doble normalmente consisten en secuenciar una especie invernal seguida de una estival sembrada en fecha tardía. Comparados con los cultivos simples, el uso de cultivos dobles reduciría los espacios para la proliferación de malezas mediante la reducción de los periodos de barbecho y el aumento de la captura de los recursos disponibles por los cultivos durante el ciclo de crecimiento. Además, a esto se añade el efecto de la rotación de cultivos con distintas características agronómicas y

ecofisiológicas. Al rotar cultivos diferentes, por ejemplo, en términos de fechas de siembra, estaciones de crecimiento, patrones de uso de recursos, habilidades competitivas y prácticas de manejo, la regeneración del nicho de las distintas especies de malezas puede ser interrumpida o alterada y, así, podría reducirse el crecimiento poblacional de algunas especies de maleza (Grubb, 1977; Covarelli y Tei, 1988; Schreiber, 1992; Blackshaw, 1994).

Existe evidencia de que la siembra de cultivos de cobertura⁴ antes de un cultivo de grano reduce el establecimiento y crecimiento de las malezas y, en consecuencia, disminuye el número de semillas y/o propágulos vegetativos que infestan los cultivos siguientes. Los cultivos de cobertura suprimen el crecimiento de las malezas al competir por recursos y afectan la germinación y establecimiento de las malezas al cambiar las condiciones ambientales (Liebman y Davis, 2000). Este último punto ocurre porque las especies de malezas exhiben pulsos de germinación característicos (Egley y Williams, 1991; Popay et al., 1995) en respuesta a factores ambientales como la temperatura del suelo, la intensidad y la calidad de la luz (Benech Arnold et al., 2000; Batlla y Benech Arnold, 2007). Sin embargo, los efectos sobre las malezas de los cultivos dobles en sistemas de producción de granos no han sido estudiados hasta el presente. En estos sistemas, es esperable que la intensificación no sólo incremente la importancia de la competencia, sino que también podría reducir el establecimiento de algunas especies de malezas (Welden y Slauson, 1986).

Los cambios florísticos en las comunidades de malezas podrían explicar desde otra perspectiva el uso de los recursos disponibles por los cultivos, dado que las malezas que crecen junto con los cultivos se ubican en tiempo y espacio donde disponen de recursos no aprovechados por los mismos (Swanton et al., 1993, Guglielmini et al., 2007). En este capítulo se evalúan la mayoría de los sistemas analizados en los capítulos anteriores: los cultivos simples de soja y de maíz, y los cultivos dobles compuestos por arveja/soja, arveja/maíz y cereal/soja (trigo/soja y cebada/soja en conjunto). Estos sistemas de cultivo iniciales fueron seguidos por una única secuencia compuesta por trigo/soja de segunda-maíz en las dos estaciones siguientes.

El objetivo de este capítulo (objetivo específico IV) es “*estudiar la respuesta de las comunidades de malezas ante los cambios ambientales generados por las variaciones en la intensificación y en las especies cultivadas que componen las secuencias*”. Se espera que los sistemas de producción que incrementan la diversidad de cultivos, la captura total de recursos y la ocupación de espacios, tal como los que incluyen cultivos dobles, afectan la composición de las comunidades de malezas,

⁴Cultivos con un propósito diferente a la producción de granos. Crecen específicamente para mantener el suelo cubierto, protegiéndolo de la erosión, evitando la pérdida de nutrientes por lavado y escurrimiento y, en caso de ser leguminosa, incorporando N al sistema. Se diferencian de una pastura porque no son de renta directa y crecen fuera de estación dentro de un sistema de siembra de cultivos anuales (Ernst, 2004).

reduciendo la frecuencia de ciertas especies. A su vez, se espera que las comunidades de malezas diverjan al cultivar sistemas diferentes, mientras que tienden a converger al implementar la misma secuencia en los años sucesivos.

5.2 Materiales y métodos

5.2.1 *Sitios y mediciones*

Los datos relevados en este capítulo fueron obtenidos mediante tres mediciones durante el desarrollo de cada uno de los tres experimentos a campo realizados en San Pedro, Pergamino y Junín, detallados en las secciones 3.2.2 y 4.2.2. Los datos utilizados para caracterizar las comunidades de malezas fueron obtenidos mediante censos realizados en cada uno de los tres cultivos estivales de las secuencias llevadas a cabo en los experimentos detallados en los Capítulos 3 y 4. En el primer verano, los censos se realizaron entre el 15 y 16 de febrero para caracterizar la comunidad de malezas establecida hacia el final de la primera estación de crecimiento en los cultivos de maíz y de soja, ya sean simples o de segunda. En el segundo verano, los censos se realizaron el 8 de marzo en cultivos de soja de segunda para determinar la comunidad asociada a este cultivo en los diferentes tratamientos. Previo al tercer verano, los censos se realizaron el 7 de noviembre, antes del último control de malezas, para así caracterizar la comunidad de malezas que fue el blanco del control químico en los cultivos de maíz.

5.2.2 *Manejo de los cultivos*

Los tratamientos estudiados en este capítulo son los descritos en los capítulos previos. Es pertinente recordar que los tratamientos se diferenciaron solamente en las especies cultivadas durante el primero de los tres años que duraron las secuencias. Luego de ese primer año se cultivó la misma secuencia en todas las parcelas, la que estuvo compuesta por trigo/soja (año 2) y maíz (año 3). Las prácticas de manejo de los cultivos (p. ej. fecha de siembra, fertilización, densidad de plantas, distanciamiento entre hileras y cultivares seleccionados) se detallan en las secciones 3.2.2 y 4.2.2. A continuación se presenta el manejo de herbicidas realizado durante el primero de los años experimentales (2010-2011), el que difirió en los principios activos utilizados entre tratamientos debido a las diferencias en las especies cultivadas. El manejo de herbicidas en cada cultivo fue similar a los planteos productivos de lotes comerciales para lograr una fiel caracterización de los sistemas extensivos (Cuadro 5.1). En los dos años siguientes, todos los tratamientos recibieron el mismo manejo de herbicidas dentro de cada sitio, siendo similares a los correspondientes a cereal/soja y maíz en el primer año (Cuadro 5.1). Los herbicidas fueron aplicados con pulverizadoras terrestres autopropulsadas.

Cuadro 5.1. Herbicidas utilizados en cada uno de los tratamientos evaluados. (+) implica que los herbicidas fueron utilizados conjuntamente en una misma aplicación; (//) significa que los herbicidas fueron aplicados en momentos diferentes. El tratamiento cereal/soja incluye a trigo/soja y cebada/soja en su conjunto.

2010/11	Cereal/Soja	Arveja/Soja	Arveja/Maíz	Soja	Maíz
San Pedro					
Barbecho	GF	GF	GF	GF	GF
Pre-emergente invernal		GF + IM	GF + IM		
Post-emergente invernal	DC + MS	PQ	PQ		
Pre-emergente estival				GF + SA	ATZ + MT + GF
Post-emergente estival	GF // GF	GF // GF	GF	GF	GF
Pergamino					
Barbecho	GF + 2,4-D	GF + 2,4-D	GF + 2,4-D	GF + 2,4-D	GF + 2,4-D
Pre-emergente invernal					
Post-emergente invernal	DC + MS	IM // PQ	IM // PQ		
Pre-emergente estival				GF + CL	GF + ATZ
Post-emergente estival	GF // GF	GF // GF	GF	GF	GF
Junín					
Barbecho	SF	SF	SF	SF // SF + GF	SF // SF + GF
Pre-emergente invernal					
Post-emergente invernal	DC + MS	IM // PQ	IM // PQ		
Pre-emergente estival				GF	SF + ATZ
Post-emergente estival	GF // GF // GF	GF // GF // GF	GF // GF	SF	GF

ATZ: Atrazina; CL: Clorimurón; DC: Dicamba; IM: Imidazolinona; GF: Glifosato; MT: Metalaclor; MS: Metsulfuron; PQ: Paraquat; SA: Sulfato de amonio; SF: Sulfosato.

5.2.3 Censos de malezas

Las comunidades de malezas fueron censadas en las tres estaciones cálidas comprendidas entre 2011 y 2013. Los censos fueron realizados caminando en “zig-zag”, recorriendo la totalidad de cada una de las parcelas y evitando los bordes (aprox. 2 m). En cada parcela, los censos consistieron en listar las especies malezas presentes en un marco de 0,1 m² (0,33 m x 0,33 m), realizando un total de 80 mediciones en cada una de las tres sesiones de muestreo. En los tres censos se calculó la frecuencia de aparición de cada especie en todos los tratamientos, sin considerar la cobertura de las especies, el tamaño de los individuos o su estado fenológico (Mas et al., 2010).

5.2.4 Análisis de los datos

Inicialmente, se realizó una caracterización de las comunidades de malezas en cada uno de los tres sitios. Luego, se realizó un análisis multivariado no paramétrico (NMDS, non-metrical multidimensional scaling; Clarke, 1993; Buttigieg y Ramette,

2014) basado en análisis de disimilitudes (ANOSIM) de las comunidades de malezas para evaluar las diferencias en la composición florística entre distintos factores. Se analizaron los efectos sobre la composición de la comunidad de malezas de los factores sitio (San Pedro, Pergamino, Junín), año, tratamiento (secuencia) y especie cultivada al momento en que se realizó cada censo (i.e. maíz o soja, sin discriminar entre cultivos de primera o de segunda). Luego, se repitieron los análisis agrupando los tratamientos según el cultivo estival de la primera estación, quedando dos grupos: i) los que tuvieron soja en el primer verano [soja de primera, arveja/soja y cereal/soja (incluye trigo/soja y cebada/soja)] y ii) los que tuvieron maíz (maíz de primera y arveja/maíz). Finalmente, se hizo un seguimiento de los cambios en estos dos grupos durante los tres años que duró el experimento.

El objetivo del análisis NMDS fue visualizar el nivel de similitud entre comunidades de malezas (Figura 5.1, a modo de ejemplo). Se asume que las comunidades eran iguales en todas las parcelas al inicio de los experimentos (Figura 5.1a). Luego, se espera que la variación en los patrones temporales de uso de los recursos, generada por la intensificación, la secuencia o la elección de las especies cultivadas en el primer año experimental, genere divergencias parciales (Figura 5.1b y c) o totales en las comunidades de malezas (Figura 5.1d). Por otro lado, se espera que la estructura y composición de las comunidades de malezas de los diferentes tratamientos vuelvan a asemejarse luego de utilizar la misma secuencia de cultivos en los dos años siguientes.

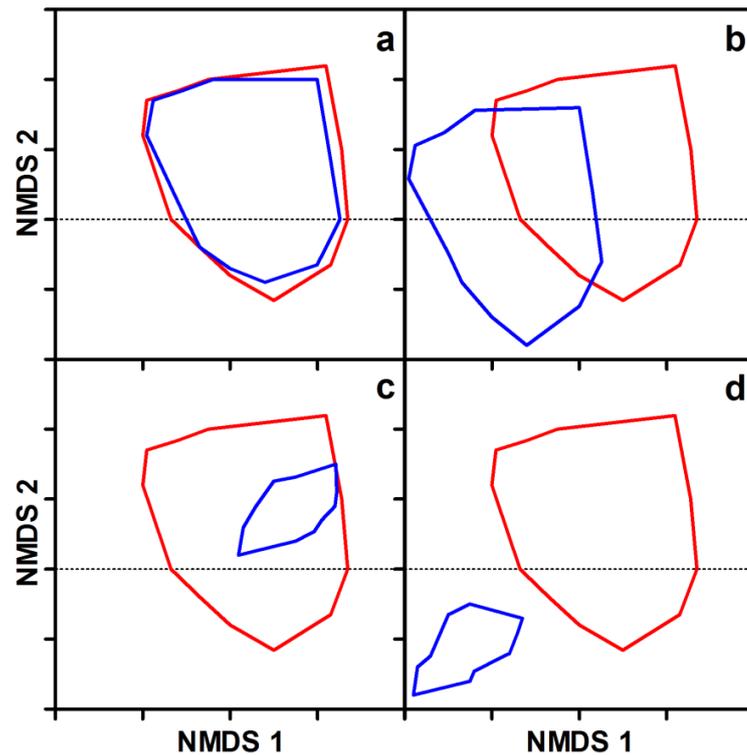


Figura 5.1. Grados de similitud entre dos comunidades de malezas utilizando el análisis multivariado NMDS (*non-metrical multidimensional scaling*). La superposición de los contornos indica el grado de similitud entre dos comunidades. a) Ambas comunidades son iguales; b) existe superposición parcial en las especies que componen cada una de las comunidades; c) las especies que componen una comunidad están incluidas en la otra; d) Las comunidades no comparten especies.

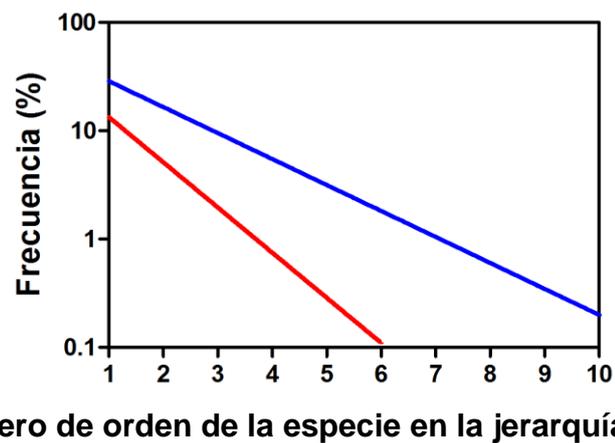


Figura 5.2. Estructura de las comunidades de maleza basada en la asociación entre la frecuencia de las especies en función de su ubicación en la jerarquía de frecuencia. La clasificación se realizó ordenando las especies de malezas de más frecuente a menos frecuente. Se presentan dos comunidades contrastantes a modo de ejemplo.

La estructura de la comunidad de malezas de cada tratamiento se caracterizó con análisis de regresión. Para ello, primero se clasificaron las malezas de la más frecuente a la menos frecuente. Luego, se ajustaron funciones exponenciales para caracterizar la caída de la frecuencia de aparición de las especies malezas en función del orden de las especies en la jerarquía de frecuencias. Estas regresiones pueden analizarse mediante dos parámetros: la ordenada al origen y la pendiente. La ordenada es un indicador de la frecuencia de las especies más frecuentes, mientras que la pendiente es un indicador de la dominancia que esas especies más frecuentes ejercen en la comunidad. En la Figura 5.2 se contrastan dos comunidades a modo de ejemplo. La identificada en rojo, en comparación con la otra en azul, presenta menor ordenada al origen, mientras que la pendiente es más pronunciada. Esto indica que las especies más frecuentes en la comunidad en rojo tienen menor frecuencia que en la azul pero, al mismo tiempo, ocupan una mayor proporción del espacio cubierto por las malezas. Los parámetros de las regresiones fueron analizados mediante análisis de la varianza para compararlos entre tratamientos. Finalmente, se exploraron las asociaciones entre los parámetros calculados para cada una de las comunidades de malezas y la cobertura de los sistemas cultivados.

Para estimar el nivel de restricción en la disponibilidad de recursos para las malezas, se cuantificó la ocupación del espacio físico y temporal por los cultivos durante el invierno (I), la primavera (P) y el verano (V) de la primera estación de crecimiento (2010-2011). Para ello, se calculó el número de días en el que cada sistema de cultivo empleado durante el primer año interceptó una alta proporción de la RFA incidente (>75%), es decir que presentó alta cobertura. El valor obtenido se utilizó como una medida de la duración de las etapas durante las que los cultivos dominan el espacio aéreo, presentando así, capacidad tanto para restringir el establecimiento de las malezas, como de suprimir su crecimiento.

