

Determinación del rendimiento de cultivos estivales para grano en la región semiárida central de Argentina: análisis comparado y estimación de la variabilidad esperable en respuesta al clima

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

Miguel Maximiliano Riglos
Ingeniero Agrónomo - UNLP - 2016

Lugar de trabajo: EEA INTA San Luis



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



COMITÉ CONSEJERO

Director de tesis

María Elena Otegui

Ingeniera Agrónoma (Universidad de Buenos Aires)
Magister Scientiae (Universidad Nacional de Mar del Plata)
Doctor (Université Paris XI, UFRS d'Orsay, France)

Co-director

Jorge Luis Mercau

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)
Magister Scientiae (Universidad de Buenos Aires)

Consejero de estudios

Alfredo Gabriel Cirilo

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)
Magister Scientiae (Universidad Nacional de Mar del Plata)
Doctor en Ciencias Agrarias (Universidad Nacional de Mar del Plata)

JURADO DE TESIS

JURADO

María Alejandra Pérez

Ingeniera Agrónoma (Universidad Nacional de Córdoba)
Magister Scientiae (Universidad Nacional de Córdoba)
Doctora en Ciencias (Universidade Federal de Pelotas)

JURADO

Martín Oesterheld

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)
PhD (University of Syracuse)

JURADO

Mónica Lopez Pereira

Ingeniera Agrónoma (Universidad de Buenos Aires)
Magister Scientiae (Universidad de Buenos Aires)
Doctor en Ciencias Agropecuarias (Universidad de Buenos Aires)

Fecha de defensa de la tesis: 28 de septiembre de 2023

DEDICATORIA

A mis padres, Mariela y Miguel

*Por los valores que siempre me han inculcado.
Porque su ejemplo es el motivo para esmerarme día a día.*

A mis hermanos, Juan, Flopi y Coti

Por brindarme su amor y compañía.

A mis abuelas, Pelusa y Alicia, y seres queridos

Por siempre acompañarme y apoyarme en este camino.

A mi novia, Anto

Por regalarme su amor día a día.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mis agradecimientos a todos aquellos que de alguna manera u otra hicieron posible la realización de este trabajo de tesis:

Agradecer de manera especial a mis directores María, Jorge y Alfredo. Su apoyo y confianza en mi trabajo, su rigurosidad y su capacidad para guiarme han sido un aporte invaluable. Sus consejos junto con las largas horas de análisis y discusión de resultados fueron esenciales para mi crecimiento profesional y personal.

A Luis Mayer por su confianza en mí, su predisposición y por su generosidad durante mis primeros años de formación.

A todos los integrantes del Grupo de Ecofisiología del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) Pergamino por integrarme desde un principio, por el valioso tiempo invertido en discusiones agronómicas y por su colaboración en los ensayos de campo.

A Ricardo Haro por llevar a cabo los experimentos en INTA Manfredi y por su predisposición a todas mis inquietudes.

A todos mis compañeros de INTA San Luis por su amistad, acompañamiento y aliento.

A quienes colaboraron en las EEAs INTA San Luis, Manfredi y Pergamino con las actividades de campo y de laboratorio, por todo el trabajo y su ayuda invaluable.

Al INTA y al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por otorgarme la beca de estudio y por la financiación de los proyectos en los que participé como investigador.

¡Gracias a ustedes!

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 ha sido presentado, en forma parcial o total, como una tesis en esta u otra institución.”

Ing. Agr. Miguel Maximiliano Riglos

PUBLICACIONES DERIVADAS DE ESTA TESIS

Trabajos científicos publicados en revistas con referato

Otegui, M.E., **Riglos, M.M**, Mercau, J.L., 2021. Genetically modified maize hybrids and delayed sowing reduced drought effects across a rainfall gradient in temperate Argentina. *Journal of Experimental Botany* 72 (14), 5180–5188, <https://doi.org/10.1093/jxb/erab139>

ÍNDICE

ÍNDICE DE CUADROS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ABREVIATURAS.....	xiv
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT.....	xviii
CAPÍTULO 1.....	20
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	20
1.Planteo del problema y revisión de antecedentes	21
1.1 El desafío de aumentar los rendimientos en la Región Semiárida Central	21
1.2 Fisiología de la determinación del rendimiento en ambientes proclives a sequía y temperaturas supraóptimas.....	24
1.3 Estimación de la variabilidad del RG de cultivos estivales en la RSC.....	31
1.2 Objetivos.....	33
1.2.1 Objetivo general.....	33
1.2.2 Objetivos específicos.....	33
1.3 Hipótesis	33
1.4 Estructura de la tesis	35
CAPÍTULO 2	37
MATERIALES, MÉTODOS E INFORMACIÓN AGROCLIMÁTICA.....	37
2.1 Metodología.....	38
2.1.1 Condiciones experimentales y material vegetal utilizado	38
2.1.2 Diseño experimental, mediciones realizadas y análisis de datos.....	41
2.2 Utilización de Modelos de Simulación de Aplicación Agronómica (MSAA).....	43
2.3 Condiciones Agroclimáticas.....	44
2.3.1. Caracterización Climática durante la estación de crecimiento.....	44
2.3.2 Contenido de agua en el suelo durante la estación de crecimiento	48
CAPÍTULO 3	50
DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO DE MAÍZ, SOJA, SORGO Y MANÍ: ANÁLISIS ECOFISIOLÓGICO A LO LARGO DE UNA TRANSECTA LONGITUDINAL DESDE LA ZONA HÚMEDA A LA SEMIÁRIDA DE LA REGIÓN TEMPLADA CENTRAL DE ARGENTINA.....	50
3.1 Introducción.....	51
3.2 Materiales y Métodos.....	54
3.2.1 Estimaciones específicas realizadas	55
3.3 Resultados.....	58
3.3.1 Rendimiento en grano y sus determinantes fisiológicos.....	58
3.3.2 Efecto del ambiente sobre el número de granos y peso individual del grano.....	66
3.4 Discusión.....	75
3.5 Conclusiones.....	80
CAPÍTULO 4.....	81
EFICIENCIAS DE USO DEL AGUA Y LA RADIACIÓN EN MAÍZ, SOJA, SORGO Y MANÍ: ANÁLISIS DE SU ESTABILIDAD A TRAVÉS DE UN GRADIENTE EDAFOCLIMÁTICO EN LA REGIÓN CENTRAL DE ARGENTINA.....	81
4.1 Introducción.....	82
4.2 Materiales y Métodos.....	84
4.3 Resultados.....	86
4.3.1 Generación de biomasa y eficiencia en el uso de recursos correspondientes a todo el ciclo.....	86

4.3.2 Generación de biomasa y eficiencia en el uso de recursos en la etapa vegetativa	93
4.3.3 Generación de biomasa y eficiencia en el uso de recursos en la etapa reproductiva.....	97
4.4 Discusión.....	101
4.5 Conclusiones.....	106
CAPÍTULO 5.....	108
EVALUACIÓN DE ESTRATEGIAS DE MANEJO DE MAÍZ, SOJA, SORGO Y MANÍ EN ESCENARIOS DE LA REGIÓN SEMIÁRIDA CENTRAL.....	108
5.1 Introducción.....	109
5.2 Materiales y Métodos.....	111
5.3 Resultados.....	117
5.3.1Evaluación del modelo en la simulación de soja, maní, maíz y sorgo en un rango amplio de condiciones ambientales.....	117
5.3.2Variabilidad explorada de rendimientos.....	123
5.3.3Variabilidad de rendimientos en la RSC bajo distintos escenarios.....	124
5.3.3.1Recarga inicial de agua.....	124
5.2.3.2Comparación de estrategias: modificación de fecha de siembra y sustitución de especies	128
5.4 Discusión.....	136
5.5 Conclusiones.....	144
CAPÍTULO 6.....	145
DISCUSIÓN GENERAL.....	145
6.1. Introducción.....	146
6.2. Contraste de hipótesis.....	147
6.3 Implicancias agronómicas de la tesis para futuras investigaciones y consideraciones para el ma- nejo de estos cultivos.....	155
Bibliografía.....	160

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1. Caracterización climática en base a registros diarios obtenidos de las tres estaciones experimentales entre 1971 y 2018 (valores promedio).....	39
Cuadro 2.2. Descripción de las especies utilizadas en este estudio.....	40
Cuadro 2.3. Descripción del Clima. Valores diarios promedios de radiación fotosintéticamente activa incidente (RFA_{inc}), temperatura media (T_{MED}), precipitaciones (mm), déficit de presión de vapor (DPV), evapotranspiración potencial (ETo) y el riego total (mm, sólo en RPH) durante las dos campañas (Camp1: 2016/17 y Camp2: 2017/18) y las tres regiones analizadas (RSC: Región Semiárida Central, RSH: Región Sub-Húmeda y RPH: Región Pampeana Húmeda).....	47
Cuadro 3.1. Estadística descriptiva correspondiente al rendimiento en grano, sus determinantes fisiológicos y componentes numéricos para cada especie evaluada. Datos calculados en base al valor promedio de tres repeticiones para cada combinación de Región \times Campaña \times Fecha de siembra.....	59
Cuadro 4.1. Estadística descriptiva referida a los valores correspondientes a todo el ciclo (identificado con la letra 'c') de la biomasa total y sus determinantes fisiológicos para cada especie evaluada. Datos calculados en base al valor promedio de tres repeticiones para cada combinación de Región \times Campaña \times Fecha de siembra.....	87
Cuadro 5.1. Coeficientes genéticos calibrados para el híbrido de maíz DK 72-10. En negrita se destaca los valores modificados respecto a los previamente disponibles.....	112
Cuadro 5.2. Descripción de los coeficientes genéticos.....	112
Cuadro 5.3. Coeficientes genéticos calibrados para los híbridos de sorgo ADV 114, ADV 1200 y VDH 314. En negrita se destaca los valores modificados.....	112
Cuadro 5.4. Descripción de los coeficientes genéticos.....	113
Cuadro 5.5. Coeficientes genéticos calibrados para las variedades de soja NA 5009 y de maní ASEM 400 INTA. En negrita se destaca los valores modificados para cada especie.....	113
Cuadro 5.6. Descripción de los coeficientes genéticos de soja y maní.....	114
Cuadro 5.7. Nivel de precisión y sesgo de la predicción de la fenología, expresado en días ($RMSE$) y como porcentaje de la duración del ciclo desde siembra ($rRMSE$ y $rBias$) en todos los experimentos (Exp).....	118
Cuadro 5.8. Nivel de precisión y sesgo en la predicción de la biomasa aérea total en floración (R1 maíz y E6 sorgo), fin del período crítico-inicio del llenado de grano (R5 soja y maní) y madurez fisiológica (MF), expresada en $g\ m^{-2}$ ($RMSE$) y como porcentaje de la media observada ($rRMSE$ y $rBias$) en todos los experimentos (Exp).....	120
Cuadro 5.9. Nivel de precisión de cada modelo ($RMSE$, $rRMSE$ y $rBias$) para el rendimiento en grano (RG) y el número (NG) y peso (PG) de los granos en todos los experimentos (Exp).....	123

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.1.** Ubicación de la zona de estudio de esta tesis en relación a (A) las provincias biogeográficas de Argentina, (B) las temperaturas medias máximas del mes de enero (en °C), y (C) las precipitaciones medias anuales (en mm). Los datos de (B) y (C) corresponden al servicio meteorológico nacional (SMN) para el período 1981-2010. Cada punto amarillo representa la ubicación de un sitio experimental: Villa Mercedes (VM), Manfredi (MFD) y Pergamino (PGO).....22
- Figura 1.2.** Evolución del rendimiento en grano de cuatro especies en la provincia de San Luis. En cada caso, los valores de b y r^2 corresponden a los ajustes lineales para todo el conjunto de datos abarcados por las líneas punteadas. En azul y rojo se distinguen los valores correspondientes a las fases *El Niño* y *La Niña*, respectivamente, del fenómeno *El Niño Oscilación del Sur*. *** indican significativo para $P < 0.001$24
- Figura 2.1.** Condiciones ambientales de la campaña 1 de los sitios de estudio de Villa Mercedes (VM), Manfredi (MFD) y Pergamino (PGO) representativos de las regiones Semiárida Central (RSC), Sub-Húmeda (RSH) y Pampeana Húmeda (RPH), respectivamente..... 45
- Figura 2.2.** Condiciones ambientales de la campaña 2 en las regiones indicadas en Fig. 2.146
- Figura 2.3.** Contenido de agua útil en el suelo hasta 2 m de profundidad a la siembra (S) y madurez fisiológica (MF), expresado en porcentaje (% AU) para cada campaña (Camp) y región (RSC, RSH y RPH) como en Fig. 2.1). Barras lisas para FS1 y rayadas para FS2. Los colores distinguen maíz (anaranjado), maní (azul), soja (rojo) y sorgo (verde).....48
- Figura 2.4.** Evolución de la lámina de agua en el suelo (mm) hasta 2m de profundidad desde la siembra de la primera fecha de siembra en cada campaña (Camp) y ambiente (RSC, RSH y RPH) como en Fig. 2.1). En la parte media de cada figura se representa el contenido de humedad del suelo para cada cultivo para FS1 (líneas continuas) o FS2 (líneas punteadas). La coloración de las líneas representa a cada cultivo como en la Fig. 2.3. En líneas horizontales punteadas negras se indican los valores de lámina correspondientes a capacidad de campo (superior), 50% agua útil (media) y punto de marchitez permanente (inferior). Las líneas verticales representan +/- un error estándar de la media.....49
- Figura 3.1.** Ubicación de la ventana reproductiva (vent) que abarca los periodos críticos y el llenado activo de los granos (pc+II). Las líneas horizontales gruesas representan la ubicación del ciclo entre la siembra (S) y la madurez fisiológica (MF) de cada especie tomando como referencia los días desde la primera fecha de siembra (FS) en cada campaña (Camp) y ambiente (como en Fig. 2.1). La coloración de las líneas representa a cada cultivo: maíz (anaranjado), maní (azul), soja (rojo) y sorgo (verde). El número 1 es para la FS1 y el 2 para la FS2. En líneas cortadas está representada la ventana reproductiva (vent) de cada especie en cada campaña.....55
- Figura 3.2.** Índice de aridez ($1 - P_p ET_0^{-1}$) en la ventana reproductiva (IAvent), promedio de las cuatro especies para cada ambiente evaluado. Ambientes ordenados por valores crecientes del índice. Camp: campaña; FS: fecha de siembra. Abreviatura de las regiones (RPH, RSH y RSC) como en Fig. 2.1.....57
- Figura 3.3.** Biplot para los dos primeros componentes principales (CP) correspondientes al análisis del rendimiento en grano (RG) y sus determinantes fisiológicos durante la ventana reproductiva para cultivos de maíz, sorgo, soja y maní creciendo en tres ambientes (RSC: círculos rojos, RSH: círculos amarillos y RPH: círculos azules), durante dos campañas (primer número cercano a cada símbolo) y

dos fechas de siembra (segundo número cercano a cada símbolo). Los vectores corresponden a las variables RG, biomasa aérea total (BT), índice de cosecha (IC), índice de aridez (IA), déficit de presión de vapor (DPV), oferta hídrica (OH, como suma de las precipitaciones, el riego y el agua útil del suelo), horas con temperatura $>35^{\circ}\text{C}$ (hs >35), temperatura media (Tmed), duración de la ventana reproductiva (D), radiación incidente (Rinc) y fotosintéticamente activa interceptada (RFAint) acumulada, evapotranspiración potencial (ETo) y evapotranspiración del cultivo (ETc). En las figuras se omitió el subíndice vent para facilitar la visualización.....62