5.3 Resultados

5.3.1 Composición de las comunidades de malezas

Se relevó un total de 22 especies en los tres censos realizados, listándose 15, 13 y 19 especies de malezas en San Pedro, Pergamino y Junín, respectivamente (Cuadro 5.2). Las especies con mayor frecuencia de aparición, en general, fueron *Echinochloa colona*, *Digitaria sanguinalis*, *Stellaria media*, *Conyza bonariensis* y *Anoda cristata*, mientras que *Oxalis conorrhiza* y *Datura ferox* fueron especies de importancia en Junín y *Commelina erecta* en San Pedro.

Cuadro 5.2. Frecuencia (%) promedio de las especies maleza relevadas en cada sitio, clasificadas de mayor a menor según la frecuencia promedio global de los 9 censos (3 sitios x 3 años).

#	Nombre científico	EPP0*	Frecuencia (%)			
			San Pedro	Pergamino	Junín	Promedio
1	<i>Echinochloa colona</i> (L.) Link.	ECHCO	17,02	30,65	2,35	16,68
2	<i>Digitaria sanguinalis</i> (L.) Scopoli.	DIGSA	0,42	0,30	29,43	10,05
3	<i>Stellaria media</i> (L.) Cirillo	STEME	0,06	13,66	0,21	4,64
4	<i>Conyza bonariensis</i> (L.) Cronquist var. <i>bonariensis</i>	ERIBO	5,42	1,58	6,88	4,62
5	<i>Anoda cristata</i> (L.) Schldl.	ANVCR	2,92	0,33	9,14	4,13
6	<i>Commelina erecta</i> L. var. <i>erecta</i>	COMER	10,12	-	0,42	3,51
7	<i>Daturaferox</i> L.	DATFE	0,03	0,03	4,38	1,48
8	<i>Oxalis conorrhiza</i> Jacq.	OXACH	0,06	0,09	3,54	1,23
9	<i>Coronopus didymus</i> SM.	COPDI	2,71	0,24	0,71	1,22
10	<i>Sonchus oleraceus</i> L.	SONOL	1,25	0,18	0,63	0,68
11	<i>Tagetes minuta</i> L.	TAGMI	-	-	1,93	0,64
12	<i>Xanthium spinosum</i> L.	XANSI	-	-	1,88	0,63
13	<i>Lamium amplexicaule</i> L.	LAMAM	-	1,85	-	0,62
14	<i>Euphorbia serpens</i> Kunth.	EPHSN	-	0,63	1,13	0,59
15	<i>Chenopodium album</i> L.	CHEAL	0,09	-	1,31	0,47
16	<i>Portulaca oleracea</i> L.	POROL	0,12	0,45	0,63	0,40
17	<i>Xanthium cavanillesii</i> Schouw	XANSP	0,74	-	-	0,25
18	<i>Amarantus quitensis</i>	AMAQU	-	-	0,33	0,11
19	<i>Dichondramicrocalyx</i> (Hallier f.) Fabris	DIORM	0,09	-	0,06	0,05
20	<i>Cirsium vulgare</i> (Savi) Ten.	CIRVU	-	0,03	0,09	0,04
21	<i>Solanum sisymbriifolium</i> Lam.	SOLSI	0,12	-	-	0,04
22	<i>Taraxacum officinale</i> G. Weber ex F.H. Wigg.	TAROF	-	-	0,03	0,01

*Ex código Bayer (<http://eppt.eppo.org>)

Hubo diferencias en la riqueza de cada parcela entre sitios como promedio de todos los relevamientos ($p < 0,0001$), hallándose 7,6 especies en Junín, 4,4 en San Pedro y 3,2 en Pergamino. Por otro lado, no se encontraron diferencias significativas en la riqueza promedio entre tratamientos, la que varió en un rango entre 4,6 y 5,7 especies de malezas.

La composición florística de las comunidades de malezas difirió entre sitios (ANOSIM-R=0,667; $p < 0,0001$; NMSD: Figura 5.3d). Además, dado que la interacción entre sitio y tratamiento fue significativa ($p < 0,0001$), se procedió a analizar los sitios por separado. Si bien el efecto de los tratamientos fue significativo ($p < 0,0001$), las variaciones en la composición florística se asociaron principalmente con el cultivo creciendo en el momento del censo, ya sea soja o maíz ($p < 0,0001$, Figura 5.3). Es decir que las comunidades de malezas cambiaron en años sucesivos, siguiendo patrones asociados con la secuencia de los cultivos elegidos en todas las parcelas de los tres experimentos (Figura 5.3).

Las diferencias florísticas fueron amplias en el primer censo, las que estuvieron asociadas con la especie estival creciendo en el momento del muestreo ($p < 0,0001$), soja o maíz, sin que se distinguiera si estos eran simples o de segunda. Las diferencias florísticas entre las parcelas cultivadas con maíz y con soja en el primer año fueron caracterizadas por contornos diferentes, cuya superposición fue escasa o nula. Luego de que todas las parcelas se sometieran a una misma secuencia de cultivos, las composiciones florísticas tendieron a asemejarse en Pergamino y San Pedro. Esto se observa siguiendo la dinámica y superposición de los contornos que definen la comunidad de malezas de cada uno de los dos grupos de tratamientos, maíz y soja, a lo largo de los tres años (Figura 5.3).

D. sanguinalis fue la especie de maleza dominante en Junín durante el primer año. Esto se mantuvo en los años siguientes, especialmente en los tratamientos que iniciaron la secuencia con maíz o arveja/maíz. Los tratamientos restantes presentaron una creciente dominancia de *C. bonariensis*. En Pergamino, *S. media* (cereal/soja y soja) y *E. colona* (maíz, arveja/maíz y arveja/soja) fueron las malezas más frecuentes en la primera estación de crecimiento. En la segunda estación de crecimiento, la comunidad de malezas de todos los tratamientos estuvo dominada por *S. media*, mientras que *E. colona* fue la maleza más frecuente en todos los tratamientos en la última estación de crecimiento, acompañando los cultivos de maíz. En San Pedro, el primer año, la comunidad de malezas acompañante de la soja estuvo dominada por *C. bonariensis*, mientras que los demás tratamientos presentaban una co-dominancia entre *C. erecta* y *E. colona*. En el segundo año, cereal/soja presentó mayor frecuencia de *C. bonariensis*, y el resto de los tratamientos de *C. erecta*. Por último, en el tercer año, *E. colona* fue la especie de malezas dominante en la comunidad de los cultivos de maíz creciendo en todos los tratamientos (datos no presentados).

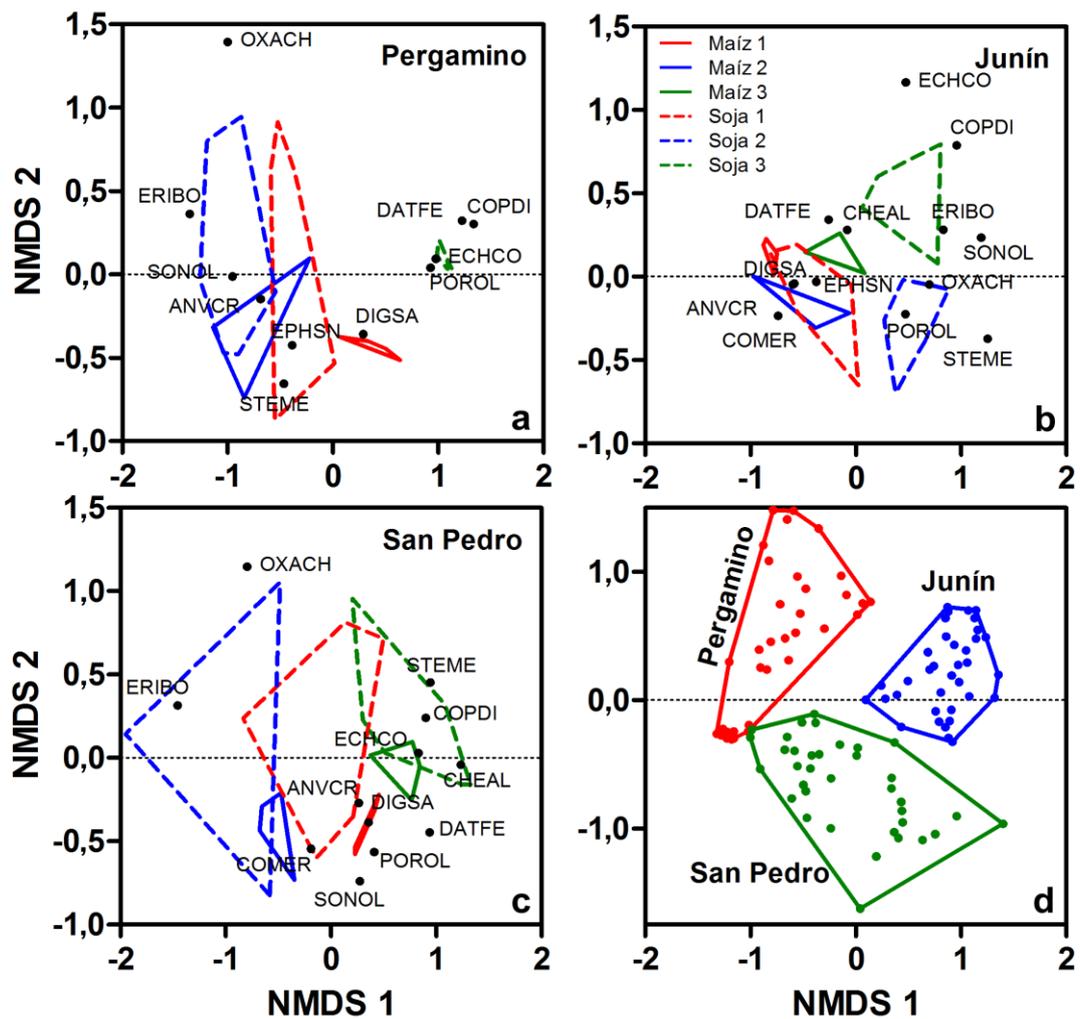


Figura 5.3. Análisis multivariado no paramétrico (NMDS; *non-metric multidimensional scaling*) basado en análisis de similitud de las comunidades de malezas entre sitios (d) y entre parcelas que iniciaron la secuencia con soja o maíz (a, b y c) dentro de cada sitio, sea como cultivos simples o de segunda. Los contornos rojos corresponden a los relevamientos del primer año (1), los azules a los del segundo (2) y los verdes a los del tercero (3). A su vez, los contornos continuos corresponden a las secuencias que presentaron maíz en el primer verano, mientras que las líneas discontinuas corresponden a aquellas en las que se cultivó soja en ese verano. La distribución de cada especie maleza se indica con su respectivo código Bayer.

5.3.2 Cambios en la frecuencia de especies

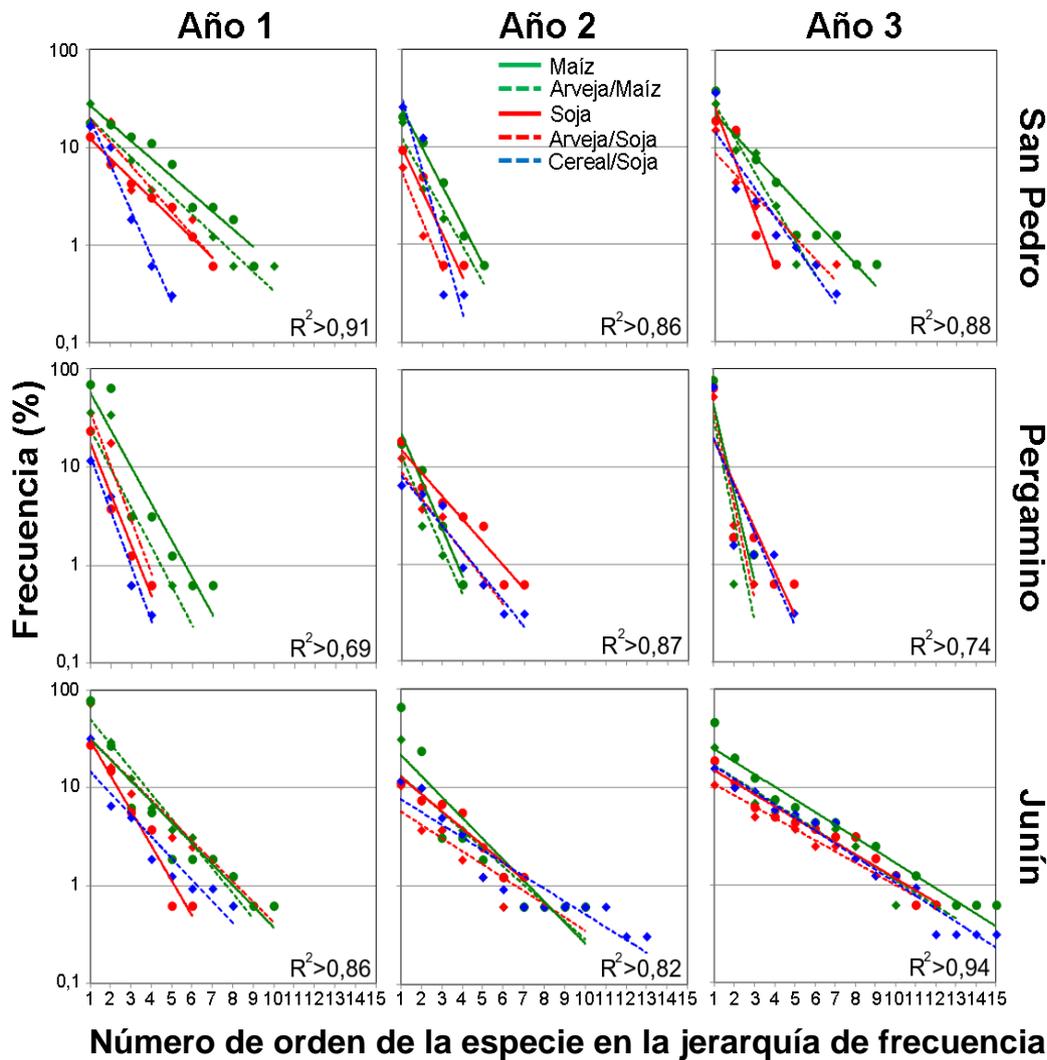


Figura 5.4. Frecuencia de las especies de maleza en función del orden de la especie en la jerarquía de frecuencia para cada tratamiento en los tres sitios y en cada uno de los años.

Las regresiones de la frecuencia en función del orden decreciente de las especies, según este atributo, permitieron ajustar funciones exponenciales negativas y determinar los parámetros de ordenada al origen y la pendiente (K) de las mismas para cada tratamiento en cada censo (Figura 5.4). De estos dos parámetros sólo hubo diferencias en las ordenadas al origen entre tratamientos y entre años ($p < 0,01$), sin que las interacciones entre ambos factores fueran significativas. Las secuencias que iniciaron con cultivos simples de maíz tendieron a presentar mayor ordenada al origen que el resto de los tratamientos ($p < 0,05$), es decir, una alta frecuencia de las especies de maleza dominantes. Por otro lado, aquellas parcelas en las que se inició la secuencia con

cereal/soja tendieron a presentar los menores valores de ordenada al origen, es decir, una baja frecuencia de las especies dominantes.

Los efectos sobre las especies de maleza dominantes también se observaron al cultivar cereal/soja en el segundo año, cuando la ordenada al origen disminuyó en todas las secuencias. Por el contrario, cuando se cultivó maíz en el tercer año, la frecuencia de las especies más frecuentes de las comunidades de malezas se incrementó en todas las secuencias (Figura 5.5).

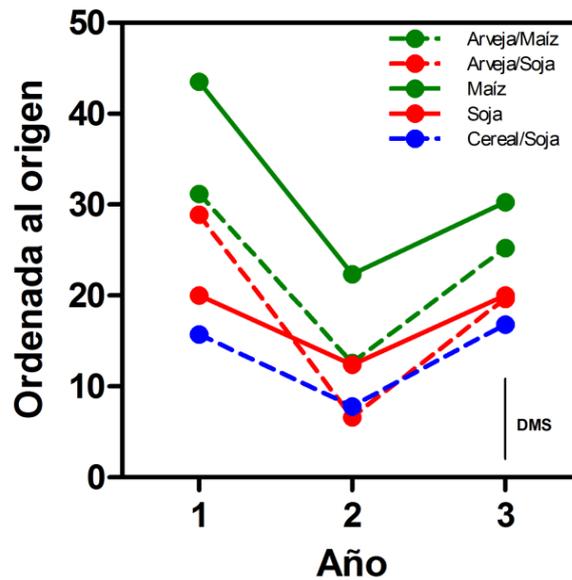


Figura 5.5. Ordenada al origen de las regresiones de la Figura 5.4 según tratamiento y año. Con una línea verde se grafican los cambios en los tratamientos que iniciaron la secuencia con maíz (continua) y arveja/maíz (discontinua), con líneas rojas se indican los que iniciaron con soja (continua) y arveja/soja (discontinua), mientras que la línea azul discontinua corresponde a la secuencia que inició con cereal/soja. DMS: diferencia mínima significativa. Cada punto corresponde al promedio de tres sitios (San Pedro, Pergamino y Junín) para cada tratamiento. De aquí en adelante se descartó el dato que corresponde a los cultivos simples de maíz en el primer año, que presentaron estrés hídrico en San Pedro. En el segundo año, se descartó el que corresponde al tratamiento que inició la secuencia con trigo/soja y al segundo año presentó un cultivo de trigo con estrés nutricional en San Pedro.

5.3.3 Efecto de la intensificación sobre las malezas

El análisis de la ordenada al origen de las funciones exponenciales ajustadas permitió identificar patrones consistentes en efectos sobre la estructura de la comunidad de malezas de los distintos sistemas de cultivo que iniciaron las secuencias. Para

estudiar el efecto de la inclusión de un mayor número de cultivos se compararon los tratamientos en los que el primer año se cultivó maíz con aquél que incluyó arveja/maíz, y el de soja con arveja/soja y cereal/soja. La frecuencia de las especies de malezas dominantes, medida a través de la ordenada al origen de las funciones de regresión (Figura 5.4), de las secuencias que iniciaron con maíz fue mayor que la de aquellas que comenzaron con arveja/maíz, mientras que la del cultivo simple de soja tendió a ser mayor que la de cereal/soja. Es especialmente destacable que esto se mantuvo en el segundo y tercer año, cuando todas las parcelas fueron ocupadas con los mismos cultivos y recibieron el mismo manejo (Figura 5.5).

5.3.4 Condiciones de crecimiento para las malezas

Los sistemas de cultivo seleccionados presentaron grandes diferencias en la interceptación de radiación en todos los sitios durante el primer año (Figura 3.4), y, en menor medida, en el segundo y tercer año (Cuadros 4.3, 4.5 y 4.6). Consecuentemente, la radiación no interceptada por los cultivos, y que por lo tanto incidió al nivel de las malezas, varió entre tratamientos tanto en términos cuantitativos como en los patrones temporales (Figura 5.6).

En el primer año, los cultivos simples de maíz y de soja no interceptaron radiación durante el período de barbecho otoño-invernal. La soja simple ocupó principalmente el verano, mientras que el maíz ocupó una mayor parte de la primavera. La inclusión de la arveja en cultivos dobles permitió interceptar radiación durante la primavera, mientras que desplazó la estación de crecimiento de los cultivos de verano de segunda parcialmente hacia el principio del otoño. De manera similar, la inclusión de cereales de invierno, como trigo y cebada, también aumentó la interceptación de radiación acumulada por los cultivos, incluso interceptando una alta proporción de la radiación incidente durante el invierno (Figura 5.6). En general, la mayor variabilidad entre tratamientos se observó en San Pedro como consecuencia del tipo de suelo arcilloso que anticipó los efectos de una sequía moderada al inicio del verano de la primera estación. En las campañas siguientes todas las parcelas fueron cultivadas con las mismas especies, reduciendo las diferencias en la captura de recursos entre tratamientos (Capítulo 4).

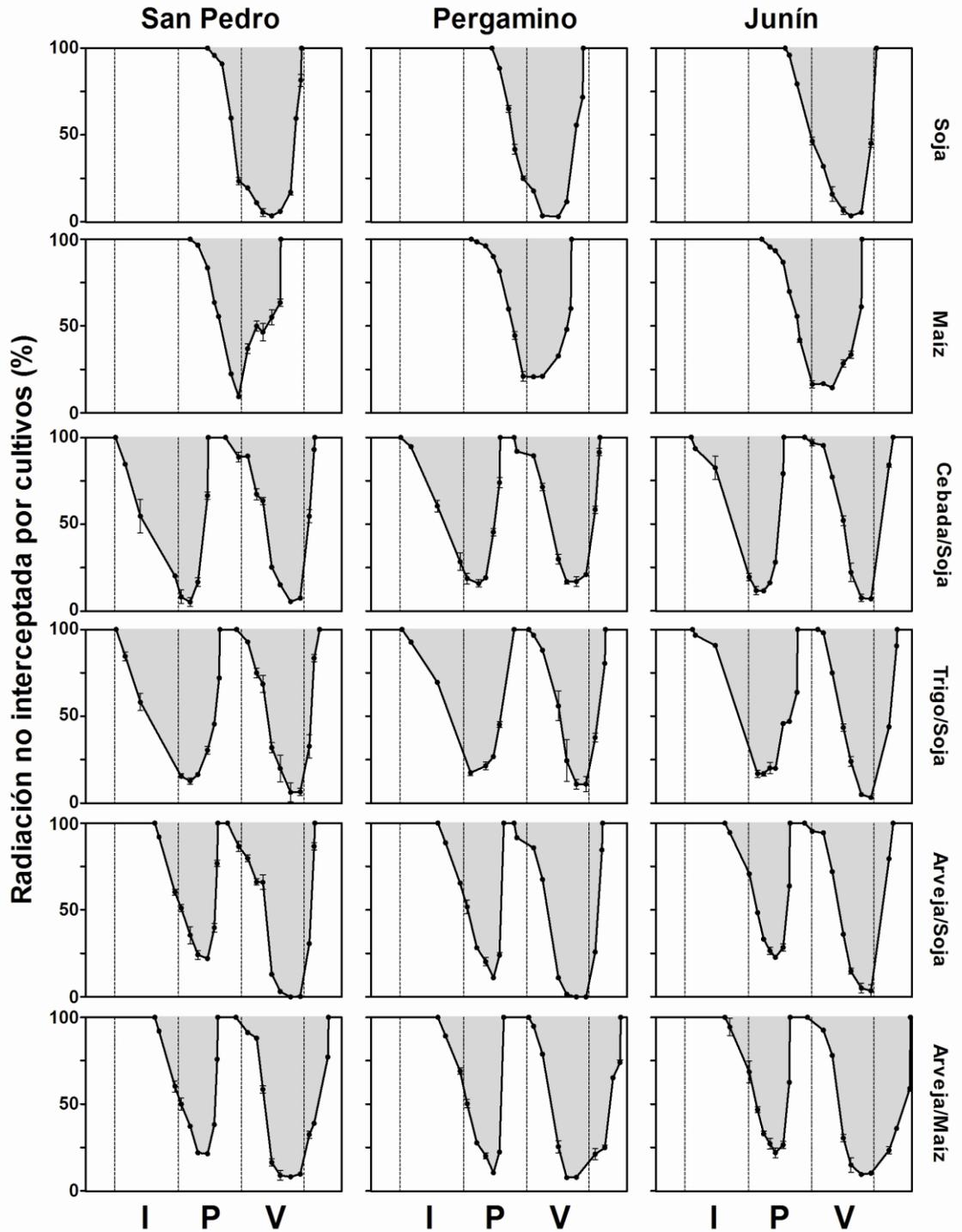


Figura 5.6. Radiación no interceptada por los cultivos durante el primer año (2010-2011; %) en los cinco tratamientos analizados. Los cultivos dobles de trigo/soja y cebada/soja se muestran por separado. I: invierno; P: primavera; V: verano. Las barras indican +/- el desvío estándar.

5.3.5 Asociaciones entre la estructura de la comunidad de malezas y el sistema de cultivos

Al final del primer año hubo una asociación negativa entre la ordenada al origen de las funciones de regresión ajustadas y los días con alta cobertura de cultivos durante el primero de los años experimentales ($p < 0,01$; Figura 5.7). Al segundo año, los días con alta cobertura de cultivos en la primera estación también se asociaron negativamente con la ordenada al origen de las funciones ajustadas ($p < 0,01$; Figura 5.7), es decir que se mantuvo cierto efecto residual en la comunidad de malezas durante el segundo año como consecuencia del sistema de cultivo elegido para el primer año. En cambio, en el tercer año no hubo ningún tipo de asociación entre estos dos factores ($p > 0,1$; Figura 5.7), perdiéndose la residualidad observada el año anterior.

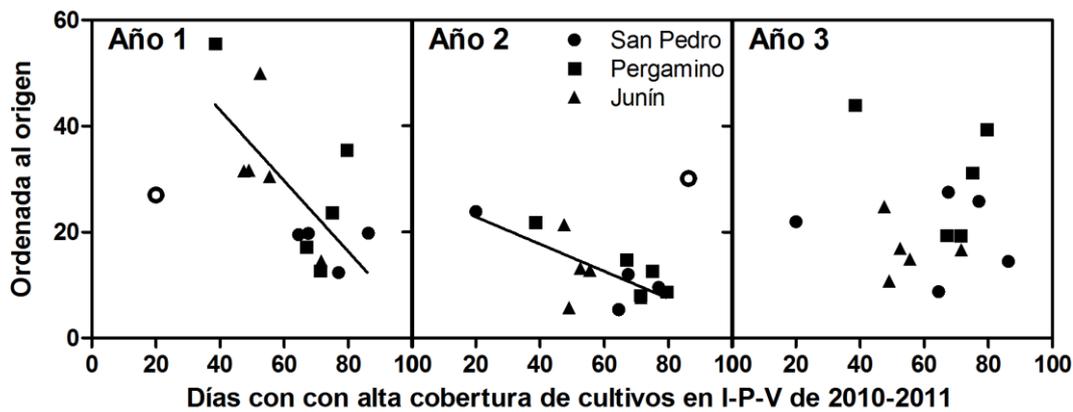


Figura 5.7. Ordenada al origen de las funciones de regresión ajustadas en la Figura 5.4 en función de los días con alta cobertura de cultivos durante el invierno (I), la primavera (P) y el verano (V) de 2010-2011. Se considera que los días con alta cobertura de cultivos son aquellos en los que la radiación no interceptada es menor al 25%. R^2 : Año 1=0,48; Año 2=0,52; Año 3=0,10. Cada punto corresponde al valor de cada tratamiento en cada sitio. Los círculos vacíos no fueron considerados para el análisis de regresión. El dato descartado en el primer año corresponde a los cultivos simples de maíz, que presentaron estrés hídrico en San Pedro. El dato descartado en el segundo año corresponde al tratamiento que inició la secuencia con trigo/soja y al segundo año presentó un cultivo de trigo con estrés nutricional en San Pedro.

5.4 Discusión

En este capítulo se evaluaron las comunidades de malezas que acompañaron a los sistemas de cultivos analizados en los capítulos anteriores. Si bien el cultivo doble es una práctica de manejo en la que ambos cultivos se cosechan en busca de un retorno económico, también se demostró que presentan un beneficio adicional debido a la supresión de malezas, particularmente reduciendo la frecuencia de las especies dominantes. Este efecto se encuentra ampliamente documentado en cultivos de cobertura (Liebman y Davis, 2000), pero no así en cultivos dobles.

Consistentemente con investigaciones previas (Anderson y Milberg, 1988; Smith y Gross, 2007; Meiss et al., 2010), las mayores diferencias se encontraron entre sitios y, en segundo lugar, se debieron a la especie cultivada al momento del muestreo, siendo más compleja la detección de efectos de la secuencia de cultivos. En este capítulo, además, no sólo se determinó que las comunidades de malezas divergen como resultado de la presencia de cultivos diferentes al inicio de las secuencias, si no también que, luego de homogeneizar la secuencia, la estructura y composición florística de las comunidades de malezas puede converger entre parcelas que tuvieron cultivos diferentes en estaciones de crecimiento previas.

El estudio presentado aquí tiene características que lo diferencian de las investigaciones previas sobre comunidades de malezas en sistemas de producción de granos, particularmente la dimensión de las parcelas (4400 m²) y su relevamiento durante un periodo de tres años. La metodología aplicada, experimental y analítica permite inequívocamente identificar las diferencias en las trayectorias de las comunidades de malezas. Mientras que la mayor parte de los trabajos refieren a inventarios en la comunidad de malezas, en este trabajo, se exploró cómo los componentes de la secuencia de cultivos generan trayectorias diferenciales en la organización de las comunidades (Figura 5.3). Es importante destacar que la mayoría de los estudios sobre los efectos del manejo de los cultivos sobre la estructura de las comunidades de malezas se basaron en aproximaciones observacionales o experimentales contrastantes aplicadas en distintas escalas espaciales. Por un lado, en los relevamientos de malezas de lotes comerciales se correlacionaron los cambios en las comunidades con variables agronómicas, como el tipo de cultivo, su manejo y rendimiento y la historia de uso agrícola (de la Fuente et al., 1999; 2006; Hallgren et al., 1999; Suárez et al., 2001; Lososová et al., 2004; Poggio et al., 2004; Meiss et al., 2010). Por el otro lado, las aproximaciones experimentales, realizadas en parcelas relativamente más pequeñas que un lote agrícola, estudiaron los cambios en las comunidades de malezas como resultado de la manipulación de prácticas agrícolas específicas, como la fertilización, el tipo de labranza o la aplicación de herbicidas (Pyšek y Lepš, 1991; Bàrberi et al., 1998; Doucet et al., 1999). Así, este estudio cubre un espacio vacante entre los estudios observacionales y experimentales en comunidades de malezas y, al mismo tiempo, contribuye a vincular ambas aproximaciones.

5.4.1 *La identidad de los cultivos determina la composición de especies de la comunidad de malezas*

Los resultados presentados aquí confirman que la identidad de la especie cultivada determina la estructura de las comunidades de malezas asociadas (Anderson y Milberg, 1988; Smith y Gross, 2007; Meiss et al., 2010). Dentro de cada sitio, la principal fuente de variación fue el año (Figura 5.3). Así, los contornos de los grupos de tratamientos correspondientes al mismo año cambian de posición en conjunto, indicando que la elección del cultivo modifica cada año la composición de especies de la comunidad de malezas. En estos experimentos a campo, la modificación de la secuencia de cultivos en un solo año generó divergencias en las comunidades de malezas de los cultivos en pie (soja o maíz) al momento del censo, las que luego se atenuaron cuando se unificó la secuencia de cultivos.