Figura 3.4. Respuesta del rendimiento en grano relativo (RGr) a (A) el índice de aridez (IAvent), (B) el déficit de presión de vapor (DPVvent) y (C) la oferta hídrica (OHvent) durante la ventana reproductiva. La coloración de los símbolos y líneas representa a cada cultivo: maíz (anaranjado), sorgo (verde), soja (rojo) y maní (azul). Los símbolos representan los ambientes (RSC: círculo, RSH: cuadrado, RPH: triángulo), llenos para la siembra temprana y vacíos para la tardía. Las líneas de colores representan los modelos lineares ajustados a cada cultivo y descritos en las tablas acompañantes incluyendo las diferencias entre dichos modelos. Para maní, el punto entre paréntesis no fue considerado en los ajustes por considerarse un fuera de tipo (*outlier*) provocado por temperaturas subóptimas+excesos hídricos para el llenado del grano en la RPH (n= 11). *, **, *** indican significativo para $P \leq 0.05$, 0.01 y 0.001, respectivamente.....65

Figura 3.5. Biplot para los dos primeros componentes principales (CP) correspondientes al análisis de la determinación del número de granos (NG) y su relación con el RG para cultivos de maíz, sorgo, soja y maní creciendo en tres ambientes, durante dos campañas y dos fechas de siembra. Los vectores corresponden a las variables NG, RG, temperatura media (Tmed), radiación incidente (Rinc) y fotosintéticamente activa interceptada (RFAint), evapotranspiración potencial (ETo), horas con temperatura mayor a 35°C (hs >35), déficit de presión de vapor (DPV), índice de aridez (IA), tasa de crecimiento del cultivo (TCC), evapotranspiración del cultivo (ETc) y oferta hídrica (OH), todas evaluadas para el período crítico (en las figuras se omitió el subíndice pc para facilitar la visualización). Símbolos como en la Figura 3.3.....68

Figura 3.6. Respuesta de (A) el rendimiento en granos relativo (RGr) al número de granos relativo (NGr), (B) el NGr a la tasa de crecimiento del cultivo relativa durante el período crítico (TCCr-pc), y (C) el NGr al DPV durante el período crítico (DPVpc). Símbolos y líneas como en Fig. 3.4. La línea punteada en (A) y (B) representa la relación 1:1. *, **, *** indican significativo para $P \leq 0.05$, 0.01 y 0.001, respectivamente.....70

Figura 3.7. Biplot para los dos primeros componentes principales (CP) correspondientes al análisis de la determinación del peso individual del grano (PG) y su relación con el RG para cultivos maíz, sorgo, soja y maní creciendo en tres ambientes, durante dos campañas y dos fechas de siembra. Los vectores corresponden a las variables PG, RG, temperatura media (Tmed), radiación incidente (Rinc) y fotosintéticamente activa interceptada (RFAint), evapotranspiración potencial (ETo), horas con temperatura mayor a 35°C (hs >35), déficit de presión de vapor (DPV), índice de aridez (IA), duración del llenado (D), tasa de crecimiento del cultivo (TCC), evapotranspiración del cultivo (ETc) y oferta hídrica (OH), todas evaluadas durante el llenado de los granos (en las figuras se omitió el subíndice ll para facilitar la visualización). Símbolos como en la Figura 3.3.....72

Figura 3.8. Respuesta de (A) el rendimiento en grano relativo (RGr) al peso individual del grano relativo (PGr), (B) del PGr a la TCCr relativa durante el llenado de los granos (TCCr-ll), (C) del PGr a la OH durante el llenado de los granos (OHll) y (D) del PGr al DPV durante el llenado de los granos (DPVll). Símbolos y líneas como en Fig. 3.4. La línea punteada en (A) y (B) representa la relación 1:1. *, **, *** indican significativo para $P \leq 0.05$, 0.01 y 0.001, respectivamente.....74

Figura 4.1. Duración de las etapas vegetativa (pre-triángulo invertido) y reproductiva (post-triángulo invertido) de cada especie en función de los días desde la siembra (S_n) de la primera fecha de siembra (FS1) y hasta la madurez fisiológica (MF_n). El triángulo invertido indica la ocurrencia de R1 en maíz (naranja), E6 en sorgo (verde) y R3 en soja y maní (rojo y azul, respectivamente). Abreviaturas como en Fig. 3.1.....85

Figura 4.2. Biplot para los dos primeros componentes principales (CP_n) correspondientes al análisis de la eficiencia en el uso de la radiación y del agua durante todo el ciclo (EUR y EUA, respectivamente) para cultivos de maíz, sorgo, soja y maní creciendo en tres ambientes (RSC: círculos rojos, RSH: círculos amarillos y RPH: círculos azules), durante dos campañas (primer número cercano a cada símbolo) y dos fechas de siembra (segundo número cercano a cada símbolo). Los vectores corresponden a las variables EUR, EUA, biomasa aérea total (BT), índice de aridez (IA), déficit de presión de vapor (DPV), oferta hídrica (OH), horas con temperatura >35°C (hs>35), temperatura media (Tmed), duración del ciclo (D), radiación incidente (Rinc) y fotosintéticamente activa interceptada (RFAint) acumuladas, evapotranspiración potencial (ET_o) y evapotranspiración del cultivo (ET_c), todas correspondientes al ciclo entre emergencia y madurez fisiológica de cada especie (en las figuras se omitió el subíndice c para facilitar la visualización).....90

Figura 4.3. Respuesta de la EUR_{r-c} a (A) la OH_c y (B) el DPV_c. La letra 'c' denota el ciclo completo. La coloración de los símbolos y líneas representa a cada cultivo: maíz (anaranjado), sorgo (verde), soja (rojo) y maní (azul). Los símbolos representan los ambientes (RSC: círculo, RSH: cuadrado, RPH: triángulo), llenos para la siembra temprana y vacíos para la tardía. Las líneas de colores representan los modelos lineares ajustados a cada cultivo y descritos en las tablas acompañantes incluyendo las diferencias entre dichos modelos. *, **, *** indican significativo para $P \leq 0.05$, 0.01 y 0.001, respectivamente.....92

Figura 4.4. Respuesta de la eficiencia en el uso del agua relativa (EUAr-c) a (A) la OH_c y (B) el DPV_c. Símbolos y líneas como en Fig. 4.3. *, **, *** indican significativo para $P \leq 0.05$, 0.01 y 0.001, respectivamente.....93

Figura 4.5. Biplot para los dos primeros componentes principales (CP) correspondientes al análisis de la determinación de la eficiencia en el uso de la radiación y del agua durante la etapa vegetativa (EUR y EUA, respectivamente) y su relación con la BT de la etapa para cultivos de maíz, sorgo, soja y maní creciendo en tres ambientes, durante dos campañas y dos fechas de siembra. Los vectores corresponden a las variables EUR_{veg}, EUA, BT, temperatura media (Tmed), radiación incidente (Rinc) y fotosintéticamente activa interceptada (RFAint), evapotranspiración (ET_o), horas con temperatura mayor a 35°C (hs>35), déficit de presión de vapor (DPV), índice de aridez (IA), duración de la ventana vegetativa (D), evapotranspiración del cultivo (ET_c), oferta hídrica (OH), todas evaluadas desde la emergencia hasta floración (para maíz y sorgo) y comienzo de formación de vainas y cajas (para soja y maní, respectivamente). Símbolos como en la Figura 4.2. (se omitió el subíndice veg para facilitar la visualización).....95

Figura 4.6. Respuesta durante la etapa vegetativa de la eficiencia en el uso de la radiación relativa (EUR_{r-veg}) a la oferta hídrica (OH_{veg}). Símbolos y líneas como en Fig. 4.3. *, **, *** indican significativo para $P \leq 0.05$, 0.01 y 0.001, respectivamente.....97

Figura 4.7. Respuesta durante la etapa vegetativa de la eficiencia en el uso del agua relativa (EUAr-veg) al DPV_{veg}. Símbolos y líneas como en Fig. 4.3. *, **, *** indican significativo para $P \leq 0.05$, 0.01 y 0.001, respectivamente.....97

Figura 4.8. Biplot para los dos primeros componentes principales (CP) correspondientes al análisis de la determinación de la eficiencia en el uso de la radiación y del agua (EUR y EUA, respectivamente) durante la etapa reproductiva y su relación con la BT durante dicha etapa para cultivos maíz, sorgo, soja y maní creciendo en tres ambientes, durante dos campañas y dos fechas de siembra. Los vectores corresponden a las variables EUR, EUA, BT, temperatura media (Tmed), radiación incidente (Rinc) y fotosintéticamente activa interceptada (RFAint), evapotranspiración (ETo), horas con temperatura mayor a 35°C (hs>35), déficit de presión de vapor (DPV), índice de aridez (IA), duración de la ventana reproductiva (D), evapotranspiración del cultivo (ETc) y oferta hídrica (OH), todas evaluadas desde floración (para maíz y sorgo) y comienzo de formación de vainas y cajas (para soja y maní, respectivamente) hasta madurez fisiológica. Símbolos como en la Figura 4.2 (se omitió el subíndice rep para facilitar la visualización).....98

Figura 4.9. Respuesta durante la etapa reproductiva de la eficiencia en el uso de la radiación relativa (EURr-rep) a (A) la OHrep y (B) el DPVrep. Símbolos y líneas como en Fig. 4.3. *, **, *** indican significativo para $P \leq 0.05$, 0.01 y 0.001, respectivamente.....100

Figura 4.10. Relación durante la etapa reproductiva entre la eficiencia en el uso del agua relativa (EUAr-rep) y la eficiencia en el uso de la radiación relativa (EURr-rep). Símbolos y líneas como en Fig. 4.3. *, **, *** indican significativo para $P \leq 0.05$, 0.01 y 0.001, respectivamente.....101

Figura 5.1. Eventos fenológicos de emergencia (rojo), floración (anaranjado), formación de vainas (verde), formación de granos (azul) y madurez fisiológica (violeta) expresados en días julianos para soja, maní, maíz y sorgo para los 12 ambientes evaluados. Símbolos cerrados corresponden a la primera fecha de siembra y abiertos a la segunda. La línea cortada central corresponde a la relación 1:1 y las punteadas contiguas a ella corresponden a ± 3 y 7 días julianos. RSC: Región Semiárida Central; RSH: Región Sub-Húmeda; RPH: Región Pampeana Húmeda. FS1: siembra temprana; FS2: siembra tardía.....118

Figura 5.2. Biomasa aérea total (BT) para (i) inicio de llenado de granos en las legumbres y floración en los cereales (en anaranjado), y (ii) madurez fisiológica para las cuatro especies (en violeta). Los datos corresponden a los 12 ambientes evaluados. La línea cortada central corresponde a la relación 1:1 y las punteadas adyacentes corresponden a $\pm 15\%$. Abreviaturas de regiones y fechas de siembra como en Figura 5.1.....119

Figura 5.3. Rendimiento, número y peso de los granos observados y simulados para maíz y sorgo en los 12 ambientes evaluados. Los círculos, cuadrados y triángulos representan a la RSC, RSH y RPH, respectivamente. Los símbolos llenos corresponden a la fecha de siembra temprana y los vacíos a la fecha de siembra tardía. La línea cortada central corresponde a la relación 1:1 y las punteadas adyacentes corresponden a $\pm 15\%$121

Figura 5.4. Rendimiento, número y peso de los granos observados y simulados para soja y maní en los 12 ambientes evaluados. Los círculos, cuadrados y triángulos representan a la RSC, RSH y RPH, respectivamente. Los símbolos llenos corresponden a la fecha de siembra temprana y los vacíos a la fecha de siembra tardía. La línea cortada central corresponde a la relación 1:1 y las punteadas adyacentes corresponden a $\pm 15\%$122

Figura 5.5. Frecuencia acumulada del rendimiento simulado de cuatro especies para un período de 50 años (1971–2021) en cada ambiente explorado. Los círculos destacan la ubicación de los rendimientos simulados para las campañas experimentales. Abreviaturas de regiones y fechas de siembra como en Figura 5.1.....124

Figura 5.6. Frecuencia acumulada del contenido de agua útil simulado al 10 de octubre durante un período de 50 años (1971–2021) para las series de suelo Buena Esperanza (rojo), Cramer (verde) y Granville (azul) de la Región Semiárida Central. Las flechas corresponden a la ubicación del 35 (flechas vacías), 65 (flechas claras) y 100% (flechas oscuras) de agua útil para cada serie de suelo.....126

Figura 5.7. Contenido volumétrico de agua del suelo al 10 de octubre en función de la profundidad (en cm) para las series de suelo Buena Esperanza, Cramer y Granville según la recarga de humedad baja (anaranjada), intermedia (verde) y alta (azul) a partir de la serie histórica de datos climáticos (1971-2021). Las líneas continuas representan el punto de marchitez permanente (negra) y capacidad de campo (azul). La línea discontinua negra representa el 50% de agua útil. Las tablas ubicadas a la derecha de cada figura ilustran el contenido de humedad volumétrica por estrato de suelo y el contenido total de agua útil (AU) expresado en milímetros (mm).....127

Figura 5.8. Frecuencia acumulada del rendimiento simulado de maíz para una serie histórica de 50 años (1971–2021) en la Región Semiárida Central, considerando los escenarios de recarga hídrica baja (mS-columna izquierda), intermedia (mH-columna intermedia) y alta (Hu-columna derecha) y las series de suelo Buena Esperanza (BE-fila superior), Cramer (CR-fila intermedia) y Granville (GR-fila inferior). Las líneas continuas representan a las fechas de siembra de 10 de octubre (azul), 20 de noviembre (verde) y 5 de diciembre (rojo).129