En general, se presta atención a la magnitud de los efectos de los disturbios ejercidos sobre el sistema, pero esta respuesta depende en gran medida de la condición inicial. El proceso detallado en el párrafo anterior ocurrió en dos de los tres sitios. En Junín no se observó que la estructura de la comunidad convergiera al unificar la secuencia, lo que se habría debido a la alta frecuencia de *D. sanguinalis* en toda el área experimental. Esto generó una distribución de los contornos alrededor de esta especie en el análisis multivariado (Figura 5.3b), permaneciendo más próximas a la misma las parcelas que iniciaron la secuencia con maíz, sea este un cultivo simple o de segunda.

Según la información brindada en los resultados, en los tres experimentos se encontró un claro dominio de malezas de gramínea estivales, ya sea *D. sanguinalis* o *E. colona*, cuando la especie cultivada, o bien el antecesor, fue maíz. Esto puede observarse también en el análisis multivariado (Figura 5.3). Cada año, los contornos que representan la comunidad de malezas del grupo de tratamientos en los que se inició la secuencia con maíz o arveja/maíz, o bien los grupos de tratamientos que presentaban maíz al momento del censo (Maíz 1; Maíz 2; Maíz 3; Soja 3) se encuentran cercanos a la ubicación de una de estas dos gramíneas.

5.4.2 *Intensificar el uso de la radiación incidente reduce la frecuencia de malezas*

La frecuencia de las malezas más frecuentes en cada uno de los tratamientos se redujo en los tratamientos que combinaron alta ocupación temporal de la tierra con una alta cobertura de los espacios aéreos. La supresión por la reducción de los tiempos de barbecho (Baeumer y De Wit, 1968) y por alta cobertura de cultivos (Satorre y Ghera, 1987; Hald, 1999; Liebman y Davis, 2000; Poggio, 2005; Poggio y Ghera, 2011) sobre las malezas ya ha sido descripta en trabajos previos. En este trabajo, para conjugar ambos procesos, se calculó el número de días en los que los cultivos interceptaron una alta proporción de la radiación incidente (>75%). Este indicador de la ocupación de espacios y de los patrones de variación temporal fue determinante de la reducción de la

frecuencia de las especies de malezas más frecuentes de la primera estación de crecimiento. Además, fue determinante de la frecuencia de las especies más frecuentes al año siguiente, demostrando que este parámetro posee cierta persistencia sobre la comunidad de malezas.

La importancia de la ocupación de los espacios por los cultivos no sólo se observó al comparar las comunidades de malezas acompañantes luego de cada uno de los sistemas cultivados durante el primer año. También se observó una reducción importante de la frecuencia de las especies más frecuentes al final de la segunda estación de crecimiento en todos los tratamientos, al realizar un cultivo doble con alta cobertura, como trigo/soja. Luego, se determinó un incremento en esta variable cuando se cultivó un sistema con baja cobertura como el maíz en la tercera estación de crecimiento (Figura 5.5).

5.5 Conclusiones

Los cambios en la composición de especies de la comunidad de malezas se asociaron principalmente con la identidad de los cultivos. Por otro lado, los cambios estructurales, referidos a la frecuencia de las especies en las comunidades de malezas, estuvieron influenciados por la intercepción de la radiación solar de los cultivos. Se encontró que los sistemas de cultivo que interceptaron más radiación redujeron la frecuencia de las especies más frecuentes de la comunidad de malezas. Por estas razones, implementar secuencias de cultivos intensificadas y diversas podría ser una vía para reducir la frecuencia de especies de malezas problemáticas.

-CAPÍTULO 6-

6 DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES FINALES

6.1 Introducción

Existe consenso en que los incrementos necesarios en la producción global de alimentos deben lograrse principalmente en las tierras cultivadas actualmente. Esto se debe a que es ampliamente reconocido que la disponibilidad de tierras cultivables que no están en producción es muy limitada (Bruinsma, 2009). 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, mediante el aumento de la eficiencia en el uso de los recursos (Andrade, 2011; Fischer et al., 2014). Sin embargo, el progreso genético actual en los principales cultivos a nivel mundial sería insuficiente para satisfacer la demanda global de alimentos hacia el año 2050. Limitaciones adicionales pueden mencionarse, tales como el tiempo transcurrido hasta la liberación de cultivares mejorados genéticamente y la demora en la adopción a nivel productivo (Hall y Richards, 2013). Por esta razón, resulta necesario complementar los aumentos en la producción mediante otras vías, tales como las prácticas de manejo agronómico de los sistemas de producción de granos.

Esta tesis se enfocó en analizar algunas prácticas de manejo que, tal como las mejoras genéticas, apuntan a lograr aumentos en la productividad de la tierra a través de un uso más eficiente de los recursos disponibles. Mientras que las mejoras genéticas de las especies cultivadas están orientadas a obtener genotipos que sean más productivos en determinados ambientes agrícolas, esta tesis propone que los cambios consistan en seleccionar las especies incluidas en la secuencia de cultivos, para así lograr que el sistema sea más productivo. De esta manera, se determinaron los beneficios de “empaquetar” cultivos diseñando secuencias más diversas e intensificadas. Una gran ventaja de esta propuesta es que puede implementarse con las tecnologías disponibles actualmente y, por lo tanto, permite que los productores la adopten de forma inmediata.

Los sistemas de producción de granos son dinámicos, es decir que cambian rápidamente en respuesta a múltiples factores; por ejemplo, los precios y las preferencias de los mercados internacionales, las políticas internas y la variabilidad climática. En la introducción general de esta tesis se presentaron algunos de los hitos históricos importantes que definieron la orientación productiva de las Pampas, tanto en el pasado como en el presente. Actualmente, los sistemas de producción pampeanos se encuentran fuertemente dominados por cultivos de grano estivales, especialmente por la soja (Caviglia y Andrade, 2010). Un proceso de creciente demanda internacional de granos, como el que se está desarrollando (Andrade, 2011; Hall y Richards, 2013), está forzando a los sistemas de producción predominantes a que sean cada vez más eficientes y productivos. Esta tesis intentó presentar vías alternativas para orientar este proceso. La información presentada aquí podría repercutir rápidamente en la producción total de la Región Pampeana, la que se encuentra entre las regiones proveedoras de alimentos más importantes del mundo. A su vez, la aproximación analítica empleada también podría orientar el desarrollo de nuevos procesos de intensificación, tanto en las Pampas como en otras regiones productoras de granos en el mundo.

El objetivo general de esta tesis se centró en evaluar alternativas de sistemas de cultivos más intensificados y diversos que los implementados actualmente en la Región Pampeana. La intensificación, en este caso, se refiere a la inclusión de cultivos dobles que incluyen una especie invernal seguida de otra estival, como una vía para aumentar la productividad anual del sistema productivo. Así, el propósito de la tesis fue i) determinar las posibilidades de continuar incrementando la producción de granos en la Región Pampeana mediante la intensificación en el uso de la tierra, y ii) esclarecer los factores que determinan la productividad de los sistemas de cultivo mediante diferentes aproximaciones analíticas basadas en la agronomía y la ecofisiología de cultivos de grano.

Los objetivos específicos de la tesis se orientaron a ampliar y profundizar los conocimientos existentes sobre los cultivos dobles y su inserción en los sistemas productivos. En esta tesis, en primer lugar, se propuso evaluar y comparar las variaciones en los rendimientos del cultivo doble trigo/soja con los de los cultivos simples de soja y de maíz. La información utilizada provino de lotes comerciales de toda la Región Pampeana, analizándose las asociaciones entre los rendimientos y las variables climáticas, para así determinar hasta qué punto la productividad anual de los cultivos dobles puede superar a la de los cultivos simples de ciclo estival (Objetivo 1; Capítulo 2).

Luego, se exploraron cultivos dobles alternativos al de trigo/soja, modificando las especies que lo componen, para valorar las posibilidades de aumentar la productividad anual como resultado de mayores capturas y/o eficiencias en el uso de los recursos (Objetivo 2; Capítulo 3). Dado que los cultivos dobles incrementan la productividad anual de los sistemas agrícolas, resultó de gran interés determinar las posibilidades de intensificar aún más las rotaciones de cultivos en la Región Pampeana, sosteniendo los rendimientos de los cultivos que las componen en el tiempo. Para ello, se analizó la productividad y la utilización de recursos por los cultivos que componen la secuencia trigo/soja-maíz sembrada a continuación de los cultivos simples de maíz y de soja y de las distintas alternativas de cultivos dobles evaluadas en el primer año de los experimentos (Objetivo 3; Capítulo 4).

Finalmente, para complementar los objetivos de los Capítulos 3 y 4, se estudiaron los cambios en las comunidades de malezas como una medida de la cantidad de recursos disponibles que no fueron utilizados por los cultivos. Por esta razón, se estudió la respuesta de las comunidades de malezas ante los cambios ambientales generados por la variación en la intensificación y en las especies que componen las secuencias (Objetivo 4; Capítulo 5).

Sobre la base de estos objetivos específicos, se evaluaron las siguientes hipótesis:

- Dado que los cultivos dobles usan más recursos que los cultivos simples estivales, los patrones geográficos de los rendimientos de trigo/soja son similares a los de maíz y de soja (i.e. siendo mayores los rendimientos donde haya más recursos disponibles y menos factores limitantes). Sin embargo, los cultivos dobles ocupan una mayor proporción de la estación de crecimiento y escapan a posibles períodos desfavorables. Por lo tanto, las mayores ventajas de los cultivos dobles se manifestarán donde las condiciones ambientales sean desfavorables para la obtención de altos rendimientos con cultivos simples de verano (*Hipótesis 1*).

- La siembra de un cultivo estival a continuación de la cosecha de otro invernal, conformando así un cultivo doble, contribuye a ocupar una mayor fracción de la estación de crecimiento, lo que, consecuentemente, incrementa el uso de los recursos disponibles. Sin embargo, reemplazar al trigo/soja por otros cultivos dobles alternativos, que incluyan cultivos invernales con menor explotación de recursos y/o de cosecha anticipada, incrementará los rendimientos de los cultivos de segunda y, en consecuencia, el rendimiento global del cultivo doble (*Hipótesis 2*).

- La diversificación de los cultivos dobles permite aumentar la frecuencia de estos sistemas de cultivo en la rotación, evitando la disminución de los rendimientos en años sucesivos. La estabilidad en los rendimientos se deberá al mantenimiento de las eficiencias de captura y de uso de los recursos a lo largo de la secuencia (*Hipótesis 3*).

- Los sistemas de producción que incrementan la diversidad de cultivos, la captura total de recursos y la ocupación de espacios, tal como los que incluyen cultivos dobles, cambian la composición de las comunidades de malezas, reduciendo la frecuencia de ciertas especies. A su vez, las comunidades de malezas divergen al cultivar sistemas diferentes, mientras que tienden a converger al implementar la misma secuencia en los años sucesivos (*Hipótesis 4*).

6.2 Avances logrados

En la sucesión de capítulos que componen esta tesis se estudiaron diferentes aspectos asociados a la intensificación de las secuencias de cultivos. Los resultados obtenidos constituyen avances importantes en la comprensión del funcionamiento de los cultivos dobles y de su inserción en los sistemas productivos. Esto se logró combinando escalas de análisis con diferente alcance geográfico. Primero se hizo una evaluación de los determinantes de la productividad, abarcando toda la Región Pampeana. Luego, se realizó un enfoque sobre la Pampa Ondulada, donde se llevaron a cabo experimentos en localidades con características contrastantes, en los que se evaluaron diferentes secuencias de cultivos durante tres años. Por lo tanto, se exploraron tres niveles: región, localidad y lote agrícola. Finalmente, se incorporó un análisis de las interacciones complejas para explicar desde otra perspectiva los resultados obtenidos.

De esta manera, se determinó qué factores ambientales optimizan los rendimientos de los cultivos dobles (Capítulo 2). Específicamente, se detalló por qué estos sistemas son más productivos que los cultivos simples (Capítulo 3). Luego se dilucidó como deberían “empaquetarse” los cultivos dobles en secuencias para conformar rotaciones más intensificadas y productivas (Capítulo 4). Finalmente, se caracterizaron los efectos que provocan en otros componentes del sistema como las malezas (Capítulo 5). Los resultados obtenidos no sólo satisfacen la curiosidad académica, sino que la implementación de estos avances resultará de gran utilidad al momento de diseñar rotaciones de cultivo más intensificadas, productivas y sustentables.

Estudios previos han descripto las ventajas productivas de los cultivos dobles, debidas a una mayor captura de recursos, en comparación con el cultivo simple de alguna de las especies que los componen (Sun et al., 2011; Graß et al., 2013). En la Región Pampeana se ha contrastado principalmente el cultivo simple de soja con los cultivos dobles que incluyen soja como cultivo de segunda (Caviglia et al., 2004; Van Opstal et al., 2011). Sin embargo, los trabajos mencionados analizan los cultivos dobles en una única estación de crecimiento. En esta tesis, no sólo se estudió el uso de recursos y la productividad de los cultivos dobles en una estación de crecimiento, sino que también fueron considerados como un componente más en secuencias de cultivos de tres años (Capítulos 3 y 4). Además, se evaluó el sistema productivo en su conjunto, dado que también se analizaron efectos sobre las comunidades de malezas acompañantes (Capítulo 5). De esta manera, no sólo se abordó el impacto de los cultivos dobles sobre los rendimientos y la productividad anual, sino que también se estudiaron los posibles efectos sobre otras propiedades de los sistemas de productivos. Esta aproximación puso en evidencia propiedades emergentes y sus mecanismos.

6.2.1 Variaciones regionales de los rendimientos

En el Capítulo 2 se evaluaron y compararon las variaciones en los rendimientos del cultivo doble trigo/soja con los obtenidos en cultivos simples de soja y de maíz. Específicamente, en ese capítulo se analizan las interacciones climáticas a escala regional, y sus efectos sobre los tres sistemas de producción mencionados. Las investigaciones previas utilizaron modelos de simulación para estudiar las asociaciones entre los rendimientos y el clima (Asseng et al., 2011; Lobell et al., 2005; Magrin et al., 1997). A diferencia de estos estudios, en esta tesis dicha relación se estudió utilizando datos de producción reales analizados con aproximaciones originales. Así, los análisis incluyeron primero una regresión de frontera para identificar los máximos rendimientos alcanzables a diferentes temperaturas (Figura 2.3) y, luego, una correlación entre la distancia entre cada observación y la frontera ajustada y las precipitaciones durante la estación de crecimiento de cada cultivo (Figura 2.4). Son pocos los trabajos publicados que tengan la extensión geográfica propuesta y la densidad de datos reales implicados

en los resultados presentados en el Capítulo 2 (Lobell y Asner, 2003; Lobell et al., 2011; Wang et al., 2014). Tampoco son numerosos los trabajos que estudien los efectos ambientales sobre los cultivos dobles (Monzon et al., 2014). Esta información permitiría identificar nuevas regiones en el mundo donde es factible incrementar la productividad de la tierra incluyendo cultivos dobles en las secuencias de cultivos.

Se identificaron respuestas diferenciales de maíz, soja y trigo/soja ante las variaciones del ambiente, aun cuando los patrones regionales de rendimiento fueron similares (Figura 2.8). Sin embargo, los rendimientos de maíz siempre fueron los mayores, mientras que los de soja fueron los menores. Dado que actualmente casi el 60% de área cultivada en Argentina es sembrada con soja de primera, los resultados indican que es posible incrementar los niveles de producción, incluso cultivando soja, simplemente mediante la expansión del área con cultivos dobles.