Figura 5.9. Frecuencia acumulada del rendimiento simulado de soja para una serie histórica de 50 años (1971–2021) en la Región Semiárida Central, considerando los escenarios de recarga hídrica baja (mS-columna izquierda), intermedia (mH-columna intermedia) y alta (Hu-columna derecha) y las series de suelo Buena Esperanza (BE-fila superior), Cramer (CR-fila intermedia) y Granville (GR-fila inferior). Las líneas continuas representan a las fechas de siembra de 20 de octubre (azul), 5 y 25 de noviembre (verde y rojo, respectivamente).....130

Figura 5.10. Frecuencia acumulada del rendimiento simulado de maíz y sorgo (A, C y E) y de soja y maní (B, D y F) para una serie histórica de 50 años (1971–2021) considerando una fecha de siembra intermedia y los escenarios de suelo Buena Esperanza (BE-A y B), Cramer (CR-C y D) y Granville (GR-E y F). Soja, maní, maíz y sorgo se representan por los colores rojo, azul, anaranjado y verde, respectivamente. Las líneas representan los escenarios de recarga hídrica baja (35%- punteada), intermedia (65%- cortada) y alta (100%-continua).....131

Fig. 5.11. Comparación entre (i) los rendimientos de fechas de siembra contrastantes de maíz (A) y soja (B), y (ii) los rendimientos de maíz vs sorgo (C) y soja vs maní (D). Los datos corresponden a los valores simulados para cada año de una serie histórica (1971-2021), considerando la serie de suelo Cramer (CR) y el escenario hídrico con 100% de humedad al 10 de octubre. La línea punteada representa la línea 1:1. Los colores de los puntos distinguen las diferentes fases del fenómeno *El Niño Oscilación del Sur*.....134

ABREVIATURAS

ACP	Análisis de componentes principales
AU	Agua útil
BE	Serie de suelo Buena Esperanza
BT	Biomasa total aérea
c	Subíndice indicador de ciclo
C.V.	Coefficiente de variación
Camp	Campaña
CP	Componente principal
CR	Serie de suelo Cramer
D.E.	Desvío estándar
Dn	Duración etapa 'n'
DPV	Déficit de presión de vapor
DSSAT	Decision Support System for Agrotechnology Transfer
ei	Eficiencia de intercepción de la radiación solar
ENOS	<i>El Niño Oscilación del Sur</i>
ETc	Evapotranspiración del cultivo
ETo	Evapotranspiración potencial
EUA	Eficiencia en el uso del agua
EUR	Eficiencia en el uso de la radiación
fRFAint	Fración de la radiación fotosintéticamente activa interceptada
FS	Fecha de siembra
GM	Grupo de madurez
GR	Serie de suelo Granville
Hu	Húmedo
h>35	Horas con temperaturas supraóptimas (> 35°C)
IA	Índice de Aridez
IAF	Índice de área foliar
IC	Índice de cosecha
II	Subíndice indicador de llenado de los granos
MF	Madurez fisiológica
MFD	Manfredi
mH	Moderadamente húmedo
MR	Madurez relativa
mS	Moderadamente seco
MSAA	Modelos de simulación de aplicación agronómica
NG	Número de granos por m ²
OH	Oferta hídrica
pc	Período crítico
PG	Peso individual de los granos

PGO	Pergamino
Pp	Precipitaciones
r	Subíndice indicador de relativo
RCP	Trayectorias de concentración representativas
rep	Subíndice indicador de etapa reproductiva
RFA	Radiación fotosintéticamente activa
RFAint	Radiación fotosintéticamente activa interceptada
RG	Rendimiento en grano
Rinc	Radiación global incidente
RPH	Región pampeana húmeda
RSC	Región semiárida central
RSH	Región sub-húmeda
S	siembra
TCC	Tasa de crecimiento del cultivo
T-med	Temperatura media
VA	Valor absoluto
veg	Subíndice indicador de etapa vegetativa
vent	Subíndice indicador de ventana reproductiva
VM	Villa Mercedes
VR	Valor relativizado

RESUMEN

El incremento productivo de la Argentina de las últimas décadas respondió fuertemente al aumento en la superficie cultivada de soja y maíz, desde las regiones Pampeana Húmeda (RPH) y Sub-Húmeda (RSH) hacia la Región Semiárida Central (RSC). En la RSC, tanto modificaciones del manejo, como la fecha de siembra, como la sustitución de especies por otras más adaptadas a condiciones de sequías y temperaturas supraóptimas, como sorgo y maní, podrían convertirse en alternativas viables para aumentar la producción. El objetivo general de esta tesis fue comparar ecofisiológicamente la determinación del rendimiento de cuatro cultivos de verano (Maíz, Soja, Sorgo y Maní) en una transecta edafoclimática, ubicada a similar latitud desde la región Pampeana Húmeda a la Región Semiárida Central, y en esta última, donde constituyen las principales alternativas agrícolas, comparar la distribución esperable de sus rendimientos bajo la variabilidad interanual del clima y la variabilidad de suelos en la región. Se utilizó un dispositivo experimental generado por dos campañas (Camp1:2016-2017; Camp2:2017-2018), tres sitios (uno por región) y dos fechas de siembra (FS1:fin de octubre; FS2:principio de diciembre). Adicionalmente dicho dispositivo se utilizó para calibrar y validar modelos de simulación. Durante la ventana reproductiva el rendimiento en grano relativo (RGr) de todos los cultivos respondió al índice de aridez (IA), pero el maní y el sorgo resultaron las especies más y menos sensible, respectivamente ($0.95 > 0.56 > 0.48 > 0.44$ RGr IA⁻¹, para maní, maíz, soja y sorgo, respectivamente). El RG estuvo fuertemente determinado por la biomasa total aérea (BT; r de $0.95 > 0.9 > 0.89 > 0.82$ para maíz, sorgo, maní y soja, respectivamente), mientras que el índice de cosecha fue importante sólo en maní ($r=0.94$). En cuanto a los componentes numéricos del RG, se verificó una respuesta robusta al número de granos (NG; $1.14 \approx 1.13 > 0.93 > 0.90$ RGr NGr⁻¹, para soja, maíz, maní y sorgo, respectivamente) pero no al peso de los granos (PG), que sólo fue estrecha para

soja y maíz (1.66 y 1.45 RGr PGr⁻¹, respectivamente). Durante el ciclo, la BT tuvo mayor respuesta al incremento de la eficiencia en el uso de la radiación y del agua que a la captura de luz y de agua en todas las especies. En base a los resultados obtenidos por modelización para la RSC, se comprobó que una menor capacidad de retención de humedad de los suelos y una baja recarga primaveral reducen el RG y aumentan el riesgo esperable en los cuatro cultivos. Para reducir el riesgo de maíz y de soja la mejor estrategia fue combinar fechas de siembra respecto a la alternativa de las especies de ambiente semiárido. El fenómeno climático *El Niño Oscilación del Sur* tuvo un papel destacado para decidir entre fechas de siembra, pero más para soja que para maíz. La integración del estudio comparativo de la ecofisiología y de modelos de simulación muestran oportunidades para el diseño de estrategias de producción que contribuyan a la mejora de los rendimientos a nivel nacional.

Palabras Claves: *Glycine max*, *Zea mays*, *Sorghum bicolor*, *Arachis hypogaea*, componentes numéricos del rendimiento, determinantes fisiológicos del rendimiento, eficiencia en el uso del agua, eficiencia en el uso de la radiación, modelos de simulación

ABSTRACT

The recent increase in Argentina's productivity can be attributed to the expansion of the cultivated areas for soybean and maize from the Humid Pampas Regions (RPH) and Sub-Humid Region (RSH) to the Central Semiarid Region (RSC). In the RSC, both management modifications, such as sowing date, and the substitution of species more adapted to drought and supraoptimal temperature conditions, such as sorghum and peanuts, could become viable alternatives for sustainable production increase. In this context, the objective of this thesis was to compare the ecophysiological determination of yield of four summer crops (Maize, Soybean, Sorghum and Peanut) along an edaphoclimatic transect, located at a similar latitude from RPH to RSC and estimate for the latter, where they represent the primary agricultural alternatives, the expected yield distribution under interannual climate variability and soil variability in the region. An experimental design was used generated from two cropping seasons (Season 1: 2016-2017; Season 2: 2017-2018), three sites (one per region) and two sowing dates (SD1:end of October, SD2:beginning of December). Additionally, this device was used to calibrate and validate simulation models. During the reproductive window, the relative grain yield (rGY) of all crops reacted to the aridity index (AI), with peanuts and sorghum being the most and least sensitive species, respectively ($0.95 > 0.56 > 0.48 > 0.44$ rGY AI⁻¹, for peanuts, maize, soybeans, and sorghum, respectively). The GY was strongly determined by total shoot biomass (BT; r of $0.95 > 0.9 > 0.89 > 0.82$, for maize, sorghum, peanuts and soybeans, respectively), while the harvest index played an important role in peanuts ($r=0.94$). Regarding the numerical components of GY, it was found that there was a robust response to grain number (GN; $1.14 \approx 1.13 > 0.93 > 0.90$ GYr GNr⁻¹, for soybean, maize, peanut and sorghum, respectively), but not to grain weight (GW), which was only significant for soybean and maize (1.66 and 1.45 GYr GWr⁻¹, respectively). During the crop cycle, BT responded

more to increased radiation use efficiency and water use efficiency than to light interception and water consumption for all crops. Based on the modeling results obtained for the RSC, it is believed that lower soil moisture retention capacity and lower spring recharge contribute to reduced GY and increase the expected risk in all the crops. To reduce the risk for maize and soybean in the region, the best strategy was to combine sowing dates compared to the alternative of using semi-arid environment species. The *El Niño Southern Oscillation* climate phenomenon played a significant role in determining sowing dates particularly for soybean rather than maize. The integration of comparative ecophysiology studies and simulation models presents opportunities for designing better production strategies that contribute to sustaining yield improvements at a national level.

Key words: *Glycine max*, *Zea mays*, *Sorghum bicolor*, *Arachis hypogaea*, yield numerical components, yield physiological determinants, water use efficiency, radiation use efficiency, simulation models

INTRODUCCIÓN GENERAL

1. Planteo del problema y revisión de antecedentes

1.1 El desafío de aumentar los rendimientos en la Región Semiárida Central

La economía y seguridad alimentaria de muchos países del mundo se sustenta en la producción de cultivos extensivos. Argentina es hoy uno de los principales productores y exportadores de granos del mundo (FAO 2019), dado que su producción se quintuplicó (23.2 a 121.1 M Tn) entre las cosechas de los quinquenios 1970-1974 y 2014-2018 (SAGyP 2023). Este cambio fue producto de aumentos en los rendimientos de los principales cultivos y de la expansión del área agrícola (Bisang 2003; Paruelo et al. 2005; Viglizzo y Jobbágy 2010). Los rendimientos de soja (*Glycine max* L.) y trigo (*Triticum aestivum* L.) se duplicaron (1395 a 2890 y 1439 a 2964 kg ha⁻¹, respectivamente), mientras que los de maíz (*Zea mays* L.) se triplicaron (2439 a 7050 kg ha⁻¹). Paralelamente, el área agrícola aumentó a más del doble (13.6 a 33.2 M ha) al tiempo que aumentaba la proporción de soja y maíz, llevando a lo que se denominó la *estivalización* de los sistemas de producción (Viglizzo 2007). La superficie sembrada con soja, prácticamente nula en la década de 1970, cubre hoy la mitad del área sembrada (53%), y un cuarto del aumento de área se explica por el surgimiento del doble cultivo trigo/soja.

La mayor parte de esta expansión agrícola en Argentina en este último medio siglo fue a expensas de superficie ocupada por pasturas perennes (Viglizzo 2007) y el reemplazo de pastizales y bosques en áreas consideradas marginales (Pengue y Morello 2007; Viglizzo y Jobbágy 2010). Una de esas áreas, la región semiárida central (RSC, representada por Villa Mercedes; Fig. 1.1), registró un aumento de casi tres veces del área sembrada ($\times 2.8$), superando ampliamente al de las regiones sub-húmeda (RSH, representada por Manfredi) y Pampeana Húmeda (RPH, representada por Pergamino), que sólo se duplicaron ($\times 2.1$ y $\times 1.9$, respectivamente). Esta reciente expansión permite especular que

en los sistemas de producción más difundidos existen aún oportunidades para mejorar el ajuste de los mismos a los desafíos agroclimáticos complejos que caracterizan a la RSC.

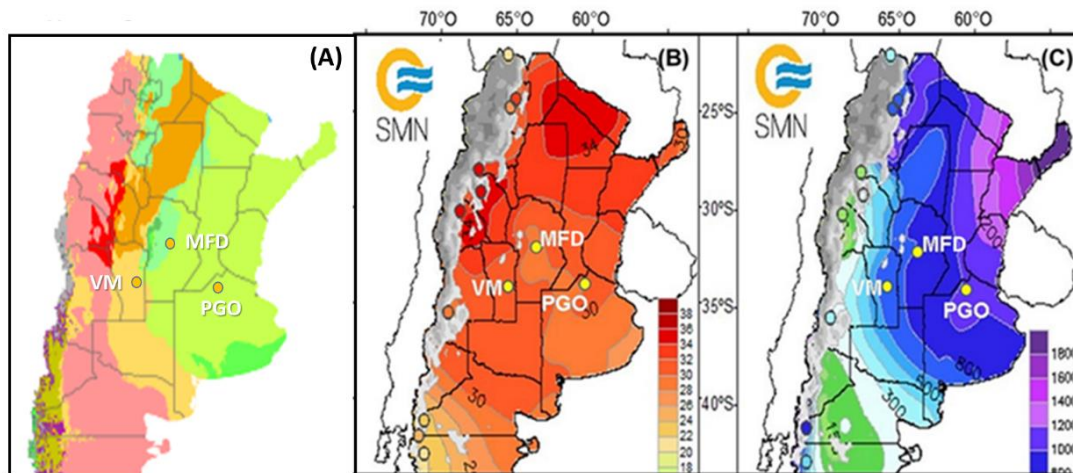


Figura 1.1. Ubicación de la zona de estudio de esta tesis en relación a (A) la clasificación climática de Argentina de Köppen-Geiger, (B) las temperaturas medias máximas del mes de enero (en °C) y (C) las precipitaciones medias anuales (en mm). Los datos de (A) corresponden a la clasificación climática de Köppen-Geiger para 1980-2016 y los de (B) y (C) corresponden al servicio meteorológico nacional (SMN) para el período 1981-2010. Cada punto amarillo representa la ubicación de un sitio experimental: Villa Mercedes (VM), Manfredi (MFD) y Pergamino (PGO).