Si bien los mayores rendimientos de los tres sistemas de cultivo se lograron en la zona núcleo pampeana, los rendimientos relativos del cultivo doble aumentaron hacia algunas áreas de menor productividad, como la provincia de Entre Ríos y el sur de la provincia de Buenos Aires (Figura 2.9). Hacia el noreste de la Región Pampeana, la soja de segunda presentó rendimientos similares a los de la soja de primera, mientras que, hacia el sur, los rendimientos de los cultivos de primera fueron bajos y los de los trigos se incrementaron. En cualquiera de los dos casos, las precipitaciones estivales tuvieron que ser abundantes para mantener rendimientos altos con cultivos de soja de segunda (Figura 2.4). En Entre Ríos y el sur bonaerense, los cultivos dobles alcanzaron, en promedio, niveles de producción semejantes, o incluso superiores, a los de maíz, el cultivo simple más productivo de la región y, además, presentaron las mayores diferencias con respecto a la soja de primera, el cultivo más difundido (Cuadro 2.1). En consecuencia, los resultados obtenidos permitieron aceptar la hipótesis 1.

Los mayores rendimientos relativos con trigo/soja se alcanzaron en Entre Ríos (LIS; Figura 2.1), donde sólo el 15% de la superficie analizada fue dedicada, en el período considerado, a este cultivo doble. Esto indica que, si ocurriera una nueva expansión de esta práctica en dicha zona, tendría un gran impacto en los niveles de producción regional. Sin embargo, dado que los rendimientos de trigo son bajos en esa zona, sería necesario un estímulo a la producción de trigo.

El cultivo doble trigo/soja, a pesar de que incrementa el uso de recursos en comparación con los cultivos simples de verano, libera una fracción importante de la radiación incidente cuando la oferta es máxima (diciembre-enero; Caviglia et al., 2004). Este periodo se extiende entre la senescencia del cultivo invernal y las etapas vegetativas iniciales de los cultivos de segunda. Por esta razón, aquí se investigaron prácticas de manejo orientadas a incrementar tanto la interceptación de la radiación incidente en los meses de diciembre y enero, como la disponibilidad de agua a la siembra de los cultivos de segunda. Esto se realizó mediante una aproximación

experimental en la que se evaluaron sistemas de cultivos dobles alternativos al de trigo/soja (Capítulo 3).

6.2.2 *Análisis comparado de cultivos dobles alternativos a trigo/soja*

La productividad de los cultivos se analizó según los componentes ecofisiológicos involucrados en la determinación de la productividad y el rendimiento de los cultivos anuales en función de la economía del carbono (Ecuación 3.1). Así, el rendimiento en grano (Rto) depende de la cantidad de radiación fotosintéticamente activa incidente (RFA_i) durante el ciclo del cultivo, las eficiencias de interceptación (e_i) y de conversión de la RFA interceptada en biomasa ($EURb$) y del índice de cosecha (IC). En la medida que se logren incrementos en una variable, deben también evitarse reducciones en los demás factores, para que el resultado se traduzca en mayores rendimientos.

$$Rto = RFA_i * e_i * EURb * IC \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

Los cultivos dobles estudiados en esta tesis incrementaron los rendimientos anuales como resultado de una mayor captura de recursos que en el cultivo simple de su especie estival (Cuadro 3.6). Estos resultados coinciden con investigaciones previas en la Región Pampeana (Caviglia et al., 2004; Van Opstal et al., 2011). En estos sistemas de cultivo doble, las principales limitantes de la producción en los cultivos de segunda son la liberación tardía del lote y la baja disponibilidad de agua luego del cultivo de trigo (Hamblin y Tennant, 1987; Daniels y Scott, 1991; Calviño et al., 2003; Monzon et al., 2007). Los cultivos invernales alternativos evaluados en el Capítulo 3, con cosecha anticipada y menor uso de recursos que el trigo (Cuadro 3.2), modificaron el balance de utilización de recursos entre los componentes del cultivo doble y aumentaron la productividad de la soja de segunda (Cuadro 3.3). Sin embargo, esto no se reflejó en una mayor productividad anual dado que los cultivos invernales alternativos fueron sensiblemente menos productivos que el trigo (Cuadro 3.6). Por esta razón se rechaza la hipótesis 2.

No obstante, la inclusión de arveja permite la siembra de maíz como cultivo de segunda, dado que deja disponible mayor cantidad de agua útil en el suelo que al momento de cosechar el cultivo trigo (Cuadro 3.2). La baja disponibilidad de agua luego de cultivar trigo es considerada una de las principales limitantes para sembrar maíces de segunda en la Región Pampeana (Mercau y Otegui, 2014). Es de destacar que el cultivo doble de arveja y maíz alcanzó los mayores rendimientos entre los siete sistemas evaluados en esta tesis (Cuadro 3.6). Esto se debió a la elevada captura de recursos, típica de los cultivos dobles (Caviglia et al., 2004), combinado con una alta eficiencia en el uso de la radiación (Figura 3.7), propia del cultivo de maíz (Andrade y Sadras, 2000).

Por otro lado, la hipótesis 2 no sería rechazada completamente, en la medida que se incrementen los rendimientos de los cultivares de las especies invernales alternativas al trigo. De hecho, en los últimos años se han liberado cultivares de cebada que alcanzan rendimientos sensiblemente superiores a los de la variedad Scarlett, que ha sido en los últimos 15 años la variedad más sembrada en Argentina y la utilizada en los experimentos de esta tesis (INTA, 2014). El cultivar Scarlett predominó en Argentina durante la última década debido al retraso, relativo al trigo, en la mejora genética del cultivo de cebada (Abeledo y Miralles, 2012).

De los resultados del Capítulo 3 se desprende que los cultivos invernales alternativos al trigo, como cebada, colza, o algunas legumbres invernales como arveja, son opciones que permiten aumentar la productividad y estabilidad de los cultivos de segunda. Esto sería resultado de que los cultivos de segunda accederían a niveles mayores de disponibilidad de recursos como el agua (Figura 3.3) y se reducirían los riesgos de experimentar estreses abióticos durante el período crítico de generación del rendimiento. De cualquier manera, aquí se demostró que el diseño de nuevas secuencias de cultivos dobles es un modo viable para mejorar la productividad anual o, al menos, incrementar el rendimiento del componente más rentable (Cuadro 3.3) al cambiar la dinámica de uso de los recursos disponibles durante la estación de crecimiento.

La Figura 6.1 es un esquema de los cambios que se produjeron en la dinámica de intercepción de radiación al realizar diferentes sistemas de cultivo durante el primer año. En ese año, se interceptaron altas cantidades de RFA con cultivos dobles (en rojo y azul) durante la primavera y verano, excepto durante la senescencia del cultivo invernal y las etapas vegetativas iniciales del cultivo estival de segunda (Figura 3.4). Los cultivos simples estivales (verde) interceptaron mayores cantidades de RFA al inicio del verano, pero la cantidad de RFA interceptada acumulada fue menor que en los cultivos dobles. A su vez, se indican los cambios observados en la dinámica de intercepción de RFA por cultivos dobles cuando se reemplazó al trigo (azul) por un cultivo invernal alternativo de cosecha anticipada (rojo).

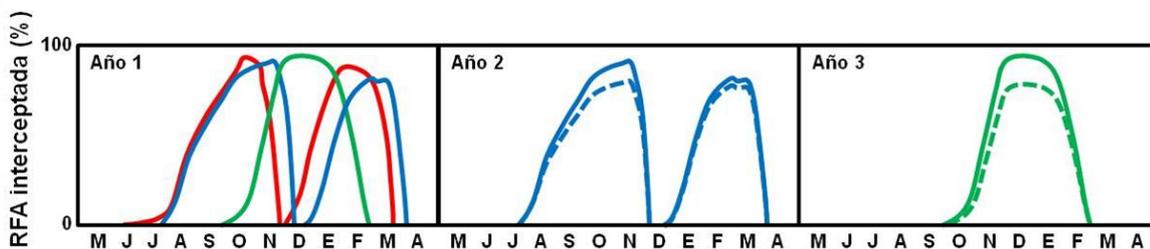


Figura 6.1. Esquema de los cambios observados en la dinámica de intercepción de radiación fotosintéticamente activa (RFA) durante los 3 años de duración de los experimentos. En rojo y azul se indica la intercepción de RFA de dos cultivos dobles que secuencian una especie invernal y una estival. En verde se indica la intercepción de RFA por cultivos simples estivales. Con líneas discontinuas se ejemplifica la caída en la intercepción de RFA observada en trigo/soja (año 2) y maíz (año 3) en tratamientos con recurrencia de cereales.

6.2.3 *Los cultivos dobles como componentes de las rotaciones*

La introducción de cultivos dobles alternativos al de trigo/soja resultó imprescindible para incrementar la frecuencia de este patrón de siembra en las secuencias, sin que esto vaya en detrimento del rendimiento de los cultivos que las componen (Capítulo 4). Así, se determinó que la nutrición de los cereales incluidos en las secuencias fue afectada por los cultivos antecesores, independientemente de que la disponibilidad de nutrientes en el suelo haya sido homogeneizada con el uso de fertilizantes a la siembra de cada cultivo. Esto se debió, posiblemente, a que la disponibilidad de nitrógeno inorgánico para los cultivos en crecimiento fue disminuida por la inmovilización microbiana durante la degradación de residuos con alta relación carbono/nitrógeno (Kumar y Goh, 2002; Domínguez et al., 2005; Danga et al., 2009; Seymour et al., 2012).

Las variaciones nutricionales repercutieron en los rendimientos, generando diferencias, principalmente, en la intercepción de RFA acumulada durante el ciclo de los cereales que siguieron en la secuencia (Figura 4.2 y 4.3). En estos cultivos, la EURb también se afectó en menor medida. Este efecto sobre la eficiencia de intercepción de la RFA se indica con líneas discontinuas en la Figura 6.1 durante el segundo y tercer año. En el segundo año, la e_i y EURb fueron menores en los cultivos de trigo sembrados luego de trigo/soja o cebada/soja que en los demás tratamientos (Cuadro 4.3). Luego, en el tercer año se observaron patrones similares en cultivos de maíz cultivados en parcelas previamente sembradas con maíz o arveja/maíz en el primer año de los experimentos. Esta disminución en los rendimientos de los cereales no se debió a que el antecesor haya sido un cultivo doble, sino a la repetición de estos cereales en la secuencia. Este efecto ha sido ampliamente comunicado para monoculturas en secuencias no intensificadas (Karlen et al., 1994; Berzenyi et al., 2000; Fischer et al., 2002; Grant et al., 2002; Seymour et al., 2012).

A partir de los resultados obtenidos en esta tesis, puede afirmarse que la diversificación de los cultivos empleados permitirá incrementar los índices de intensificación y la productividad anual de la tierra. Por esta razón, la diversificación de sistemas intensificados debería evaluarse en otras regiones que ya implementan cultivos dobles a gran escala, como el sudeste de Estados Unidos, el norte de China, Asia meridional y el sur de Brasil (Fischer et al., 2014). En China e India los cultivos dobles (trigo/maíz y trigo/arroz, respectivamente) son los sistemas de cultivo principales, por lo que no se estudian como una novedad frente a otros sistemas tradicionales como ocurre en Argentina o Estados Unidos. Los estudios sobre cultivos dobles en China (Wang et al., 2009; Fang et al., 2010; Chen et al., 2010; Fan et al., 2012) e India (Ladha et al., 2003; Gupta y Seth, 2007; Chauhan et al., 2012) se encuentran fuertemente orientados hacia la sustentabilidad, en busca de incrementar la eficiencia en el uso de recursos/insumos utilizados, dado que son sistemas extremadamente dependientes de insumos externos como la fertilización y el riego. En esta tesis se determinó que la diversificación de cultivos es de gran utilidad para diseñar secuencias intensificadas que

sean eficientes en el uso de los recursos, e incluso para disminuir la dependencia de fertilizantes. Varios de los trabajos mencionados (Ladha et al., 2003; Gupta et al., 2007) reconocen que la diversificación podría ser de gran utilidad en esas regiones, pero dada la baja rentabilidad de los cultivos alternativos y la falta de políticas de estado, no se ha investigado esta posibilidad ni se ha generado suficiente interés en los productores (Chauhan et al., 2012). Los resultados de esta tesis podrían alentar el estudio de la diversificación de sus sistemas productivos.

Las innovaciones tecnológicas aquí propuestas apuntan a combinar un número mayor de especies en las secuencias de cultivos. A su vez, también destacan la necesidad de mantener niveles razonables de producción de los cultivos componentes y, simultáneamente, obtener mayor rentabilidad y reducir los riesgos. Las evidencias mostradas aquí indican que la diversificación de las secuencias de cultivos es crucial para realizar cultivos dobles en años sucesivos. Esto requiere que se reduzca la repetición de las especies cultivadas, logrando un buen balance entre gramíneas y leguminosas para evitar mermas en los rendimientos en años sucesivos. Por estas razones se acepta la hipótesis 3.

6.2.4 Efectos de la intensificación y diversificación sobre las comunidades de malezas

En el Capítulo 5, se corroboró que los cambios en la composición de especies espontáneas se asociaron principalmente con la identidad de las especies cultivadas (Figura 5.3; Meiss et al., 2010), mientras que los cambios estructurales, referidos a la frecuencia de las especies dominantes en las comunidades de malezas, estuvieron influenciados por los patrones temporales de uso de los recursos. Las malezas que coexisten con los cultivos se ubican en tiempo y espacio donde disponen de recursos que no son utilizados por los mismos. Por esta razón, los cambios florísticos en las comunidades de malezas explican, desde otra perspectiva, el uso de los recursos disponibles no aprovechados por los cultivos (Swanton et al., 1993).

La supresión del crecimiento de las malezas por la reducción de los tiempos de barbecho (Baeumer y De Wit, 1968) y por la mayor cobertura de los cultivos ya ha sido estudiada previamente (Satorre y Ghera, 1987; Hald, 1999; Liebman y Davis, 2000; Poggio, 2005; Poggio y Ghera, 2011). En el Capítulo 5, se realizó una serie de análisis que permitieron el abordaje conjunto de ambos efectos de manera original. Para tal fin, se calculó el número de días del año que los cultivos interceptaron, al menos, el 75% de la radiación incidente. El valor obtenido se tomó como una medida del periodo en que las malezas exploran ambientes lumínicos restrictivos por la presencia de cultivos. Se determinó que los sistemas de cultivo que interceptaron altas proporciones de la RFA incidente durante períodos más prolongados, redujeron la frecuencia de las especies más comunes en las comunidades de malezas (Figura 5.7).

Esto sugiere que las malezas dominantes en una comunidad pueden ser parcialmente suprimidas mediante la implementación de secuencias de cultivos más intensificadas y diversas, lo que constituye una herramienta más para reducir el enmalezamiento en años sucesivos. De esta manera, estos resultados aportan información que impide el rechazo de la hipótesis 4.

6.2.5 Comentarios finales

Los cuatro capítulos de resultados de esta tesis estuvieron orientados a profundizar los conocimientos existentes en una práctica de cultivo, como el cultivo doble, difundida a nivel global. En el capítulo 2 se describieron los factores del ambiente que determinan las posibilidades de implementar el cultivo doble trigo/soja de segunda, y su productividad. En el capítulo 3, se investigó la posibilidad de administrar los recursos del ambiente de una manera diferente, modificando las especies cultivadas, para lograr cultivos dobles más productivos que el trigo/soja de segunda. En el capítulo 4 se partió con la premisa de que existe una ventaja productiva de los cultivos dobles sobre los cultivos simples (probado en el capítulo 3), entonces, se plantea cómo hacer para incluir más cultivos dobles en las secuencias. La respuesta es diversificando las especies que incluimos en esas secuencias intensificadas. Por último, restaba saber si estos cambios en la intensificación y diversificación de las secuencias tienen un efecto tal, sobre el sistema de producción, que pueda ser censado por componentes del sistema, como las malezas, que compiten por los recursos disponibles con los cultivos. Todos los hilos de investigación apuntan a optimizar el uso de los recursos del ambiente en cultivos dobles para aumentar la productividad de los sistemas de producción de granos, respondiendo a preguntas que no se habían contestado hasta el momento.