En la RSC convergen estreses hídricos y térmicos frecuentes (Rattalino Edreira et al. 2011a; Maddonni 2012). Las lluvias, que ocurren mayormente en verano, son inferiores a las de la RSH y RPH (Fig. 1.1.C) e inferiores, en promedio, a la evapotranspiración potencial de un cultivo estival, generando sequías frecuentes que limitan el rendimiento (Sadras et al. 1989; Giménez et al. 2015). La RSC, además, es la zona más continental del área agrícola argentina, por lo que el período sin ocurrencia de heladas es menor al de la RSH y RPH (Long et al. 2005) y, a la vez, es mayor la frecuencia de temperaturas supraóptimas en la estación de crecimiento (Fig. 1.1.B; Maddonni 2012). Hay pocos cultivos para grano de invierno, debido a que el valor elevado del índice crikindinoscópico (Burgos 1963) lleva a ubicar tarde la floración y el llenado de granos, con temperaturas altas que restringen los rendimientos y un retraso en la cosecha que reduce la factibilidad y/o el rendimiento de cultivos de verano de ‘segunda’ (i.e. sembrados inmediatamente

después de cosechar un cultivo invernal). Los cultivos de verano de ‘primera’ (i.e. sembrados como único cultivo en primavera) dominan los sistemas de producción. La soja y el maíz solos explican el 82% del área sembrada en la región. Las heladas tardías y el inicio tardío de la estación de las lluvias impiden las siembras muy tempranas que, además, están expuestas a la ocurrencia de reducciones del rendimiento por sequías y temperaturas supraóptimas (Maddonni 2012).

Las siembras demoradas de soja y maíz son las estrategias de cultivo de verano más difundidas en la RSC. Demorar las siembras favorece una mejor recarga del perfil y reduce la demanda ambiental en etapas críticas en la RPH (Maddonni 2012; Mercau y Otegui 2014; Gambin et al. 2016); sin embargo, los resultados esperables de cambios en la época de siembra de estas especies no han sido sistémicamente evaluados en la RSC. Tampoco se ha analizado de ese modo la inclusión de cultivos de ambientes semiáridos considerados de mejor adaptación frente a sequías y muy altas temperaturas, como el maní (*Arachis hypogaea* L.) y el sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) (Muchow 1985, 1989). Ambos cultivos tienen inserción en las cadenas de valor de la RSC. El primero, del cual Argentina es tercer exportador mundial, está asociado a una potente industria (BCCBA 2019; CAM 2019) y el segundo a los muy desarrollados sistemas ganaderos de cría y engorde a corral (Cattani et al. 2008; Carrasco et al. 2011) como alternativa al grano o silo de planta entera de maíz. Para las cuatro especies se ha registrado un aumento sostenido del rendimiento para la provincia de San Luis (Fig. 1.2.), aunque las diferencias en ganancia global entre ellas (2.4, 1.3, 2.3 y 2.9 % anual para maíz, soja, sorgo, y maní, respectivamente; Fig. 1.2) no pueden tomarse como criterio comparativo pues el área asignada a cada una en San Luis es muy diferente (440100 ha de maíz, 218200 ha de soja, 24350 ha de sorgo y 19685 ha de maní para 2021/2022; SAGyP 2023). Debido a estas asimetrías, una comparación robusta de las cuatro especies hace necesaria una evaluación

ecofisiológica simultánea a campo, tanto en siembras tempranas como tardías, y, además, una evaluación probabilística de su impacto en los sistemas de producción en la RSC.

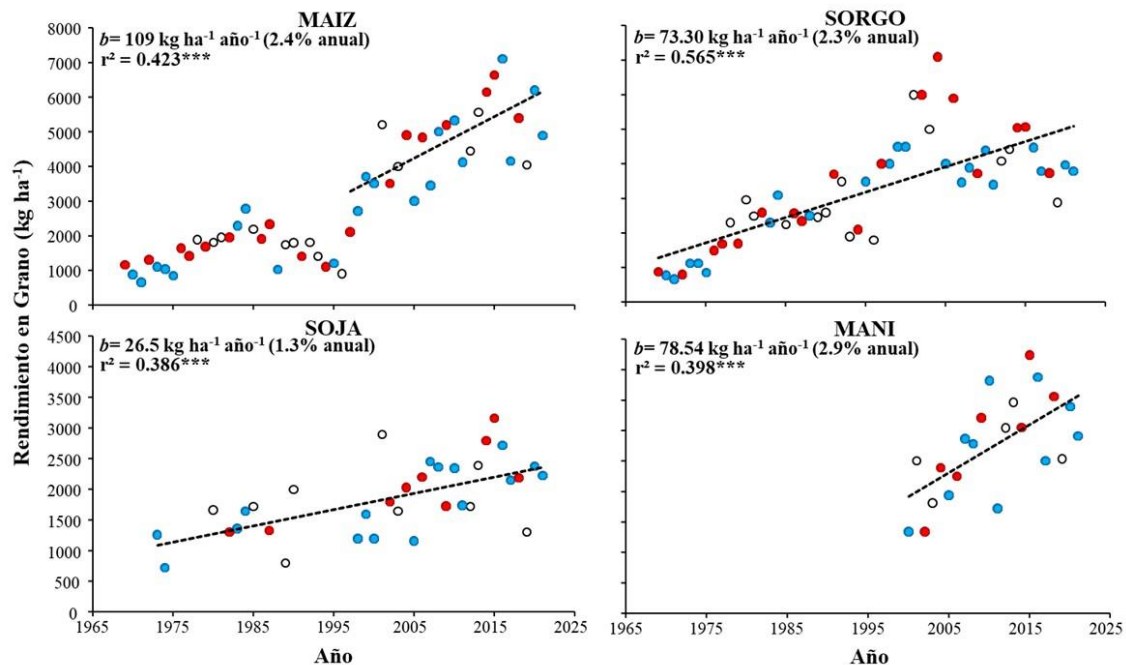


Figura 1.2. Evolución del rendimiento en grano de cuatro especies en la provincia de San Luis. En cada caso, los valores de b y r^2 corresponden a los ajustes lineales para todo el conjunto de datos abarcados por las líneas punteadas. En azul y rojo se distinguen los valores correspondientes a las fases *El Niño* y *La Niña*, respectivamente, del fenómeno *El Niño Oscilación del Sur*. *** indican significativo para $P < 0.001$. Los datos corresponden a la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca (SAGyP).

1.2 Fisiología de la determinación del rendimiento en ambientes proclives a sequía y temperaturas supraóptimas

La utilización de un marco conceptual apropiado para entender la generación del rendimiento en grano (RG) permite analizar el impacto de la elección de la especie y prácticas de manejo como la fecha de siembra sobre diversos rasgos que lo determinan (Reynolds et al. 2006; Salekdeh et al. 2009). Existe un consenso general sobre la importancia de utilizar una aproximación basada en el uso y la partición de recursos (Ecs. 1 y

2) para desagregar el RG en rasgos menores pero relevantes en cuanto a su definición (Lee y Tollenaar 2007).

$$\text{Biomasa total aérea} = \text{Oferta del recurso} \times \text{Captura del recurso} \times \text{Eficiencia aérea en el uso del recurso} \quad (1)$$

$$\text{RG} = \text{Biomasa total aérea} \times \text{Índice de cosecha} \quad (2)$$

En esta aproximación, la producción de biomasa y el índice de cosecha (IC: proporción de la biomasa total aérea particionada a los granos) son los principales rasgos determinantes del rendimiento, que pueden a su vez ser desagregados en componentes menores dentro de un modelo de procesos fisiológicos que ocurren a lo largo del ciclo de un cultivo.

Cuando no existen restricciones bióticas ni abióticas al crecimiento, los cultivos exploran su rendimiento potencial bajo una determinada combinación de genotipo y ambiente (Van Ittersum y Rabbinge 1997). El recurso que define la productividad es la radiación fotosintéticamente activa (RFA). La producción de biomasa, y el rendimiento, dependerán de la oferta de radiación del ambiente, la eficiencia de intercepción de dicho recurso (e_i) por parte del canopy y la eficiencia con la cual la RFA interceptada es transformada en biomasa o eficiencia en el uso de la radiación (EUR: biomasa producida por unidad de RFA interceptada). La oferta de radiación es propia de cada ambiente (combinación de época del año, latitud, nubosidad), modificándose con la época de crecimiento disponible para la especie en cuestión y con la elección de la fecha de siembra (Maddonni 2012). La e_i depende de la arquitectura del canopy, resultante de la combinación de su tamaño y la organización espacial de los órganos aéreos (Holmes 1996). El tamaño del canopy está sintetizado en el índice de área foliar (IAF: superficie de hojas por unidad

de superficie de suelo) y la organización espacial de los órganos aéreos se halla determinada principalmente por el hábito de crecimiento foliar de la especie (i.e. planófilas como soja y maní o erectófilas como maíz y sorgo). En condiciones óptimas de crecimiento, la EUR depende primordialmente del tipo de metabolismo fotosintético (en las especies C4 como maíz y sorgo es superior a las C3 como soja y maní) y se asocia negativamente con el costo de síntesis de la biomasa producida según el orden lípidos > proteínas > hidratos de carbono (Sinclair y Muchow 1999), siendo las gramíneas ricas en hidratos de carbono y pobres en lípidos y proteínas respecto a las leguminosas.

La fecha de siembra cambia el rendimiento potencial al modificar las condiciones foto-termales a las que son expuestos los cultivos, modificando así las tasas de crecimiento y desarrollo (Connor et al. 2011) especialmente en las etapas críticas de definición del rendimiento. En las regiones templadas, el atraso en la siembra generalmente expone a los cultivos de verano a niveles de radiación, temperatura y fotoperíodos más altos en las etapas vegetativas y más bajos en el llenado de granos. En maíz las temperaturas frescas en etapas reproductivas aumentan la duración de las mismas y atenúan la caída de rendimiento potencial por la menor radiación incidente. Un comentario similar se aplica a los cultivos de sorgo y maní. Aunque ambos responden al fotoperiodo acelerando su desarrollo con los días cortos (Bagnall y King 1991; Rooney y Aydin 1999), su rendimiento potencial es más alto en siembras tempranas por el efecto compensador de las temperaturas más frescas que provocan un alargamiento del ciclo (Muchow y Carberry 1990; Haro et al. 2007). Distinto es lo que ocurre con el cultivo de soja, en el cual la respuesta al acortamiento del fotoperíodo perdura en las etapas reproductivas y prevalece sobre el de las temperaturas frescas acelerando su ciclo (Kantolic y Slafer 2001). Además, si bien la EUR es estable dentro de un rango amplio de temperaturas, disminuye frente a las temperaturas subóptimas (Sinclair y Muchow 1999) que muchas veces se exploran en

las etapas reproductivas finales de siembras tardías en zonas templadas. Al atrasar la fecha de siembra, estos efectos combinados reducen el rendimiento potencial de soja (Hu y Wiatrak 2012), maní (Haro et al. 2007), sorgo (Pale et al. 2003) y maíz (Otegui et al. 1995). Sin embargo, la magnitud de los cambios en cada especie varía según el ambiente considerado, existiendo muy pocos ejemplos de comparación de fecha de siembra entre especies para el mismo sitio (Pale et al. 2003) y ninguno para las especies de interés de este trabajo.

Bajo condiciones de secano, con un correcto manejo sanitario y nutricional, los cultivos exploran rendimientos sólo limitados por agua, lo que se describe como rendimiento potencial en secano (Passioura 1996; Hatfield et al. 2001). Bajo limitación hídrica, la evapotranspiración del cultivo (ETc) y la eficiencia en el uso del agua (EUA: biomasa producida por unidad de agua evapotranspirada) condicionan la producción de biomasa y el rendimiento cuando se evalúan etapas críticas para su generación. La capacidad de extraer agua y sostener la transpiración (componente productiva de la ETc) varía entre especies (Dardanelli et al. 1997, 2004), aunque no existen trabajos que la hayan comparado simultáneamente en diferentes condiciones edafoclimáticas para todas las especies de interés de la presente tesis. En suelos profundos y sin discontinuidades texturales, se ha documentado que la velocidad de profundización radical de soja es mayor que la de maíz, sorgo y maní (Collino et al. 2000; Dardanelli et al. 2003). En otros estudios, a su vez, se estableció que la exploración en profundidad del perfil de sorgo era mayor que la de maíz (Farré y Faci 2006) y la de maní mayor que la de soja (Devries et al. 1989), pero en ambos casos midiendo hasta apenas 1.2 m de profundidad cuando trabajos locales posteriores demostraron que todas estas especies la superan holgadamente y pueden extraer la mayor parte del agua almacenada en una profundidad aún mayor (Dardanelli et al. 2003, 2004; Haro et al. 2010). También se ha determinado que las tasas de extracción

de agua por las raíces (kl: mm extraídos diariamente por mm disponible a una profundidad dada, en día⁻¹) de maní (0.058 día⁻¹, Dardanelli et al. 1997) y sorgo (0.073 día⁻¹; Robertson et al. 1993) son sensiblemente menores a las de soja y maíz (0.098 día⁻¹ y 0.088 día⁻¹, respectivamente; Dardanelli et al. 1997), haciendo que se pueda alcanzar el mismo consumo de agua en cada horizonte sólo que en un período más largo entre los primeros que entre los segundos. En otras palabras, la información referida a la capacidad de extraer agua del suelo en forma comparada a través de ambientes (i.e. tipos de suelo, oferta hídrica, demanda atmosférica) entre las especies de interés de esta tesis es prácticamente inexistente.

Para un sitio dado, la fecha de siembra también afecta la ETc y la EUA, ya que puede modificar tanto la disponibilidad de agua como la demanda atmosférica a la que se ven expuestos los cultivos. Las siembras más tardías prolongan el barbecho y así generalmente permiten alcanzar mayor acumulación de agua en el suelo a la siembra y al inicio de las etapas críticas (Mendez et al. 2016). A la vez, ubican las etapas reproductivas bajo condiciones de un balance hídrico más favorable (Maddonni 2012; Mercau y Otegui 2014). Esta práctica ha sido ampliamente adoptada en la última década para el cultivo de maíz (Gambin et al. 2016; Rotili et al. 2019), cuya sensibilidad para la fijación de granos en respuesta a un estrés durante la etapa crítica es mayor que la que ocurre en soja, maní y sorgo (Vega et al. 2001; Haro et al. 2007). Adicionalmente, el atraso de la época de siembra en maíz ha permitido moderar los efectos negativos de la fase seca (i.e. *La Niña*) del fenómeno *El Niño Oscilación del Sur* (ENOS; Fig. 1.2.), que para los cultivos de maíz, sorgo y soja han sido documentados como particularmente críticos en la RPH (Podestá et al., 1999). Pese a esta tendencia, en soja se ha registrado una tendencia opuesta a la del maíz, con un adelantamiento de la fecha de siembra (Baigorri et al. 2009; Giménez 2017). Así, los cultivos de soja de primera en la RPH tienen un ciclo que se asemeja cada vez

más al de un maíz de siembra temprana, pues se han ido adoptando grupos de madurez (GM) más cortos (Santachiara et al. 2017) que los recomendados décadas atrás cuando comenzó la difusión del cultivo en Argentina (Remussi y Pascale 1977).

La EUA evapotranspirada para producir biomasa (i) tiende a disminuir con el aumento del déficit de presión de vapor (DPV) en ausencia de déficits hídricos (Abbate et al. 2004), pues se modifica proporcionalmente más la transpiración (aumentándola) que la fijación de CO₂, y (ii) aumenta con un déficit hídrico moderado, pues al disminuir la conductancia estomática se reduce proporcionalmente más la pérdida de agua que la fijación de carbono (Nobel y Jordan 1983; Liu et al. 2005). Como el DPV y el déficit hídrico aumentan en promedio desde la RPH hacia la RSC (Dardanelli et al. 2003) y son mayores en siembras tempranas que en tardías para las etapas reproductivas, la EUA de cada cultivo se modificaría siguiendo el gradiente impuesto por la combinación de ambos índices. La EUA cambia entre las especies por los mismos factores que modifican la EUR, por lo que se espera que las diferencias interespecíficas sean considerables. Un estudio comparativo en maíz y sorgo que evaluó la respuesta de la transpiración en ambientes con alto y bajo DPV detectó estrategias distintas entre ellos, el primero restringió la transpiración en ambientes con altos DPV mientras que el segundo modificó el área foliar (Choudhary et al. 2020). En las cuatro especies existen además diferencias genotípicas en respuesta al DPV aún en ausencia de deficiencias hídricas (Fletcher et al. 2007; Devi et al. 2010, Gholipoor et al. 2010; Yang et al. 2012), pero que no serán atendidas en este estudio.

Otro aspecto a considerar en los ambientes de interés de esta tesis es la incidencia de temperaturas supraóptimas que reducen el rendimiento de los cultivos. Durante etapas reproductivas afectan directamente la viabilidad del polen, la fertilización y la formación de granos (Hatfield et al. 2008, 2011) y son pocas las estrategias de adaptación para hacerles frente (Hatfield y Prueger 2015). Soja y maní tienen un período más prolongado de

floración que maíz y sorgo, y por eso muestran mayor capacidad de *escape* (Connor et al. 2011). El cultivo de sorgo tiene más plasticidad que el maíz porque puede componer parte del rendimiento en base al macollaje y tolera bien las altas temperaturas en lo que a estructuras reproductivas se refiere (Prasad y Staggenborg 2009); pero su principal ventaja es la condición hermafrodita de sus flores, que puede dar lugar a una alta proporción de autogamia respecto al maíz. En cuanto al crecimiento vegetativo, en ausencia de déficit hídrico las temperaturas supraóptimas afectan proporcionalmente más la capacidad fotosintética que la expansión de tejidos, reduciendo la EUR y EUA (Rattalino Edreira y Otegui 2012). Además, estudios recientes demostraron que la respuesta transitoria de la transpiración al aumento del DPV puede verse influenciada por las condiciones del entorno de crecimiento, como las altas temperaturas (Sermons et al. 2012; Yang et al. 2012; Seversike et al. 2013).

En ambientes semiáridos, las sequías se caracterizan por una combinación de déficit hídrico y muy altas temperaturas en forma simultánea (Moffat 2002; Shah y Paulsen 2003; Singh et al. 2014), lo cual intensifica el aumento de temperatura foliar generalmente asociado al cierre estomático y sus consecuencias negativas sobre los tejidos (Rizhsky et al. 2002). El impacto de ambos estreses combinados es poco conocido en los principales cultivos extensivos (Barnabás et al. 2008). En soja provocó una reducción significativa del rendimiento a través de mermas en el número y peso individual de los granos, mientras que sin estrés hídrico las temperaturas supraóptimas solo afectaron el rendimiento por la reducción del número (Ergo et al. 2018). El efecto combinado sobre el crecimiento y rendimiento de maíz y sorgo también fue más pronunciado que cuando ocurrieron de manera individual (Heyne y Brunson 1940; Craufurd y Peacock 1993).

Sobre la base de todos los antecedentes aquí planteados, resulta claro que la información respecto a las ventajas relativas de cada especie frente a la variabilidad ambiental

de diferentes rasgos hace a la respuesta final. Si bien no hay una especie superior para todos los rasgos, sí existe una jerarquía diferencial de cada uno para otorgar ventajas según el ambiente, motivo por el cual las comparaciones entre ellas deben contemplar su realización conjunta en cada ambiente de interés (Muchow 1989a,b; Andrade 1995). Esta condición cobra aún más importancia en ambientes para los cuales existe poca o nula información, como la RSC.

1.3 Estimación de la variabilidad del RG de cultivos estivales en la RSC

La variabilidad climática es una fuente de incertidumbre para el análisis del RG de los cultivos, la cual puede ser cuantificada y transformada en niveles de riesgo que varían en el espacio empleando los pronósticos climáticos. Reconocer la variabilidad en la frecuencia histórica de sequías, temperaturas extremas y otras condiciones climáticas permite planificar cambios en la estrategia de producción de un cultivo a través de ambientes diversos o analizar las causas subyacentes a la variabilidad observada (Chapman et al. 2000a, b, c). En una escala estacional o interanual, el fenómeno denominado *El Niño Oscilación del Sur (ENOS)* es la fuente principal de variabilidad climática (Trenberth 2019).

La mayor parte del área de cultivos extensivos argentina está bajo la influencia del fenómeno *ENOS*. La fase *El Niño* se refleja en un aumento de las precipitaciones de primavera/verano y mayores rendimientos de los cultivos estivales, mientras que ocurre lo contrario con los eventos de *La Niña* (Podesta et al. 1999; Iizumi et al. 2014). Los principales análisis retrospectivos con foco en la RPH, evidencian un mayor beneficio para la generación de rendimiento de maíz y sorgo respecto a soja en las fases *El Niño* y un comportamiento similar y negativo en las fases *La Niña* (Magrin et al. 1998; Podesta et al. 1999). Un estudio más reciente que incluyó a maíz y soja, empleando modelos de simulación de aplicación agronómica (MSAA) y series históricas de datos climáticos de

los últimos 35 años, arrojó una tendencia similar respecto a las fases del *ENOS* en la RPH de Argentina (Aramburu Merlos et al. 2015). La previsibilidad de la variabilidad climática estacional asociada con *ENOS* puede utilizarse potencialmente para reducir el riesgo agropecuario (Cabrera et al. 2006). Por ejemplo, en maní el pronóstico del *ENOS* es una herramienta clave en la toma de decisión sobre aplicar o no riego en el estado de Georgia al sureste de EEUU (Paz et al. 2007). Tal evaluación y la predicción de la variabilidad esperable del RG es inexistente para los principales cereales y legumbres en la RSC, aunque en ella se espera que el efecto del *ENOS* sea menos marcado (Fig. 1.2; Grimm et al. 2007). Incluso en dicha región, diferencias texturales del suelo (e.g. contenidos de arena) pueden generar cambios en la capacidad de almacenaje de agua del suelo previo a la siembra y desencadenar diferencias en la variabilidad interanual de RG entre especies. Adicionalmente, las especies de ambientes semiáridos como sorgo y maní podrían convertirse en una alternativa productiva viable en esta región, en las cuales los contenidos de humedad en el suelo son muchas veces limitantes (Devries et al. 1989; Farré y Faci 2006).

Los MSAA, al integrar los efectos del suelo, el manejo previo y la variabilidad climática sobre el RG, permiten estimar la variabilidad esperable del mismo en un ambiente dado. MSAA como los albergados en los sistemas DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer; Jones et al. 2003) han sido ampliamente utilizados en el país, posibilitando comparar tanto estrategias dentro de un cultivo (Mercau y Otegui 2014; Otegui et al. 2021) como el comportamiento de distintos cultivos (Aramburu Merlos et al. 2015), mejorando así nuestra capacidad para diseñar medidas de manejo que reduzcan el impacto negativo de los principales estreses abióticos (e.g. sequías). Sin embargo, para su utilización en la RSC se debe superar la limitante referida a la escasa información experimental con la cual evaluar el desempeño de los mismos.

1.2. Objetivos

1.2.1 Objetivo general

El objetivo general de esta tesis es comparar ecofisiológicamente la determinación del rendimiento de cuatro cultivos de verano (Maíz, Soja, Sorgo y Maní) en una transecta edafoclimática, ubicada a similar latitud desde la región Pampeana Húmeda a la Región Semiárida Central, y en esta última, donde constituyen las principales alternativas agrícolas, comparar la distribución esperable de sus rendimientos bajo la variabilidad inter-anual del clima y la variabilidad de suelos en la región.

1.2.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos son:

- (i) Entender las bases ecofisiológicas de la interacción Especie \times Ambiente de los cuatro principales cultivos de la Región Semiárida Central (Maíz, Soja, Sorgo y Maní) en un amplio rango de variabilidad climática, generado a través de dos fechas de siembra, dos campañas y tres regiones dispuestas en un gradiente longitudinal desde un régimen climático húmedo hasta el semiárido.
- (ii) Evaluar la precisión y sesgo de MSAA para simular la variabilidad observada del rendimiento de los cuatro cultivos en los ambientes evaluados.
- (iii) Utilizar los MSAA para cuantificar la distribución esperable de rendimientos de los cuatro cultivos en la Región Semiárida Central, bajo la variabilidad climática actual (i.e. series históricas) y para un conjunto de suelos representativos de la región en diferentes condiciones de recarga hídrica inicial.

1.3 Hipótesis

- I. El RG potencial en secano de las cuatro especies evaluadas responderá al índice de aridez ambiental (oferta de agua/demanda atmosférica) discriminando a los cultivos mesofíticos (maíz y soja) de aquellos de ambientes semiáridos (sorgo y maní).
Predicción: En un gradiente de aridez ambiental creciente los cultivos de maíz y soja reducen proporcionalmente más sus rendimientos, la evapotranspiración, la radiación interceptada y el crecimiento en etapas reproductivas que los cultivos de sorgo y maní.

- II. La ocurrencia de temperaturas supraóptimas durante el período crítico para la determinación del NG afectará a este componente y consecuentemente al RG.
Predicción: Las temperaturas supraóptimas en el período crítico afectarán negativamente al NG y el RG. El efecto será mayor en (i) la RSC (por mayor intensidad y frecuencia de muy altas temperaturas) que en la RPH, y (ii) en maíz y sorgo (por su corto periodo de producción de flores) que en soja y maní (con período de producción de flores más largo).

- III. La EUA se modificará según el gradiente de DPV explorado, siendo la respuesta distinta entre las especies.
Predicción: La EUA será mayor en (i) el ambiente húmedo (RPH) que en el ambiente más seco (RSC) y (ii) en siembras tardías que en siembras tempranas.

- IV. La distribución esperable del RG potencial en secano de maíz y soja en la RSC experimentará diferencias con la variación de la recarga inicial de los perfiles, su capacidad de almacenar agua y el cambio de fecha de siembra.

Predicción: la variabilidad interanual del RG será (i) menor con el mayor contenido de humedad al inicio de la estación de crecimiento, (ii) mayor en suelos con menor capacidad de retención de agua útil y (iii) menor con el atraso de la fecha de siembra.

- V. La distribución esperable del RG potencial en secano en la RSC experimentará diferencias entre soja y maní, y entre maíz y sorgo ante la variación de la recarga inicial de los perfiles y su capacidad de almacenar agua, con un RG más alto y riesgo menor en maní y sorgo cuando la limitación hídrica es mayor pero no cuando la limitación hídrica disminuye.

Predicción: la variabilidad interanual del RG mostrará un mayor promedio con menos riesgo en maní y sorgo respecto a soja y maíz en escenarios de (i) menor contenido de humedad al inicio de la estación de crecimiento, y (ii) menor capacidad de retención de agua útil en los suelos.

1.4 Estructura de la tesis

Para cumplir con los objetivos propuestos y poner a prueba las hipótesis planteadas se realizó un estudio de ecofisiología comparada entre cultivos de maíz, soja, sorgo y maní, siendo los dos primeros más característicos de ambientes mesofíticos y los dos últimos de ambientes semiáridos. Para ello se realizaron ensayos a campo bajo condiciones potenciales de secano y en un gradiente ambiental amplio, generado mediante una combinación de tres sitios (ubicados en tres regiones de la zona central de Argentina), dos campañas agrícolas y dos épocas de siembra. Los sitios fueron Villa Mercedes, San Luis (Región Semiárida Central), Manfredi, Córdoba (Región Sub-Húmeda) y Pergamino, Buenos Aires (Región Pampeana Húmeda). En el capítulo 2 de la tesis se describe detalladamente el diseño experimental utilizado junto con una descripción de las condiciones

agroclimáticas exploradas en cada ambiente. Por su parte, la metodología particular implementada para medir/calcular las variables de interés y analizar los datos se describe en la sección “materiales y métodos” de cada capítulo de resultados (Capítulos 3-5). Los capítulos 3 y 4 abordan el primer objetivo específico (entender la interacción entre la especie y el ambiente), evaluando las predicciones de las tres primeras hipótesis. El capítulo 5 aborda el segundo y tercer objetivo específico, referidos a (i) evaluar los MSAA, y (ii) estimar la distribución de rendimientos en distintos escenarios de variabilidad histórica y evaluar las predicciones de la cuarta y quinta hipótesis utilizando los MSAA. La tesis concluye con el capítulo 6, en el cual se integran los hallazgos principales, sus implicancias respecto de lo conocido hasta el momento, y los desafíos para investigaciones futuras.

MATERIALES, MÉTODOS E INFORMACIÓN AGROCLIMÁTICA

2.1 Metodología

2.1.1 Condiciones experimentales y material vegetal utilizado

Los experimentos se llevaron adelante durante dos campañas agrícolas (Camp1: 2016-2017; Camp2: 2017-2018) en tres Estaciones Experimentales Agropecuarias (EEA) del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA): la EEA INTA San Luis (33° 39' S, 65° 25' O), la EEA INTA Manfredi (31° 49' S, 63° 46' O) y la EEA INTA Pergamino (33° 56' S, 60° 33' O). La primera EEA se ubica dentro de la RSC, en la localidad de Villa Mercedes (VM) en la provincia de San Luis, la segunda en la RSH, en la localidad de Manfredi (MFD) provincia de Córdoba, y la última de ellas en la zona núcleo de la RPH, en la localidad de Pergamino (PGO) provincia de Buenos Aires. Las estaciones exploraron un importante rango de condiciones ambientales en un rango latitudinal estrecho. Esto permitió garantizar condiciones climáticas contrastantes para las variables de interés (Cuadro 2.1) sin modificar sustancialmente otras, como el fotoperíodo diario.