Esta tesis avanzó en los conocimientos necesarios para ajustar el compromiso en la captura de recursos entre el cultivo invernal y el cultivo de segunda, específicamente a través de la fecha de liberación del lote y la disponibilidad de agua a la madurez del primer cultivo, para incrementar los rendimientos anuales. El análisis de los cultivos dobles se completó utilizando modelos de simulación agronómicos para ampliar la capacidad de análisis de los resultados e incluir la variabilidad climática interanual propia de la Pampa Ondulada. Esta herramienta puede ser utilizada, además, para ampliar la zona de estudio experimental y determinar las posibilidades de los sistemas de cultivo doble alternativos fuera de esta zona núcleo de altos rendimientos en grano.

Resulta necesario el estudio exhaustivo de las implicancias productivas a mediano y largo plazo de estos sistemas de uso de la tierra contrastantes, así como también la consolidación de bases sólidas para el diseño y evaluación de secuencias aún más intensificadas aplicando conocimientos obtenidos en el marco de esta tesis. El diseño de sistemas de cultivos innovadores que pueden ser implementados con tecnologías actualmente disponibles, con posibilidad de adopción inmediata por los productores, favorecería sin lugar a dudas el objetivo ya mencionado de lograr altos

rendimientos y reducir simultáneamente la variabilidad y el riesgo de la actividad productiva.

6.3 Implicancias para investigaciones futuras

Los resultados presentados en esta tesis destacan la necesidad de profundizar algunos de los conocimientos adquiridos. Es necesario discernir la importancia relativa de la fecha de siembra y de la disponibilidad de agua útil a la siembra de los cultivos de segunda en distintas zonas de la región. Por otro lado, es posible que la duración del efecto “intensificación” no haya sido suficiente para detectar cambios en el suelo que tengan impacto en los cultivos siguientes. Los cambios en la productividad generados por los cultivos dobles deben analizarse desde dos perspectivas, según sus efectos sean inmediatos o sus implicancias se observen en el mediano a largo plazo.

Los efectos inmediatos del cultivo doble incluyen la mejora de la productividad anual por incrementos en la captura de recursos disponibles. Sin embargo, los rendimientos de los cultivos estivales de segunda suelen ser menores que los del mismo cultivo sembrado en fecha óptima, debido a que son sembrados en fecha tardía (Cuadro 3.2), lo que determina un acortamiento de sus ciclos y exposición a algunas condiciones ambientales que determinan una reducción en la potencialidad de sus rendimientos (Figura 3.5). A su vez, en las condiciones de producción pampeanas, el retraso en la fecha de siembra interactúa con la menor disponibilidad de agua en el suelo luego de la cosecha del cultivo invernal (Figura 3.3). Estas dos condiciones varían con la elección del cultivo invernal antecesor, por lo que resulta interesante jerarquizar la importancia de estos dos factores y estudiar las modificaciones en una región con alta variabilidad climática y edáfica como la Región Pampeana. Por otro lado, a mediano y largo plazo, la implementación de un mayor número de cultivos dobles en las secuencias incrementaría los aportes anuales de rastrojos y de raíces al suelo en comparación con sistemas que solo secuencian cultivos simples estivales.

Resultaría de interés un proyecto que ponga a prueba varias secuencias de cultivos dobles, incluyendo las abordadas en este trabajo, contemplando alternativas más intensificadas y su evaluación en ciclo completo de rotación. Los objetivos de un proyecto de estas características serían i) analizar la variabilidad de los rendimientos de los cultivos de segunda en un amplio rango ambiental, geográfico e interanual, por efecto de las interacciones entre la fecha de siembra y la condición hídrica inicial; y ii) estudiar los cambios en las condiciones edáficas a mediano y largo plazo, junto con los posibles efectos sobre la productividad de los cultivos sembrados a continuación de rotaciones con diferente índice de intensificación. Esto contribuiría a robustecer el marco conceptual que exploró e identificó esta tesis, ampliando sus resultados a un universo de situaciones diferentes a las ensayadas aquí.

Para profundizar los conocimientos sobre los efectos del retraso en la fecha de siembra y la disponibilidad hídrica en cultivos de segunda, y la interacción entre ambos, podrían realizarse experimentos en computadora aplicando modelos agronómicos de simulación (DSSAT v4.5). Estas simulaciones incluirían los cultivos de maíz y soja en localidades representativas de la Región Pampeana y en regiones limítrofes hacia donde la agricultura se ha expandido. Estos cultivos deberían simularse en condiciones hídricas limitantes o potenciales para un amplio rango de fechas de siembra, desde las óptimas hacia las más tardías en períodos desfavorables. Las simulaciones en condiciones hídricas potenciales determinarían el efecto puro de las variaciones en las fechas de siembra. En cambio, las simulaciones con disponibilidad de agua limitada permitirán analizar la interacción de ambos factores. El rango de condiciones hídricas iniciales para maíz y soja podría establecerse con simulaciones de cultivos invernales o periodos de barbecho previos.

En la Región Pampeana coexisten actualmente dos escenarios productivos. En uno de ellos, los productores arrendatarios generalmente cultivan soja en monocultivo, una actividad con gran rédito económico en el corto plazo. En cambio, el segundo escenario corresponde a los productores propietarios de la tierra, los que cultivan una proporción menor de soja, rotando con gramíneas como trigo y maíz, lo que resulta en un sistema productivo más sustentable. Los productores en campo propio utilizan una secuencia típica de cultivos, conformada por trigo/soja de segunda-maíz-soja, es decir cuatro cultivos cada 3 años, con un 50% de participación de soja en la rotación. Los efectos de mediano y largo plazo podrían estudiarse mediante experimentos a campo que incluyan estas rotaciones con diferente índice de intensificación y otras aún más intensificadas aplicando los conocimientos adquiridos en la presente tesis para diseñarlas. En este sentido, podría evaluarse una rotación compuesta por trigo/soja de segunda-arveja/maíz de segunda-soja, con cinco cultivos cada tres años. Sería de gran interés comparar los efectos de cada una de las rotaciones sobre el ambiente edáfico y sus consecuencias sobre la productividad y el uso de recursos de los cultivos de soja a realizarse en el tercer año de las secuencias, e incluso luego de dos ciclos de rotación (al sexto año).

El abordaje a escala de sistemas productivos es relativamente escaso en la literatura debido a las complejas interacciones que entran en juego y la dificultad de su interpretación. Esta tesis consolida un cuerpo de experiencias y conocimiento sobre el funcionamiento de los sistemas en distintas escalas que abre la puerta a avanzar sobre los sistemas y su complejidad, respondiendo a las múltiples preguntas que surgen en el campo de la investigación, la tecnología y en la transferencia hacia los actores que intervienen tomando decisiones cotidianamente.

BIBLIOGRAFÍA

- Abeledo, L.G. y Miralles, D.J. 2012. ¿Qué cambios presentaron en los últimos años los sistemas de producción de trigo y cebada en Argentina? Pp. 39-54 en Valle, S., Lizana, C. y Calderini, D. (eds.) *Sistemas de Producción de Trigo y Cebada: Decisiones de manejo en base a conceptos ecofisiológicos para optimizar el rendimiento, la calidad y el uso de los recursos*. Editorial de la Universidad Austral de Chile, Chile.
- Abraham, C.T. y Singh, S.P. 1984. Weed management in sorghum-legume intercropping systems. *The Journal of Agricultural Science (Camb.)*, 103: 103-115.
- Aldrich, R.J. 1984. *Weed-crop ecology: principles in weed management*. Breton publishers, North Scituate, Massachusetts, USA.
- Alzueta, I., Abeledo, L.G., Mignone, C.M. y Miralles, D.J. 2012. Differences between wheat and barley in leaf and tillering coordination under contrasting nitrogen and sulfur conditions. *European Journal of Agronomy*, 41: 92-102.
- Amthor, J.S. 2000. The McCree–de Wit–Penning de Vries–Thornley respiration paradigms: 30 years later. *Annals of Botany*, 86: 1-20.
- Anderson, T.N. y Milberg, P. 1998. Weed flora and the relative importance of site, crop, crop rotation, and nitrogen. *Weed Science*, 46: 30-38.
- Andrade F.H., Uhart S.A., Arguissain G.G. y Ruiz R.A. 1992. Radiation use efficiency of maize grown in a cool area. *Field Crops Research*, 28: 345-354.
- Andrade, F.H. 2011. *La tecnología y la producción agrícola. El Pasado y los actuales desafíos*. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Andrade, F.H., Cirilo, A.G., Uhart, S. y Otegui, M. 1996. *Ecofisiología del Cultivo de Maíz*. Editorial La Barrosa-EEA Balcarce, CERBAS, INTA-FCA, UNMP, Argentina.
- Andrade, F.H. y Sadras, V.O. 2000. *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja*. Ed. Médica Panamericana S.A., Argentina.
- Andrade, F.H., Uhart, S.A. y Cirilo, A. 1993. Temperature affects radiation use efficiency in maize. *Field Crops Research*, 32: 17-25.
- Andrade, J.F., Poggio, S.L., Ermácora, M. y Satorre, E.H. 2015. Productivity and resource use in intensified cropping systems in the Rolling Pampa, Argentina. *European Journal of Agronomy*, 67: 37-51.

- Andrade, J.F. y Satorre, E.H., 2015. El doble cultivo en los sistemas de producción de la Región Pampeana. Cultivar decisiones, Buenos Aires, Argentina.
- Andrade, J.F. y Satorre, E.H. 2015. Single and double crop systems in the Argentine Pampas: Environmental determinants of annual grain yield. *Field Crops Research*, 177: 137-147.
- Aramburu Merlos, F., Monzon, J.P., Mercau, J. L., Taboada, M., Andrade, F.H., Hall, A. J., Jobbagy, E., Cassman, K.G. y Grassini, P. 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Field Crops Research*, 184: 145-154.
- Asseng, S., Foster, I.A.N. y Turner, N.C. 2011. The impact of temperature variability on wheat yields. *Global Change Biology*, 17: 997-1012.
- Asseng, S., Jamieson, P.D., Kimball, B., Pinter, P., Sayre, K., Bowden, J.W. y Howden, S.M. 2004. Simulated wheat growth affected by rising temperature, increased water deficit and elevated atmospheric CO₂. *Field Crops Research*, 85: 85-102.
- Baeumer, K. y De Wit, C.T. 1968. Competitive interference of plant species in monocultures and mixed stands. *Netherlands Journal Agricultural Science*, 16: 103-122.
- Baker, H. G. 1974. The Evolution of weeds. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 5: 1-24.
- Baker, J.T., Allen, L.H., Boote, K.J., Jones, P. y Jones, J. W. 1989. Response of soybean to air temperature and carbon dioxide concentration. *Crop Science*, 29: 98-105.
- Bàrberi, P., Cozzani, A., Macchia, M. y Bonari, E. 1998. Size and composition of the weed seedbank under different management systems for continuous maize cropping. *Weed Research*, 38: 319-334.
- Barsky, O. y Gelman, J., 2001. Historia del agro argentino. Desde la conquista hasta fines del siglo XX. Grijalbo Mondadori, Buenos Aires, Argentina.
- Batlla, D. y Benech-Arnold, R.L. 2007. Predicting changes in dormancy level in weed seed soil banks: Implications for weed management. *Crop Protection*, 26: 189-197.
- Benech Arnold, R.L., Sánchez, R.A., Forcella, F. Kruk, B. y Ghersa, C.M. 2000. Environmental control of dormancy in weed soil seed banks. *Field Crops Research*, 67: 105-122.

- Berzsenyi, Z., Gyórfy, B. y Lap, D. 2000. Effect of crop rotation and fertilisation on maize and wheat yields and yield stability in a long-term experiment. *European Journal of Agronomy*, 13: 225-244.
- Birch, C.J., Hammer, G.L. y Rickert, K.G. 1998. Temperature and photoperiod sensitivity of development in five cultivars of maize (*Zea mays* L.) from emergence to tassel initiation. *Field Crops Research*, 55: 93-107.
- Blackshaw, R.E. 1994. Rotation affects downy brome (*Bromus tectorum*) in winter wheat (*Triticum aestivum*). *Weed Technology*, 8: 728-732.
- Boote, K.J., Allen, L.H., Prasad, P.V., Baker, J.T., Gesch, R.W., Snyder, A.M. y Thomas, J. M. 2005. Elevated temperature and CO₂ impacts on pollination, reproductive growth, and yield of several globally important crops. *Journal of Agricultural Meteorology*, 60: 469-474.
- Boote, K.J., Jones, J.W. y Hoogenboom, G. 1998. Simulation of crop growth: CROPGRO model. Pp. 1-42 en Peart, R.M. y Curry, R.B. (eds.) *Agricultural Systems Modeling and Simulation*. Marcel Dekker, New York.
- Bruinsma, J. 2009. The resource outlook to 2050. By how much do land, water use and crop yields need to increase by 2050? en *Proc. FAO Expert Meeting on How to Feed the World in 2050*, 24–26 June 2009. FAO, Rome (disponible en <http://www.fao.org/wsfs/forum2050/background-documents/expert-papers/en/>).
- Bullock, D.G. 1992. Crop rotation. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 11: 309-326.
- Bunting, A.H., Dennett, M.D., Elston J. y Speed, C.B. 1982. Climate and crop distribution. Pp. 43-78 en Blaxter K.L. y Fowden, L. (eds.) *Food, nutrition and climate*. Applied Science Publisher, London.
- Burgos, J. 1968. El clima de la provincia de Buenos Aires en relación con la vegetación natural y el suelo. Pp. 33-39 en Cabrera, A. (ed.) *Flora de la provincia de Buenos Aires*, IV (Y). INTA.
- Buttigieg, P.L. y Ramette, A. 2014. A guide to statistical analysis in microbial ecology: a community-focused, living review of multivariate data analyses. *FEMS microbiology ecology*, 90: 543-550.
- Cabrera-Bosquet, L., Albrizio, R., Araus, J.L. y Nogués, S. 2009. Photosynthetic capacity of field-grown durum wheat under different N availabilities: A comparative study from leaf to canopy. *Environmental and Experimental Botany*, 67: 145-152.