Los suelos sobre los que se realizaron los ensayos corresponden a las series Cramer (VM), Oncativo (MFD) y Pergamino (PGO), que se clasifican como Ustipsament típico, Haplustol éntico y Argiudol típico, respectivamente. La textura es arenosa-franca en Cramer, franco-limosa en Oncativo, y franco-limosa en superficie con un horizonte B textural franco-arcillo-limoso en Pergamino. Los ensayos se ubicaron en partes relativamente planas y homogéneas del paisaje.

Cuadro 2.1. Caracterización climática en base a registros diarios obtenidos de las tres estaciones experimentales entre 1971 y 2018 (valores promedio).

Variable analizada	Villa Mercedes	Manfredi	Pergamino
Fotoperiodo máximo (horas)¹	15.36	15.16	15.39
Período libre de heladas (días)²	158	217	226
Temperatura (°C)³	21.3	21.9	21.7
Amplitud térmica (°C)⁴	15.6	13.4	13.2
Días con Tmax>35°C⁵	16	10	7
Precipitación (mm)⁶	503	562	585
Evapotranspiración Potencial (mm)⁷	701	667	655

¹ Incluyendo crepúsculos

² Promedio de valores anuales considerando fechas medias de última y primera heladas agrometeorológica

³⁻⁷ Período Noviembre-Marzo.

^{3,4,6} Promedio sobre media anual de valores diarios.

^{5,7} Promedio sobre valores acumulados anualmente para el período.

En cada sitio experimental se evaluaron dos fechas de siembra (FS), temprana (FS1: segunda quincena de Octubre) y tardía (FS2: primera quincena de diciembre). También se evaluaron cuatro especies estivales (Cuadro 2.2), las dos más difundidas en Argentina (i.e. soja y maíz) y dos alternativas consideradas de mejor adaptación a ambientes áridos. En este sentido, se evaluó el cultivo de maní como una leguminosa alternativa y sorgo como una alternativa de cereal. Para cada especie se utilizó un único genotipo comercial de ciclo adecuado y difundido tanto en las tres regiones como en la zona circundante a cada EEA, excepto para sorgo en VM durante Camp1, en que el híbrido varió según la fecha de siembra (Cuadro 2.2). Los genotipos fueron seleccionados por su amplia adaptabilidad y estabilidad ambiental en los ambientes explorados. Se utilizó un único arreglo espacial (densidad × espaciamiento entre hileras) para cada especie. La densidad de plantas fue de aproximadamente (i) 8, 25, 18 y 14 pl m⁻² para maíz, soja, sorgo y maní, respectivamente, en Manfredi y Pergamino, y (ii) 6, 20 y 14 pl m⁻² para maíz, soja y maní,

respectivamente, mientras que para sorgo fue de 16 y 13 pl m⁻² para la FS temprana y tardía, respectivamente, en Villa Mercedes. Estas densidades fueron seleccionadas considerando las recomendadas por los criaderos para cada genotipo en cada condición de crecimiento (sitio × FS). Los cereales fueron fertilizados con nitrógeno (N) para evitar limitaciones de este nutriente (200 kg de N ha⁻¹) y las legumbres fueron adecuadamente inoculadas. En todos los casos se fertilizó con fósforo (30 kg de P ha⁻¹). La cepa inoculada en soja fue la E 109 de *Bradyrhizobium japonicum* a razón de 3 cm³ kg⁻¹ de semilla de soja (aproximadamente 1×10⁶ ufc por semilla) y para maní la cepa C145 con la misma dosis (aproximadamente 1×10⁵ ufc por semilla). Los ensayos fueron conducidos en seco en Villa Mercedes y Manfredi, y con riego estratégico complementario en Pergamino para garantizar condiciones contrastantes. Se realizaron los controles de malezas, plagas y enfermedades correspondientes para minimizar el efecto de adversidades bióticas. También se montó una malla plástica sobre una estructura de madera con tendido de alambres para prevenir el daño por granizo en los cultivos en la RSC.

Cuadro 2.2. Descripción de las especies utilizadas en este estudio.

Especie	Variedad/Híbrido	Ciclo	Días a MF ^a	FS ^a
Soja	NA 5009	intermedio	131	Ambas
Maíz	DK 72-10	intermedio	122	Ambas
Maní	ASEM 400 INTA	intermedio	140	Ambas
Sorgo	VDH 314/ADV 1200 ^b	largo/intermedio	140/122	FS1/FS2

^a FS: fecha de siembra; MF: madurez fisiológica

^b Sorgo de ciclo corto (ADV 114) fue sembrado sólo durante la Camp1 en Villa Mercedes en FS2. Se desestimó esta necesidad en la Camp2.

Se registraron datos diarios de temperatura (media, mínima y máxima), humedad relativa (mínima y máxima), radiación solar y evapotranspiración potencial en estaciones meteorológicas ubicadas a menos de 4 km de distancia. La lluvia diaria se midió siempre *in situ*.

2.1.2 Diseño experimental, mediciones realizadas y análisis de datos

En cada uno de los experimentos, se utilizó un diseño en bloques completamente aleatorizado con arreglo en parcelas divididas donde la fecha de siembra se ubicó en la parcela principal y las especies en las sub-parcelas (de aquí en más denominadas parcelas), con tres repeticiones. Las parcelas fueron de 8 surcos, distanciados a 52 cm entre hileras, excepto para maní en que se utilizó una distancia de 70 cm entre hileras. La longitud de las parcelas fue de por lo menos 7 m.

En cada parcela se evaluó la fenología siguiendo las escalas de Fehr y Caviness (1977) para soja, Ritchie y Hanway (1982) para maíz, Vanderlip (1993) para sorgo y Boote (1982) para maní. Para ello, tempranamente en el ciclo se marcó un mínimo de 6-10 plantas contiguas por parcela en la hilera central de las mismas, sobre las cuales se realizaron las observaciones correspondientes.

En madurez fisiológica fueron cosechadas las plantas presentes en 1 m² de la zona central de cada parcela para la determinación del rendimiento en grano (RG, en g m⁻²), número de granos por m² (NG), peso individual de los granos (PG, cociente entre RG y NG, en mg grano⁻¹), biomasa total a madurez fisiológica (BTc, g m⁻²) e índice de cosecha (IC, cociente entre RG y BTc). Las determinaciones se hicieron luego de secar el material en estufa a 60°C hasta peso constante.

A lo largo del ciclo se realizó un seguimiento de (i) la producción de biomasa total aérea del cultivo (BT), (ii) la fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada ($fRFA_{int}$), y (iii) la evolución del contenido de agua del suelo hasta 2 m de profundidad en cada parcela entre la emergencia y la madurez fisiológica. La producción de biomasa se estableció a través de muestreos destructivos para determinar su evolución en forma acumulada (en g m⁻²). La $fRFA_{int}$ se estimó semanalmente mediante un sensor cuántico de 1 metro lineal (Cavadevices, Argentina) entre las 11:30 y las 14:30 hs en días

despejados, e incluyó una medición por encima del canopy de cada parcela (RFA_{inc}) y el promedio de tres mediciones, a partir de las realizadas por debajo de las hojas verdes más bajas de cada parcela (RFA_{abajo}), con el sensor centrado diagonalmente a través de una fila central (Gallo y Daughtry 1986). Los datos se utilizaron para el cálculo de la $fRFA_{int}$ como en la ecuación 2.1 (Ec.2.1).

$$fRFA_{int} = 1 - RFA_{abajo}/RFA_{inc} \quad (2.1)$$

Los valores diarios de $fRFA_{int}$ se obtuvieron por interpolación lineal y la RFA_{int} diaria (en $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$) fue estimada como el producto entre $fRFA_{int}$ y la RFA_{inc} . La cantidad total de RFA_{int} durante cada etapa evaluada se estimó como en la Ec.2.2.

$$RFA_{int} = \sum_{inicio\ etapa}^{fin\ etapa} fRFA_{int} \times RFA_{inc} \quad (2.2)$$

Las mediciones de contenido de agua en el suelo se realizaron cada 20 días, gravimétricamente para RSC, y por sonda de neutrones (Troxler Electronic Lab., Troxler 4300, NC, EE. UU.) para RSH y RPH (excepto en el horizonte superficial en que también se utilizó el método gravimétrico). En estos últimos dos casos, se colocó un tubo de acceso cercano al centro de cada parcela. La evapotranspiración del cultivo (ET_c , en mm) para todo el ciclo (ET_c-c) o distintas etapas se computó como en la Ec.2.3.

$$ET_c = \sum_{inicio\ etapa}^{fin\ etapa} (\Delta\ agua\ almacenada + lluvias + riego - escurrimiento\ superficial) \quad (2.3)$$

La escorrentía superficial se estimó según lo propuesto por Andriani et al. (2016), mientras que la variación del almacenamiento de agua del suelo (Δ agua almacenada) se obtuvo como diferencia en el contenido de agua del suelo entre mediciones sucesivas.

A partir de las determinaciones anteriores se calcularon las siguientes variables:

- Eficiencia en el uso de la radiación (EUR, en $g\ m^{-2}\ MJ^{-1}$): como el cociente entre la biomasa total aérea y la radiación fotosintéticamente activa acumulada, correspondiente al ciclo total (EURc) o a cada período estudiado.

- Eficiencia en el uso del agua evapotranspirada para producir BT (EUA, en $\text{g m}^{-2} \text{mm}^{-1}$): como el cociente entre la biomasa y la evapotranspiración correspondiente al ciclo total (EUAc) o a cada período estudiado.

Los efectos del ambiente (combinación de Camp \times Sitio \times FS) para cada especie respecto de las variables evaluadas fueron interpretados mediante un análisis de componentes principales (ACP) realizado con Infostat (Di Rienzo et al. 2011) y análisis de correlación. Las relaciones entre las especies y los ambientes se evaluaron mediante análisis de regresión. En los Capítulos 3 y 4, se detallará los aspectos particulares relacionados con la metodología empleada.

2.2 Utilización de Modelos de Simulación de Aplicación Agronómica (MSAA)

Se utilizaron modelos funcionales de simulación de cultivos incluidos en el sistema DSSAT (Jones et al. 2003). El sistema de soporte cuenta con modelos para cada uno de los cultivos que se compararon (CROPGRO para Soja y Maní; CERES para Maíz y Sorgo). El dominio de aplicación de estos modelos cubre gran parte de los procesos que se estudiaron y en muchos casos han sido evaluados y utilizados para las condiciones de producción en las principales zonas agrícolas de Argentina (Dardanelli et al. 2004; Mercau et al. 2007; Bert et al. 2009; Grassini et al. 2009; Mercau y Otegui 2014; Aramburu Merlos et al. 2015; Carcedo y Gambin 2019).

Se evaluó la precisión de los modelos para predecir algunos de los resultados experimentales generados, utilizando para ello los estadísticos apropiados (Kobayashi y Salam 2000). Luego se realizaron simulaciones considerando tanto las distintas condiciones iniciales evaluadas en cada ambiente como la variabilidad atribuible al clima, utilizando para ello series de datos históricos diarios de cada localidad. Finalmente, los MSAA fueron utilizados para evaluar la distribución de rendimientos en distintos escenarios de la RSC, y cuantificar así el impacto de estrategias de producción alternativas

(Capítulo 5). Para ello se utilizó la serie climática histórica 1971-2021 de Villa Reynolds (San Luis, SMN) y se simuló el efecto de la variabilidad climática sobre el RG (Hammer et al. 2000) de los cuatro cultivos en distintas fechas de siembra y tres recargas hídricas iniciales del perfil en tres suelos representativos de la RSC. En concordancia con los capítulos 3 y 4, en el capítulo 5 dedicado al empleo de los MSAA, se describirá detalladamente la metodología empleada.

2.3. Condiciones Agroclimáticas

2.3.1. Caracterización Climática durante la estación de crecimiento

Ambas campañas analizadas correspondieron a fases *La Niña* del fenómeno *El Niño Oscilación del Sur (ENOS)*, aunque la intensidad de la fase fue mayor en el segundo que en el primer año (www.cpc.ncep.noaa.gov). Las precipitaciones desde comienzo de octubre hasta fin de abril fueron mayores en la Camp1 (796 mm, como promedio de las regiones) que en la Camp2 (550 mm). Para ese período, las mayores precipitaciones en la Camp1 fueron acompañadas por valores menores de déficit de presión de vapor (DPV, promedio 1.4 kPa) y evapotranspiración potencial (ET_o, 1012 mm) que en la Camp2 (1.6 kPa y 1064 mm, respectivamente). Como promedio estacional la radiación fotosintéticamente activa incidente (RFA_{inc}) y la temperatura media (T-med) fueron levemente inferiores en la Camp1 (20.6 MJ m⁻² día⁻¹ y 19.7°C) que en la Camp2 (21 MJ m⁻² día⁻¹ y 19.9°C).

Las tres localidades difirieron en las variables climáticas registradas (Figs. 2.1 y 2.2). Los valores de las precipitaciones de octubre a abril (539>436>420 mm, promedio a través de ambientes de ambas campañas) descendieron en sentido Este-Oeste (RPH>RSH>RSC), siguiendo el patrón de las precipitaciones medias históricas anuales

($1030 > 790 > 700$ mm para el período 1971 a 2017) y en sentido opuesto el DPV ($1.19 < 1.57 < 1.64$ kPa), la RFA_{inc} ($20.3 < 20.8 < 21.2$ MJ m⁻²) y consecuentemente la evapotranspiración potencial ($970 < 1030 < 1120$ mm).

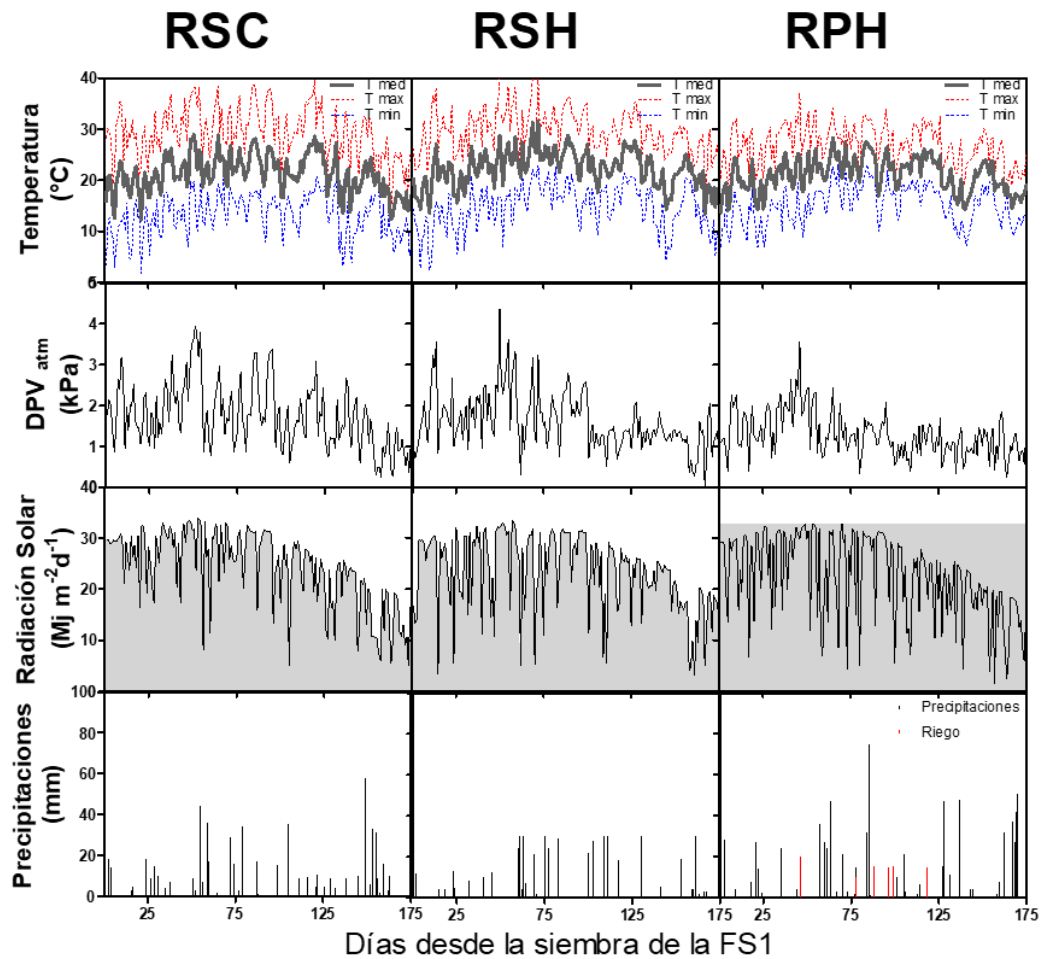


Figura 2.1. Condiciones ambientales de la campaña 1 de los sitios de estudio de Villa Mercedes (VM), Manfredi (MFD) y Pergamino (PGO) representativos de las regiones Semiárida Central (RSC), Sub-Húmeda (RSH) y Pampeana Húmeda (RPH), respectivamente.

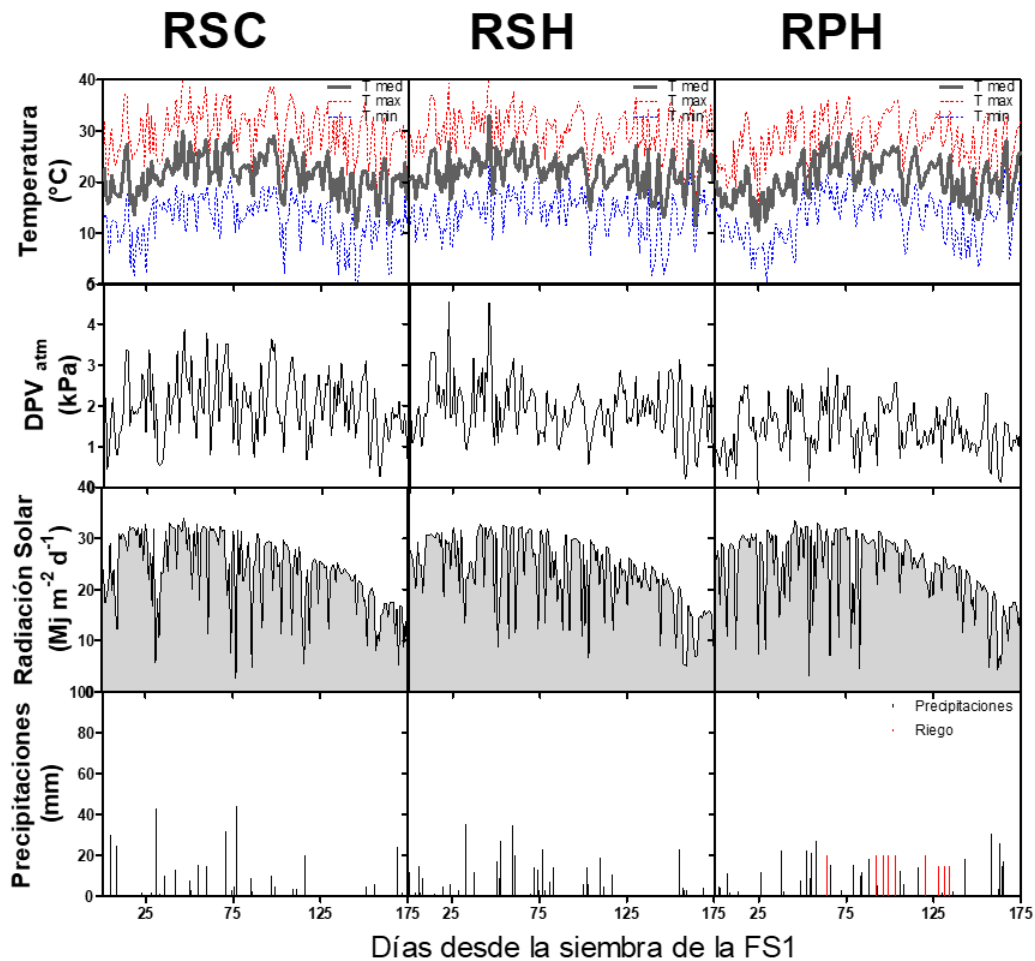


Figura 2.2. Condiciones ambientales de la campaña 2 en las regiones indicadas en Fig. 2.1.

La fase del fenómeno *ENOS* intensificó los efectos de manera variable en cada región ($RPH > RSH \approx RSC$), coincidiendo con la heterogeneidad espacial que muestra este fenómeno, con una señal más fuerte al este y débil al oeste del país (Podestá et al. 2002). La reducción de las precipitaciones en la Camp2 respecto a la Camp1 fue de un 44, 22 y 24% en RPH, RSH y RSC, respectivamente (Cuadro 2.3). Por su parte, la RFA_{inc} fue $Camp2 > Camp1$ en un 5% en RPH y 2% en RSH, pero se mantuvo similar entre ambas en RSC. El DPV creció siguiendo un gradiente este-oeste en ambas campañas, siendo siempre superior la Camp2 respecto a la Camp1 (1.1 y 1.2 kPa en RPH, 1.4 y 1.7 kPa en RSH, 1.6 y 1.9 kPa en RSC). Las temperaturas medias fueron superiores en la Camp2 en

Cuadro 2.3. Descripción del Clima. Valores diarios promedios de radiación fotosintéticamente activa incidente (RFA_{inc}), temperatura media (T_{MED}), precipitaciones (mm), déficit de presión de vapor (DPV), evapotranspiración potencial (ETo) y el riego total (mm, sólo en RPH) durante las dos campañas (Camp1: 2016/17 y Camp2: 2017/18) y las tres regiones analizadas (RSC: Región Semiárida Central, RSH: Región Sub-Húmeda y RPH: Región Pampeana Húmeda).

Camp	MESES	RFA_{inc} ($MJ\ m^{-2}d^{-1}$)			T_{MED} ($^{\circ}C$)			PRECIPITACIONES (mm)			DPV (kPa)			ETo (mm)			RIEGO (mm)
		RSC	RSH	RPH	RSC	RSH	RPH	RSC	RSH	RPH	RSC	RSH	RPH	RSC	RSH	RPH	RPH
1	OCT.	20.9	20	18.9	16.6	17.6	16.4	191	72	120	1.2	1.2	0.9	125	115	106	-
	NOV.	27.3	25.1	25.4	19.2	20.7	19.3	61	34	79	1.8	1.9	1.5	175	158	166	-
	DIC.	28.5	26.5	26.4	23.2	24.2	22.4	129	138	148	2.4	2.2	1.9	214	187	190	20
	ENE.	28.4	26.7	25.7	23.7	25.1	26.3	100	107	102	2.1	1.9	1.3	197	177	159	40
	FEB.	24.1	22.7	21	23.1	23.4	23	84	106	102	1.7	1.2	1	141	121	108	30
	MAR.	18.5	20	18.5	20.2	20.9	19.6	165	58	59	1.4	1.3	1	116	115	101	-
	ABR.	13.6	14.1	13.3	15.9	17.2	17.3	74	62	162	0.9	1.1	1.1	70	73	77	-
	PROM.	23.0	22.2	21.3	20.3	21.3	20.6	115	82	110	1.6	1.5	1.2	148	135	130	-
2	OCT.	22.7	23	20.7	16.6	17.6	17.4	91	75	43	1.7	1.6	1.1	157	144	121	-
	NOV.	26.6	27.5	25.9	19.4	21.3	16.9	59	55	25	1.9	2.2	1.5	178	190	154	-
	DIC.	26.9	25.4	25.9	23.5	24	21.8	108	155	92	2.1	2.2	1.6	195	166	167	20
	ENE.	25.1	25.5	26.8	23.2	23	23.6	96	78	64	2.1	1.8	1.6	183	161	174	40
	FEB.	23.6	23.8	25.9	22.9	22.1	22.7	42	61	32	2.2	1.8	1.5	154	128	141	60
	MAR.	22.4	22	21.9	19.7	20.2	19.3	5	0	23	2.2	2.1	1.4	155	141	127	60
	ABR.	13.3	12.2	11.6	19	21.4	20.8	36	43	211	1.2	1.4	0.8	85	82	65	-
	PROM.	22.9	22.8	22.7	20.6	21.4	20.4	62	67	70	1.9	1.9	1.4	158	145	136	-

las tres localidades, coincidente con mayores T_{max} en Camp2 y similares T_{min} entre campañas. Finalmente, la evapotranspiración potencial (ET_o) fue Camp1 > Camp2 en todas las localidades, con un aumento para la primera de 2, 6 y 7 % en RPH, RSH y RSC, respectivamente (Cuadro 2.3).

2.3.2 Contenido de agua en el suelo durante la estación de crecimiento

El contenido de agua útil a la siembra y madurez fisiológica (Fig. 2.3) varió entre especies y ambientes. Se destacó también el contraste de las condiciones ambientales entre ambas campañas independientemente de la región cuando se lo expresó como evolución de la lámina de agua en función del contenido de humedad hasta los 2 metros de profundidad (Fig. 2.4). Estas diferencias fueron producto de la mayor intensidad de la fase *La Niña* del fenómeno *ENOS* en la segunda campaña que en la primera.

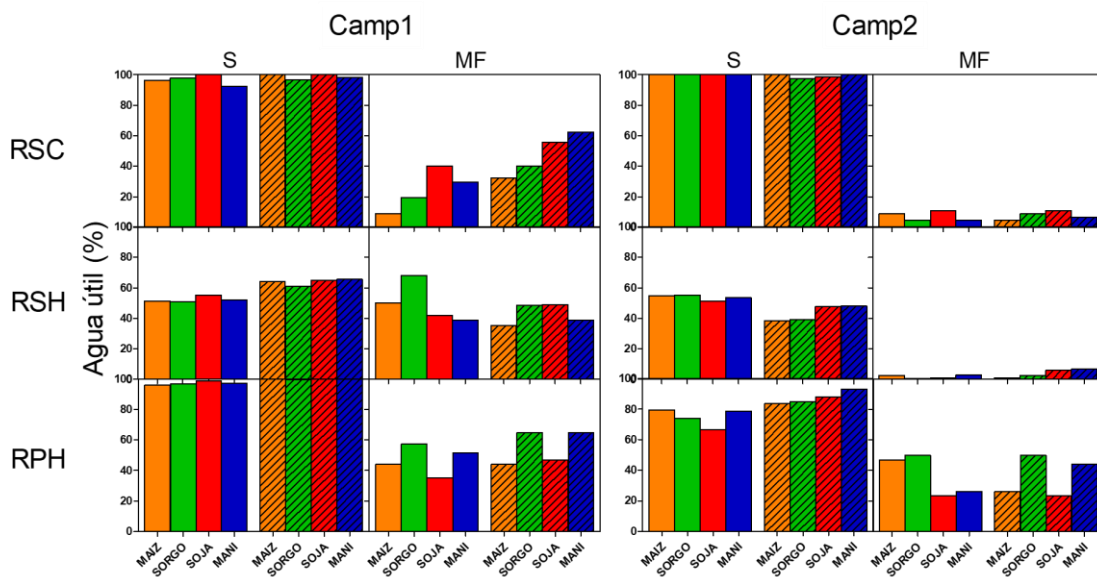


Figura 2.3. Contenido de agua útil en el suelo hasta 2 m de profundidad a la siembra (S) y madurez fisiológica (MF), expresado en porcentaje (% AU) para cada campaña (Camp) y región (RSC, RSH y RPH como en Fig. 2.1). Barras lisas para FS1 y rayadas para FS2. Los colores distinguen maíz (anaranjado), maní (azul), soja (rojo) y sorgo (verde).