- Calviño, P. y Monzon, J.P. 2009. Farming systems of Argentina: yield constraints and risk management. Pp. 55-70 en Sadras, V.O. y Calderini, D.F. (eds.) *Crop physiology*. Elsevier, Amsterdam.
- Calviño, P. y Sadras, V.O. 1999. Interannual variation in soybean yield: interaction among rainfall, soil depth and crop management. *Field Crops Research*, 63: 237-246
- Calviño, P., Sadras, V.O. y Andrade, F.H. 2003. Quantification of environmental and management effects on the yield of late-sown soybean. *Field Crops Research*, 83: 67-77.
- Capristo, P.R., Rizzalli, R.H. y Andrade, F.H. 2007. Ecophysiological yield components of maize hybrids with contrasting maturity. *Agronomy Journal*, 99: 1111-1118.
- Cassman, K.G. 1999. Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96: 5952-5959.
- Cassman, K.G., Dobermann, A., Walters, D.T. y Yang, H. 2003. Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. *Annual Review of Environment and Resources*, 28: 315-358.
- Caviglia, O.P y Sadras, V.O. 2001. Effect of nitrogen supply on crop conductance, water-and radiation-use efficiency of wheat. *Field Crops Research*, 69: 259-266.
- Caviglia, O.P, Sadras, V.O y 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. *Field Crops Research*, 87: 117-129.
- Caviglia, O.P. y Andrade, F.H. 2010. Sustainable intensification of agriculture in the Argentinean pampas: Capture and use efficiency of environmental resources. *The American Journal of Plant Science and Biotechnology*, 3: 1-8.
- Chauhan, B.S., Mahajan, G., Sardana, V., Timsina, J. y Jat, M.L. 2012. Productivity and sustainability of the rice-wheat cropping system in the Indo-Gangetic Plains of the Indian subcontinent: problems, opportunities, and strategies. *Advances in Agronomy*, 117: 315-369.
- Chen, C., Wang, E. y Yu, Q. 2010. Modelling the effects of climate variability and water management on crop water productivity and water balance in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 97: 1175-1184.
- Cirilo, A.G. y Andrade, F.H. 1994. Sowing date and maize productivity: I. Crop growth and dry matter partitioning. *Crop Science*, 34: 1039-1043.

- Clark, A.J., Decker, A.M. y Meisinger, J.J., 1994. Seeding rate and kill date effects on hairy vetch-cereal rye cover crop mixtures for corn production. *Agronomy Journal*, 86: 1065-1070.
- Clark, A.J., Decker, A.M., Meisinger, J.J., Mulford, F.R. y McIntosh, M.S., 1995. Hairy vetch kill date effects on soil water and corn production. *Agronomy Journal*, 87: 579-585.
- Clarke, K.R., 1993. Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure. *Austral Ecology*, 18: 117-143.
- Covarelli, G. y Tei., F., 1988. Effet de la rotation culturale sur la ore adventice du maïs. In: VIIIeme Colloque International Sur la Biologie, l'Ecologie et la Systematique Des Mauvaises Herbes, 2: 477-484. Comite Francais de Lutte Contre les Mauvaises Herbes, Paris, France and European Weed Research Society, Leverkusen, Germany.
- D'Acunto L. 2015. Efectos de la heterogeneidad del paisaje agrícola pampeano sobre el carbono, la biota edáfica y la descomposición de la hojarasca. Escuela Para Graduados, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Argentina.
- Danga, B.O., Ouma, J.P., Wakindiki, I.I. y Bar-Tal, A. 2009. Legume-wheat rotation effects on residual soil moisture, nitrogen and wheat yield in tropical regions. *Advances in Agronomy*, 101: 315-349.
- Daniels, M.B. y Scott, H.D. 1991. Water use efficiency of double-cropped wheat and soybean. *Agronomy Journal*, 83: 564-570.
- Dardanelli, J., Collino, D., Otegui, M.O. y Sadras, V.O. 2004. Bases funcionales para el manejo del agua en los cultivos de grano. Pp. 375-440 en Satorre, E.H., Benech Arnold, R.L., Slafer, G.A., de la Fuente, E.B., Miralles, D.J., Otegui, M.E. y Savin, R. (eds.) *Producción de granos, bases funcionales para su manejo*. Editorial Facultad de Agronomía, Buenos Aires.
- de la Fuente, E.B., Suárez, S.A., Ghera, C.M. y León, R.J. 1999. Soybean weed communities: relationships with cultural history and crop yield. *Agronomy Journal*, 91: 234-241.
- de la Fuente, E.B., Suárez, S.A. y Ghera, C.M. 2006. Soybean weed community composition and richness between 1995 and 2003 in the Rolling Pampas (Argentina). *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 115: 229-236.
- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Tablada, M. y Robledo, C.W. 2011. InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>

- Diaz-Zorita, M. y Fernandez-Quintanilla, M.V. 1999. Patrones de nodulación de soja en relación con propiedades de suelos bajo tres sistemas de labranza. *Revista de la Facultad de Agronomía*, La Plata, 104: 53-60.
- Domínguez, G., Studdert, G. y Echeverría, H. 2005. Propiedades del suelo: efectos de las prácticas de manejo. Pp. 207-253 en Echeverría, H.E. y García, F.O. (eds.) *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Dou, F., Wright, A.L. y Hons, F.M. 2007. Depth distribution of soil organic C and N after long-term soybean cropping in Texas. *Soil and Tillage Research*, 94: 530-536.
- Doucet, C., Weaver, S.E., Hamill, A.S. y Zhang, J. 1999. Separating the effects of crop rotation from weed management on weed density and diversity. *Weed Science* 729-735.
- Echeverría, H.E. y Garcia, F., 2005. *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Egley G.H. y Williams R.D. 1991. Emergence periodicity of six summer annual weed species. *Weed Science*, 39: 595-600.
- Egli, D.B. 2011. Time and the Productivity of Agronomic Crops and Cropping Systems. *Agronomy Journal*, 103: 743-750.
- Ernst, O. 2004. Leguminosas como cultivos de cobertura. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, 2: 1-9.
- Evans, L.T., Wardlaw, I.F. y Fischer, R.A. 1975. Wheat. Pp. 101-149 en Evans, L.T. (ed.) *Crop physiology: some case histories*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Falótico, J.L, Studdert, G.A y Echeverría, H.E. 1999. Nutrición nitrogenada del trigo bajo siembra directa y labranza convencional. *Ciencia del Suelo*, 17: 9-20.
- Fan, M., Shen, J., Yuan, L., Jiang, R., Chen, X., Davies, W. J. y Zhang, F. 2012. Improving crop productivity and resource use efficiency to ensure food security and environmental quality in China. *Journal of Experimental Botany*, 63: 13-24.
- Fang, Q., Ma, L., Yu, Q., Ahuja, L.R., Malone, R.W. y Hoogenboom, G. 2010. Irrigation strategies to improve the water use efficiency of wheat-maize double cropping systems in North China Plain. *Agricultural Water Management*, 97: 1165-1174.
- Fila, G., Bellocchi, G., Acutis, M. y Donatelli, M. 2003. Irene: a software to evaluate model performance. *European Journal of Agronomy*, 18: 369-372.

- Fischer, R.A. 1985. Number of kernel in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *Journal of Agricultural Science*, 105: 447-461.
- Fischer, R.A., Santiveri, F. y Vidal, I.R. 2002. Crop rotation, tillage and crop residue management for wheat and maize in the sub-humid tropical highlands: I. Wheat and legume performance. *Field Crops Research*, 79: 107-122.
- Fischer, T., Byerlee, D., y Edmeades, G. 2014. Crop yields and global food security. Will yield increase continue to feed the world? *ACIAR Monograph Series*, Australian Centre for International Agricultural Research, Canberra, Australia.
- Foley, J.A., DeFries, R., Asner, G.P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S.R., Chapin, F.S., Coe, M.T., Daily, G.C. y Gibbs, H.K. 2005. Global consequences of land use. *Science*, 309: 570-574.
- Francis, C.A. y Smith, M.E. 1985. Variety development for multiple cropping systems. *Critical reviews in plant sciences*, 3: 133-168.
- Gallagher, J.N. y Bisco, P.V. 1978. A physiological analysis of cereal yield. 2. Partitioning of dry matter. *Agricultural Progress*, 53: 51-70.
- Ghersa, C.M., Roush, M.L., Radosevich, S.R. y Cordray, S. M. 1994. Coevolution of agroecosystems and weed management. *BioScience*, 44: 85-94.
- Ghersa, C.M., Ferraro, D.O., Omacini, M., Martinez-Ghersa, M.A., Perelman, S., Satorre, E.H. y Soriano, A. 2002. Farm and landscape level variables as indicators of sustainable land-use in the Argentine Inland-Pampa. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 93: 279-293.
- Giberti, H.C. 1985. *Historia económica de la ganadería argentina*. Hyspamérica Ediciones, Buenos Aires, Argentina.
- Gooding, M.J. y Davies W.P. 1997. *The production and utilization of wheat, system, quality and the environment*, Oxford, CAB International, Wallingford, U.K.
- Graß, R., Heuser, F., Stülpnagel, R., Piepho, H.P. y Wachendorf, M. 2013. Energy crop production in double-cropping systems: Results from an experiment at seven sites. *European Journal of Agronomy*, 51: 120-129.
- Grant C.A., Peterson G.A. y Campbell C.A. 2002. Nutrient considerations for diversified cropping systems in the northern great plains. *Agronomy Journal*, 94: 186-198.
- Grubb, P.J. 1977. The maintenance of species-richness in plant communities: the importance of the regeneration niche. *Biological Reviews*, 52: 107-145.

- Guglielmini, A.C., Ghera, C.M. y Satorre, E.H. 2007. Co-evolution of domesticated crops and associated weeds. *Ecología Austral*, 17: 167-178.
- Gupta, R. y Seth, A. 2007. A review of resource conserving technologies for sustainable management of the rice-wheat cropping systems of the Indo-Gangetic plains (IGP). *Crop Protection*, 26: 436-447.
- Gutierrez Boem, F.H., Prystupa, P. y Ferraris, G. 2007. Seed Number and Yield Determination in Sulfur Deficient Soybean Crops. *Journal of Plant Nutrition*, 30: 93-104.
- Hald, A.B. 1999. The impact of changing the season in which cereals are sown on the diversity of the weed flora in rotational fields in Denmark. *Journal of Applied Ecology*, 36: 24-32.
- Hall, A.J., Rebella, C.M., Ghera, C.M. y Culot, J. Ph. 1992. Field-crop systems of the Pampas. Pp. 413-450 en Pearson C.J. (ed.) *Field crop ecosystems series: Ecosystems of the world*. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam.
- Hall, A.J. y Richards, R.A. 2013. Prognosis for genetic improvement of yield potential and water-limited yield of major grain crops. *Field Crops Research*, 143: 18-33.
- Hallgren, E., Palmer, M.W. y Milberg, P. 1999. Data diving with cross-validation: an investigation of broad-scale gradients in Swedish weed communities. *Journal of Ecology*, 87: 1037-1051.
- Hamblin, A. y Tennant, D. 1987. Root length density and water uptake in cereals and grain legumes: how well are they correlated. *Crop Pasture Science*, 38: 513-527.
- Harvey, M. y Pilgrim, S. 2011. The new competition for land: Food, energy, and climate change. *Food Policy*, 36: S40-S51.
- Hesketh, J., 1963. Limitations to photosynthesis responsible for differences among species. *Crop Science*, 3: 493-496.
- Hitsuda, K., Sfredo, G.J. y Klepker, D. 2004. Diagnosis of sulfur deficiency in soybean using seeds. *Soil Science Society of America Journal*, 68: 1445-1451.
- Hoogenboom, G., Jones, J.W., Wilkens, P.W., Porter, C.H., Boote, K.J., Hunt, L.A., Singh, U., Lizaso, J.L., White, J.W., Uryasev, O., Royce, F.S., Ogoshi, R., Gijssman, A.J., Tsuji, G.Y. y Koo, J. 2012. *Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.5 [CD-ROM]*. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii.
- INTA 1989. *Mapa de suelos de la Provincia de Buenos Aires*.

- INTA 2011. Ejes conceptuales para un posicionamiento institucional ante el fenómeno de la soja como principal componente del proceso de agriculturización. Documento interno.
- Jensen, E.S. 1994. Availability of nitrogen in ¹⁵N-labelled mature pea residues to subsequent crops in the field. *Soil Biology and Biochemistry*, 26: 465-472.
- Kantolic, A.G. y Slafer, G.A. 2001. Photoperiod sensitivity after flowering and seed number determination in indeterminate soybean cultivars. *Field Crops Research*, 72: 109-118.
- Karlen, D.L., Wollenhaupt, N.C., Erbach, D.C., Berry, E.C., Swan, J.B., Eash, N.S. y Jordahl, J.L. 1994. Crop residue effects on soil quality following 10-years of no-till corn. *Soil and Tillage Research*, 31: 149-167.
- Kumar, K. y Goh, K.M. 1999. Crop Residues and Management Practices: effects on soil quality, soil nitrogen dynamics, crop yield, and nitrogen recovery. *Advances in Agronomy*, 68: 197-319.
- Kumar, K. y Goh, K.M. 2002. Management practices of antecedent leguminous and non-leguminous crop residues in relation to winter wheat yields, nitrogen uptake, soil nitrogen mineralization and simple nitrogen balance. *European Journal of Agronomy*, 16: 295-308.
- Kurosaki, H. y Yumoto, S. 2003. Effects of low temperature and shading during flowering on the yield components in soybeans. *Plant Production Science*, 6: 17-23.
- Ladha, J.K., Pathak, H., Tirol-Padre, A., Dawe, D. y Gupta, R.K., 2003. Productivity trends in intensive rice-wheat cropping systems in Asia. Pp. 45-76 en Ladha, J.K., Hill, J.E., Buresh, R.J., Duxbury, J. y Gupta, R.K. (eds.) *Improving the Productivity and Sustainability of Rice-Wheat Systems: Issues and Impacts*. ASA, Special Publication n° 65, ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.
- Lanteri, L. 2009. Respuesta a precios del área sembrada de soja en la Argentina. Documentos de Trabajo 2009, 46. Banco Central de la República Argentina ie, Investigaciones Económicas, ISSN 1850-3977.
- Larcher, W. 1980. *Physiological Plant Ecology*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, New York.
- Lemaire, G. y Gastal, F. 2009. Quantifying crop responses to nitrogen deficiency and avenues to improve nitrogen use efficiency. Pp. 171-211 en Sadras, V.O y Calderini, D.F. (eds.) *Crop physiology: applications for genetic improvement and agronomy*. Elsevier Academic Press, San Diego, CA.

- León, R.J.C., Rusch, G.M. y Oesterheld, M. 1984. Pastizales pampeanos-impacto agropecuario. *Phytocoenologia*, 12: 201-218.
- Liebman, M. y A.S. Davis. 2000 Integration of soil, crop and weed management in low-external-input farming systems. *Weed Research*, 40: 27-47
- Lobell, D.B. y Asner, G.P. 2003. Climate and management contributions to recent trends in US agricultural yields. *Science*, 299: 1032-1032.
- Lobell, D.B., Bänziger, M., Magorokosho, C. y Vivek, B. 2011. Nonlinear heat effects on African maize as evidenced by historical yield trials. *Nature Climate Change*, 1: 42-45.
- Lobell, D.B. y Field, C.B. 2007. Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming. *Environmental Research Letters*, 2: 014002.
- Lobell, D.B. y Ortiz-Monasterio, J.I. 2007. Impacts of day versus night temperatures on spring wheat yields. *Agronomy Journal*, 99: 469-477.
- Lobell, D.B., Ortiz-Monasterio, J.I., Asner, G.P., Matson, P.A., Naylor, R.L. y Falcon, W.P. 2005. Analysis of wheat yield and climatic trends in Mexico. *Field Crops Research*, 94: 250-256.
- Loomis, R.S. y Connor, D.J. 1992. *Crop ecology: Productivity and management in agricultural systems*. Cambridge University Press, Melksham, Great Britain.
- Lososová, Z., Chytrý, M., Cimalova, S., Kropáč, Z., Otýpková, Z., Pyšek, P. y Tichý, L., 2004. Weed vegetation of arable land in Central Europe: Gradients of diversity and species composition. *Journal of Vegetation Science*, 15: 415-422.
- Maddonni, G.A. 2012. Analysis of the climatic constraints to maize production in the current agricultural region of Argentina-A probabilistic approach. *Theoretical and Applied Climatology*, 107: 325-345.
- Magrin, G.O., Hall, A.J., Baldy, C.H. y Grondona, M.O. 1993. Spatial and interannual variations in the photothermal quotient: implications for the potential kernel number of wheat crops in Argentina. *Agricultural and Forest Meteorology*, 67: 29-41.
- Magrin, G.O., Travasso, M.I., Diaz, R.A. y Rodriguez, R.O., 1997. Vulnerability of the agricultural systems of Argentina to climate change. *Climate Research*, 9: 31-36.
- Manderscheid, R., Burkart, S., Bramm, A. y Weigel, H.J. 2003. Effect of CO₂ enrichment on growth and daily radiation use efficiency of wheat in relation to temperature and growth stage. *European Journal of Agronomy*, 19: 411-425.

- Martínez-Ghersa, M.A., Ghersa, C.M. y Satorre, E.H. 2000. Coevolution of agriculture systems and their weed companions: implications for research. *Field Crops Research*, 67: 181-190.
- Mas, M.T., Verdú, A.M.C., Kruk, B.C., de Abelleira, D., Guglielmini, A.C. y Satorre, E.H. 2010. Weed communities of transgenic glyphosate-tolerant soyabean crops in ex-pasture land in the southern Mesopotamic Pampas of Argentina. *Weed Research*, 50: 320-330.
- Massignam, A., Chapman, S., Hammer, G. y Fukai, S. 2012. Effects of nitrogen supply on canopy development of maize and sunflower. *Crop and Pasture Science*, 62: 1045-1055.
- Meiss, H., Mediene, S., Waldhardt, R., Caneill, J., Bretagnolle, V., Reboud, X., Munier y Jolain, N. 2010. Perennial lucerne affects weed community trajectories in grain crop rotations. *Weed Research*, 50: 331-340.
- Menéndez, F.J. y Satorre, E.H. 2007. Evaluating wheat yield potential determination in the Argentine Pampas. *Agricultural Systems*, 95: 1-10.
- Mercau, J.L. y Otegui, M.E. 2014. A modeling approach to explore water management strategies for late-sown maize and double-cropped wheat–maize in the rainfed Pampas Region of Argentina. Pp. 351-374 en Ahuja, L.R., Ma, L. y Lascano R.J. (eds.) *Practical applications of agricultural system models to optimize the use of limited water. Advances in Agricultural Systems Modeling, Volume 5*. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI.
- Mercau, J.L., Sadras, V.O. Satorre, E.H., Messina, C., Balbi, C., Uribelarrea, M. y Hall., A.J. 2001. On-farm assessment of regional and seasonal variation in sunflower yield in Argentina. *Agricultural Systems*, 67: 83-103.
- Miralles, D.J. 2013. Estrategias para aumentar la producción de alimentos. *Ciencia Hoy*, 34: 29-33.
- Miyake, S., Renouf, M., Peterson, A., McAlpine, C. y Smith, C. 2012. Land-use and environmental pressures resulting from current and future bioenergy crop expansion: A review. *Journal of Rural Studies*, 28: 650-658.
- Mohler, C.L. y Liebman, M. 1987. Weed productivity and composition in sole crops and intercrops of barley and field pea. *Journal of Applied Ecology*, 24: 685-699.
- Monteith, J.L. 1965. Light distribution and photosynthesis in field crops. *Annals of Botany*, 29: 17-37.
- Monzon J.P., Aramburu Merlos F., Mercau J.L., Taboada M., Andrade F.H., Hall A.J., Jobaggy E., Cassman K.G., Grassini P., 2013. Magnitude and Variability of

Maize, Wheat, and Soybean Yield Gaps in Argentina. American Society of Agronomy International Annual Meeting, Tampa, Fl., USA. 3-6 November 2013.

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. y Calviño, P.A. 2014. Maize-soybean intensification alternatives for the Pampas. *Field Crops Research*, 162: 48-59.

Monzon, J.P., Sadras, V.O., Abbate, P.A. y Caviglia, O.P. 2007. Modelling management strategies for wheat-soybean double crops in the south-eastern Pampas. *Field Crops Research*, 101: 44-52.

Mortensen, D.A., Dieleman, J.A. y Johnson, G.A. 1998. Weed spatial variation and weed management. Pp. 293-309 en Hatfield, J.L., Buhler, D.D. y Stewart B.A. (eds.) *Integrated weed and soil management*. Sleeping Bear Press, Chelsea, MI.

Norman, J.M. y Arkebauer, T.J. 1991. Predicting canopy photosynthesis and light use efficiency from leaf characteristics. Pp. 75-94 en Boote, K.J. y Loomis, R.S. (eds.) *Crop photosynthesis from biochemistry to canopy*. CSSA special publication n° 19. CSSA, ASA, Madison, WI.

Novelli, L.E., Caviglia, O.P. y Melchiori, R.J.M. 2011. Impact of soybean cropping frequency on soil carbon storage in Mollisols and Vertisols. *Geoderma*, 167: 254-260.

Ohnishi, S., Miyoshi, T. y Shirai, S. 2010. Low temperature stress at different flower developmental stages affects pollen development, pollination, and pod set in soybean. *Environmental and Experimental Botany*, 69: 56-62.

Otegui, M., Andrade, F. y Suero, E. 1995. Growth, water use, and kernel abortion of maize subjected to drought at silking. *Field Crops Research*, 40: 87-94.

Pazos, M.S. y Mestelan, S. 2002. Classification of udolls with caliche at variable depth. Buenos Aires province - Argentina. *Soil Science Society of America Journal*, 66: 1256-1264.

Penning de Vries, F.W.T., Van Laar, H.H y Chardon, M.C.M. 1983. Bioenergetics of growth of seeds, fruits, and storage organs. Pp. 37-59 en Smith, W.H. y Banta, S.J. (eds.) *Productivity of field crops under different environments*. IRRI, Los Baños, The Philippines.

Podestá, G.P., Messina, C.D., Grondona, M.O. y Magrin, G.O. 1999. Associations between grain crop yields in central-eastern Argentina and El Niño-Southern Oscillation. *Journal of Applied. Meteorology*, 38: 1488-1498.

- Poggio, S.L. 2005. Structure of weed communities occurring in monoculture and intercropping of field pea and barley. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 109: 48-58.
- Poggio, S.L. 2012. Cambios florísticos en comunidades de malezas: un marco conceptual basado en reglas de ensamblaje. *Ecología austral*, 22: 150-158.
- Poggio, S.L y Ghera, C.M. 2011. Species richness and evenness as a function of biomass in arable plant communities. *Weed Research*, 51: 241-249.
- Popay, A.I., T.I. Cox, A. Ingle y R. Kerr. 1995. Seasonal emergence of weeds in cultivated soil in New Zealand. *Weed Research*, 35: 429-436.
- Prohaska, F. 1976. The climate of Argentina, Paraguay and Uruguay. Pp. 13-112 en Schwerdtfeger, W. (ed.) *Climates of Central and South America. World Survey of Climatology*, Vol. 12. Elsevier, Amsterdam.
- Pyšek, P. y Lepš, J. 1991. Response of a weed community to nitrogen fertilization: a multivariate analysis. *Journal of Vegetation Science*, 2: 237-244.
- R Development Core Team, 2008. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Radosevich, S.R., Holt, J.S. y Ghera, C.M. 2007a. Weeds and invasive plants. Pp. 3-33 en Radosevich, S.R., Holt, J.S. y Ghera, C.M. (eds.) *Ecology of weeds and invasive plants: Relationships to agriculture and natural resource management*. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, USA.
- Radosevich, S.R., Holt, J.S. y Ghera, C.M. 2007b. Plant – plant associations Ecology of weeds and invasive plants. Pp. 183-237 en Radosevich, S.R., Holt, J.S. y Ghera, C.M. (eds.) *Relationships to agriculture and natural resource management*. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, USA.
- Reca, L.G. 2006. Aspectos del desarrollo agropecuario argentino: 1875-2005. *Anales ANAV*, 60: 175-231.
- Reeves, D. 1994. Cover crops and rotations. Pp. 125-172 en Hartfield, J.L. y Stewart, B.A. (eds.) *Advances in Soil Science-Crops Residue Management*. Lewis Publishersm CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- Ritchie, J.T. y Otter, S. 1985. Description and Performance of CERES-Wheat: A User-oriented Wheat Yield Model. Pp. 159-175 en Serv N.T.I. (ed) *ARS wheat yield project*. National Technology Information Services, Springfield, Missouri, pp. 159–175.

- Sadzawka, A., Carrasco, M., Demanet, R., Flores, H., Grez, R., Mora, M. L., y Neaman, A. 2007. Métodos de análisis de tejidos vegetales. Serie actas INIA, Santiago, Chile.
- Salvagiotti, F., Castellarín, J.M., Miralles, D.J. y Pedrol, H.M. 2009. Sulfur fertilization improves nitrogen use efficiency in wheat by increasing nitrogen uptake. *Field Crops Research*, 113: 170-177.
- Salvagiotti, F. y Miralles, D.J. 2008. Radiation interception, biomass production and grain yield as affected by the interaction of nitrogen and sulfur fertilization in wheat. *European Journal of Agronomy*, 28: 282-290.
- Satorre, E. 2005. Cambios tecnológicos en la agricultura argentina actual. *Ciencia Hoy*, 15: 24-31.
- Satorre, E.H. 2000. Production systems in the Argentine Pampas and their ecological impact. Pp. 81-101 en Solbrig, O.T., Paarlberg, R. y di Castri, F. (eds.) *Globalization and the rural environment*. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, USA.
- Satorre, E.H. 2012. Recent changes in Pampean agriculture: posible new avenues to cope global change challenges. Pp. 47-57 en Slafer G.A. y Araus, J.L. (eds.) *Crop stress management and climate change*; CABI Series N° 2, Cambridge, MA, USA.
- Satorre, E.H. y Ghera, C.M. 1987. Relationship between canopy structure and weed biomass in different winter crops. *Field Crops Research*, 17: 37-43.
- Satorre, E.H., Benech Arnold, R.L., Slafer, G.A., de la Fuente, E.B., Miralles, D. J., Otegui M.E. y Savin, R. 2004. Producción de granos, bases funcionales para su manejo. Editorial Facultad de Agronomía, Buenos Aires.
- Savin, R. y Slafer, G.A. 1991. Shading effects on the yield of an Argentinean wheat cultivar. *Journal of Agricultural Science*, 116: 1-7.
- Schreiber, M.M. 1992. Influence of tillage, crop rotation, and weed management on giant foxtail (*Setaria faberi*) population dynamics and corn yield. *Weed Science*, 40: 645-653.
- Seymour, M., Kirkegaard, J.A., Peoples, M.B., White, P.F. y French, R.J. 2012. Break-crop benefits to wheat in Western Australia-insights from over three decades of research. *Crop and Pasture Science*, 63: 1-16.
- Sibaja, G., Satorre, E.H. y Suárez, M. 2014. Maíz: técnicas probadas para una producción rentable. Publicación Especial, Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola-AACREA, Buenos Aires, Argentina.

- Sinclair, T.R. y Horie, T. 1989. Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation use efficiency: a review. *Crop science*, 29: 90-98.
- Smith, R.G. y Gross, K.L. 2007. Assembly of weed communities along a crop diversity gradient. *Journal of Applied Ecology*, 44: 1046-1056.
- Sogbedji J.M., van Es, H.M. y Agbeko K.L. 2006. Cover cropping and nutrient management strategies for maize production in western Africa. *Agronomy Journal*, 98: 883-889.
- Soriano, A. 1991. Rio de la Plata Grasslands. Pp. 367-407 en Coupland, R.T. (ed.) *Ecosystems of the world 8A. Natural grassland. Introduction and western hemisphere*. Elsevier, Amsterdam.
- Stone, P.J. y Savin, R. 1999. Grain quality and its physiological determinants. Pp. 85-120 en Satorre E.H. y Slafer, G.A. (eds.) *Wheat: Ecology and physiology of yield determination*. FoodProductPress, New York, USA.
- Studdert, G.A. y Echeverria, H.E. 2000. Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. *Soil Science Society of America Journal*, 64: 1496-1503.
- Suárez, S.A., de la Fuente, E.B., Ghera, C.M. y Leon, R.J. 2001. Weed community as an indicator of summer crop yield and site quality. *Agronomy Journal*, 93: 524-530.
- Sun, Q., Kröbel, R., Müller, T., Römheld, V., Cui, Z., Zhang, F. y Chen, X. 2011. Optimization of yield and water-use of different cropping systems for sustainable groundwater use in North China Plain. *Agricultural Water Management*, 98: 808-814.
- Sutherland, S. 2004. What makes a weed a weed: life history traits of native and exotic plants in the USA. *Oecologia*, 141: 24-39.
- Swanton, C.J., Clements, D.R. y Derksen, D.A. 1993. Weed succession under conservation tillage: A hierarchical framework for research and management. *Weed Technology*, 7: 286-297.
- Tilman, D., Cassman, K.G., Matson, P.A., Naylor, R. y Polasky, S. 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418: 671-677.
- van Ittersum, M.K., Cassman, K.G., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P. y Hochman, Z. 2013. Yield gap analysis with local to global relevance-A review. *Field Crops Research*, 143: 4-17.

- van Ittersum, M.K. y Rabbinge, R. 1997. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crops Research*, 52: 197-208.
- Varvel, G.E., Schepers, J.S. y Francis, D.D. 1997. Ability for in-season correction of nitrogen deficiency in corn using chlorophyll meters. *Soil Science Society of America Journal*, 61: 1233-1239.
- Van Opstal, N.V., Caviglia, O.P. y Melchiori, R.J.M. 2011. Water and solar radiation productivity of double-crops in a humid temperate area. *Australian Journal of Crop Science*, 5: 1760-1766.
- Viglizzo, E. y Jobbágy, E. 2010. Expansión de la frontera agropecuaria en Argentina y su impacto ecológico-ambiental. Ediciones INTA, Buenos Aires.
- Wackernagel, H. 2003. *Multivariate Geostatistics: an introduction with applications*. Springer-Verlag, Berlín.
- Wang, X., Peng, L., Zhang, X., Yin, G., Zhao, C. y Piao, S. 2014. Divergence of climate impacts on maize yield in Northeast China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 196: 51-58.
- Wang, Z., Song, K., Li, X., Zhang, B. y Liu, D. 2007. Effects of climate change on yield of maize in maize zone of Songnen Plain in the past 40 years. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 21: 112-117.
- Wang, F., He, Z., Sayre, K., Li, S., Si, J., Feng, B. y Kong, L. 2009. Wheat cropping systems and technologies in China. *Field Crops Research*, 111: 181-188.
- Watson, S.A. y Ramstad, P.E. 1987. Structure and Composition. Pp. 53-82 en Watson, S.A. y Ramstad, P.E. (eds.) *Corn: Chemistry and technology*. American Association of Cereal Chemists, Minnesota, USA.
- Welden, C.W. y Slauson, W.L. 1986. The intensity of competition versus its importance: an overlooked distinction and some implications. *Quarterly Review of Biology*, 61: 23-44.
- Weilenmann de Tau, M.E. y Suárez, J.C. 1998. Soja. Pp. 197-230 en Aguirrezábal, L.A. y Andrade, F.H. (eds.) *Calidad industrial de productos agrícolas. Bases ecofisiológicas, genéticas y de manejo agronómico*. Edición de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Mar del Plata y de INTA Balcarce, Argentina.
- Wright, A.L. y Hons, F.M. 2004. Soil aggregation and carbon and nitrogen storage under soybean cropping sequences. *Soil Science Society of America Journal*, 68: 507-513.