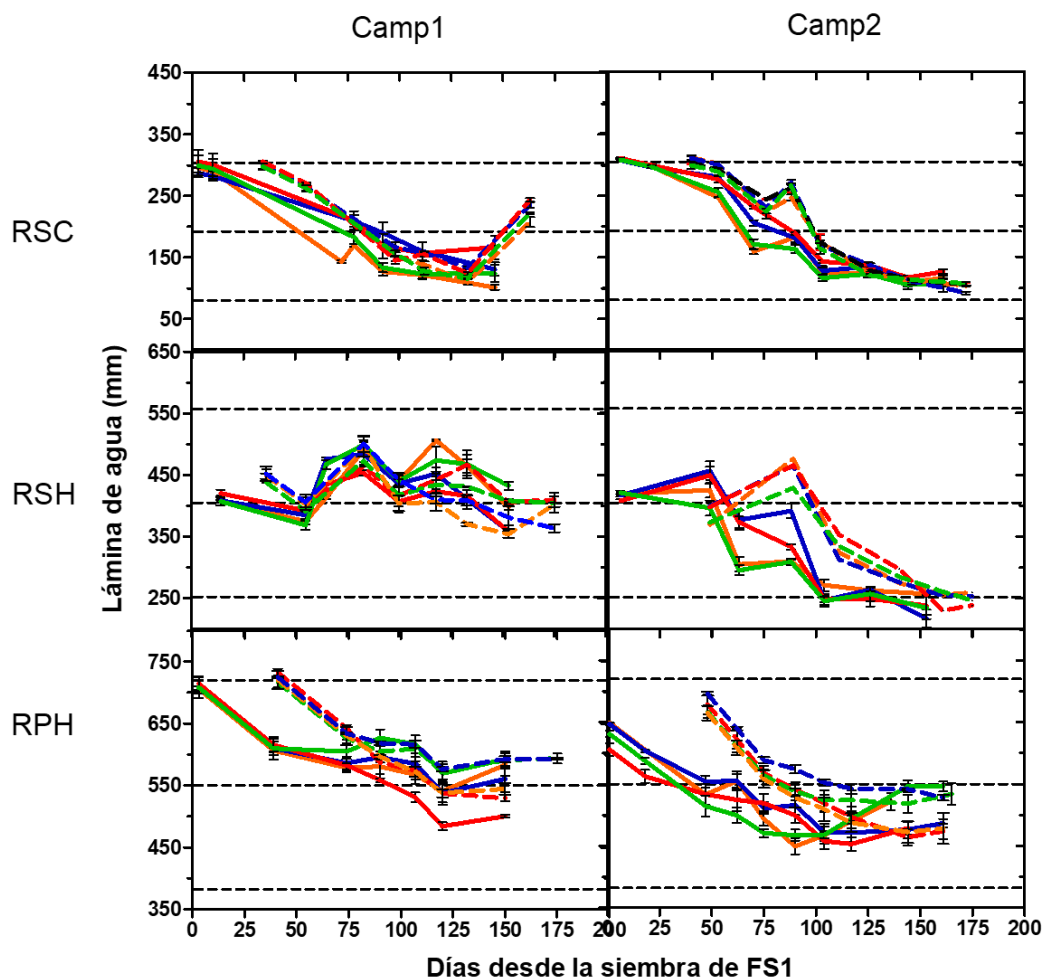


Figura 2.4. Evolución de la lámina de agua en el suelo (mm) hasta 2 m de profundidad desde la siembra de la primera fecha de siembra en cada campaña (Camp) y ambiente (RSC, RSH y RPH como en Fig. 2.1). En la parte media de cada figura se representa el contenido de humedad del suelo para cada cultivo para FS1 (líneas continuas) o FS2 (líneas punteadas). La coloración de las líneas representa a cada cultivo como en la Fig. 2.3. En líneas horizontales punteadas negras se indican los valores de lámina correspondientes a capacidad de campo (superior), 50% agua útil (media) y punto de marchitez permanente (inferior). Las líneas verticales representan \pm un error estándar de la media.

**DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO DE MAÍZ, SOJA, SORGO Y MANÍ: ANÁLISIS
ECOFISIOLÓGICO A LO LARGO DE UNA TRANSECTA LONGITUDINAL DESDE LA ZONA
HÚMEDA A LA SEMIÁRIDA DE LA REGIÓN TEMPLADA CENTRAL DE ARGENTINA**

3.1 Introducción

Bajo el desafío continuo de incrementar el rendimiento en grano (RG) de los cultivos, especialmente en las regiones sub-húmeda y semiárida del país, existe una creciente necesidad de optimizar el manejo de los principales cultivos estivales (maíz y soja) y también alternativos (sorgo y maní) en relación con el ambiente (Aramburu Merlos et al. 2015; Giménez 2017). Conocer el desempeño de estos cultivos a lo largo de un gradiente de aridez puede generar alternativas factibles y disímiles entre los distintos ambientes considerados.

Uno de los debates más significativos en el campo de la ecofisiología en regiones marginales es el referido a las ventajas y desventajas de los cultivos de ambientes semiáridos (i.e. sorgo y maní) respecto a los cultivos mesofíticos (i.e. maíz y soja; Parra et al. 2022). Al comparar el desempeño de ambos cereales en ambientes tropicales sin limitaciones hídrico-nutricionales, el maíz presentó RG potenciales más altos y estables entre fechas de siembra respecto al sorgo (Muchow, 1989). Asimismo, la variación en la producción de biomasa aérea entre fechas de siembra, ligada principalmente a cambios en la radiación interceptada, también fue mayor en maíz que en sorgo. Por el contrario, el RG de sorgo superó al de maíz cuando ambos cultivos fueron sometidos a las deficiencias hídricas muy severas características de un ambiente semiárido (Muchow, 1989). En estas condiciones, la caída en la producción de biomasa fue el componente más influyente de dicha respuesta, que estuvo mayormente influenciada por alteraciones en la fotosíntesis. Se ha destacado el cultivo de sorgo sobre el del maíz bajo distintos escenarios de restricción hídrica, explicado por una mayor generación de biomasa y eficiencia en el uso del agua (Farré y Faci 2006; Zegada-Lizarazu et al. 2012). Sin embargo, con base en las diferencias provocadas por el mejoramiento genético, las ventajas del sorgo respecto al maíz en ambientes propensos a la sequía son cuestionables, especialmente en el último

tiempo (Mason y Eskridge 2008; Parra et al. 2020, 2022). Un estudio en los EEUU indicó que el RG de maíz superó al de sorgo en un 30 % tanto en condiciones de secano como de riego (Mason y Eskridge 2008). Adicionalmente dicho análisis destacó que los aumentos del RG en maíz con el año de liberación se debieron a un mayor número (NG) y peso individual del grano (PG), mientras que en el sorgo no se observó una correlación significativa entre el RG y sus componentes según el año de liberación (*op.cit.*).

Al comparar los dos cultivos de legumbres, el maní mantuvo una mayor conductancia estomática y actividad nitrogenasa cuando ambos estuvieron expuestos a deficiencias hídricas en un suelo limoso silíceo de poca profundidad (1.2 m), atribuible en parte a una proliferación de raíces mayor en horizontes profundos (Devries et al., 1989). En correspondencia con estos resultados, el RG de maní superó al de soja cuando fueron sometidos a estrés hídrico, explicado por un mayor consumo de agua (Pandey et al. 1984). Además, en el caso de las legumbres la reducción del RG se explicó por el NG y no por el PG. Llamativamente, el maní y otros cultivos como el sorgo tienen, a diferencia de la soja y el maíz, una capacidad elevada para adecuar el desarrollo (i.e., plasticidad fenotípica por *latencia* en sorgo o producción extendida en el tiempo de sucesivas cohortes de flores en maní) cuando experimentan condiciones hídricas muy restrictivas (Sinclair et al. 1987; Dardanelli et al. 1997), tendiendo a eludir la simultaneidad de estas condiciones con el periodo de definición del NG (Lawn 1982; Muchow 1985; Loomis y Connor 1992).

Centrándonos en la ventana reproductiva de estos cultivos, un número considerable de investigaciones se ha referido al rol trascendental que la disponibilidad de recursos, y consecuentemente la generación de biomasa, posee sobre la determinación del RG (Loomis y Connor 1992; Sinclair y Muchow 1999; Connor et al. 2011; Sadras y Lawson 2013). Rasgos que limitan la pérdida de agua, tales como la transpiración limitada (Yang

et al. 2012; Devi et al. 2014), cobran importancia vital en ambientes marginales al permitir la conservación del recurso, especialmente en etapas avanzadas del ciclo. En este sentido, los cultivos de ambientes semiáridos evidencian ventajas respecto a los más mesofíticos referidas a la captura de agua en ambientes restrictivos (Farré y Faci 2006; Puangbut et al. 2009). El maní y el sorgo tienen caracteres fisiológicos que le confieren tolerancia a sequía y podrían cobrar mayor relevancia en dichos ambientes. Algunos de esos caracteres reducen el aumento de la transpiración asociado a una mayor demanda ambiental característica de ambientes semiáridos (Devi et al. 2010; Gholipoor et al. 2010; Geetika et al. 2019). Esta respuesta mitiga la caída del RG, al permitir mantener reservas hídricas para la etapa crítica de definición del mismo (Passioura 1996). La transpiración también se reduce cuando el agua útil del suelo cae por debajo de cierto umbral (Gholipoor et al. 2012), permitiendo así administrar el agua hasta que la humedad se establece.

Bajo estas premisas, el desarrollo del canopeo, estudiado como la radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAint), diferiría según el modo en que administren el agua los cultivos a lo largo del gradiente de aridez establecido. En este sentido, las plantas adecuan rápidamente la dimensión de la superficie foliar a la disponibilidad hídrica, regulando la pérdida de agua transpirada por reducción de la cantidad de radiación incidente interceptada. En el corto plazo, el movimiento foliar (e.g. enrollamiento en las gramíneas y plegado de hojas en las latifoliadas), permite reducir el área expuesta a la radiación solar producto del estrés hídrico, disminuyendo la interceptación de radiación y mejorando así el estado hídrico del cultivo (Matthews et al. 1988). En el caso de la soja, el marchitamiento de las hojas se considera un síntoma visible de respuesta a sequía, siendo un rasgo de interés en los programas de mejoramiento de soja tolerante a esa adversidad (e.g. *slow-wilting*, Ye et al. 2020; Zhou et al. 2020). Si el déficit hídrico aumenta,

lo que es esperable en ambientes semiáridos respecto a húmedos, la reducción del área transpiratoria se intensifica por senescencia foliar, principalmente durante el llenado de los granos (Connor y Sadras 1992). La importancia relativa ante un déficit hídrico de cada uno de estos caracteres sobre el RG y sus componentes varía con el cultivo, su desarrollo y el ambiente.

El objetivo de este capítulo fue analizar la respuesta del RG, sus principales determinantes ecofisiológicos y componentes numéricos a la interacción Especie \times Ambiente de los cuatro principales cultivos de la Región Semiárida Central (Maíz, Soja, Sorgo y Maní) en un rango amplio de variabilidad climática a través de un gradiente longitudinal desde un régimen húmedo a uno semiárido producto de tres sitios experimentales (RPH, RSH y RSC), que además se combinaron con dos campañas y dos épocas de siembra.

3.2 Materiales y Métodos

Las variables de interés para cada combinación de especie y ambiente se calcularon para el periodo crítico de determinación del número de granos (subíndice 'pc'), para el llenado activo de los granos (subíndice 'll') y para la suma de ambos periodos definida como 'ventana reproductiva' (subíndice 'vent'). Según la especie, el período crítico abarcó (i) de R1-15 a R1+15 en maíz (Ritchie y Hanway, 1982), (ii) de R3 a R6 en soja (Fehr y Caviness, 1977) y maní (Boote, 1982), y (iii) de E6-20 a E6+10 para sorgo (Vanderlip, 1993). La etapa de llenado activo de los granos abarcó desde final del período crítico para maíz y sorgo, y desde R5 para soja (Fehr y Caviness, 1977) y maní (Boote, 1982), hasta madurez fisiológica (Fig. 3.1).

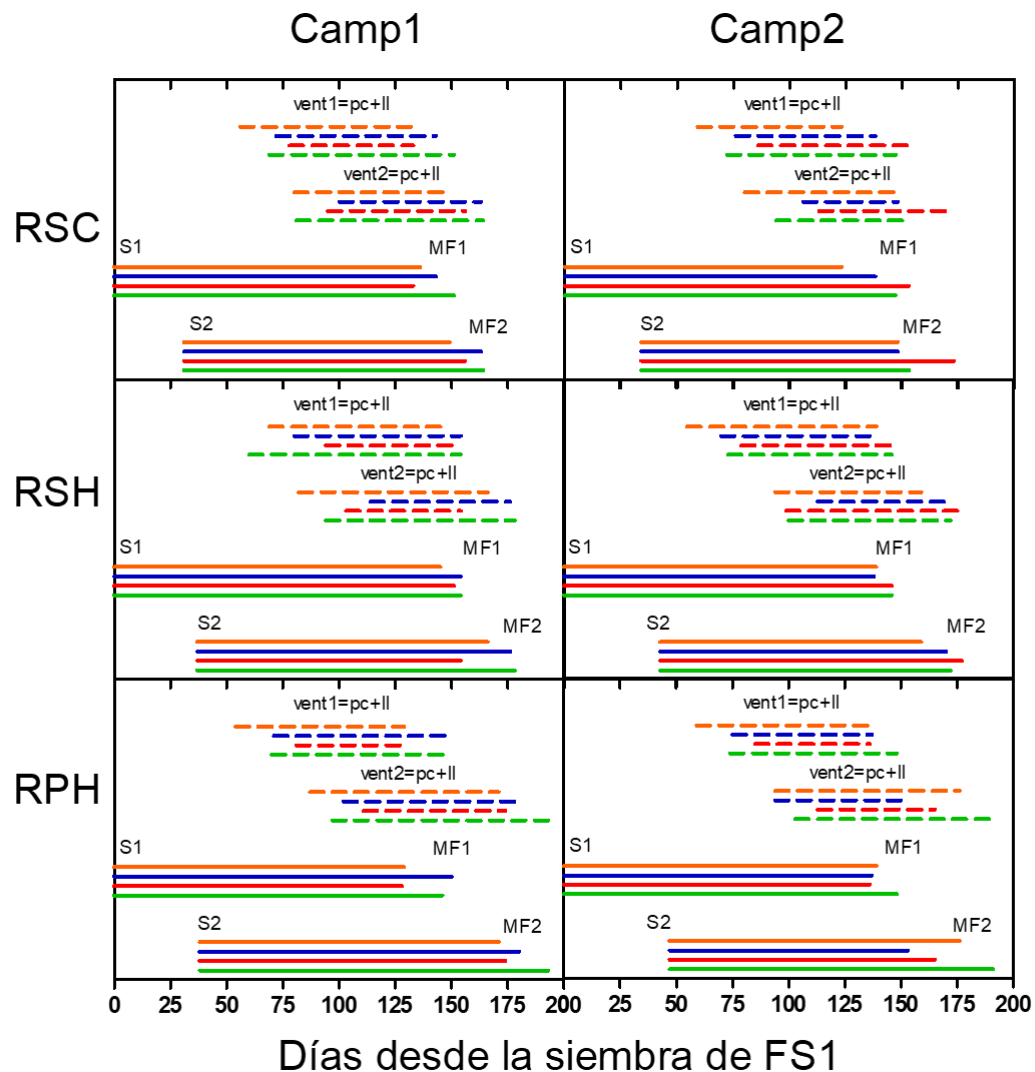


Figura 3.1. Ubicación de la ventana reproductiva (vent) que abarca los periodos críticos y el llenado activo de los granos (pc+ll). Las líneas horizontales gruesas representan la ubicación del ciclo entre la siembra (S) y la madurez fisiológica (MF) de cada especie tomando como referencia los días desde la primera fecha de siembra (FS) en cada campaña (Camp) y ambiente (como en Fig. 2.1). La coloración de las líneas representa a cada cultivo: maíz (anaranjado), maní (azul), soja (rojo) y sorgo (verde). El número 1 es para la FS1 y el 2 para la FS2. En líneas cortadas está representada la ventana reproductiva (vent) de cada especie en cada campaña.

3.2.1 Estimaciones específicas realizadas

Se caracterizaron las variables climáticas para cada etapa de interés. Además de los valores medios de temperatura, radiación incidente, DPV y evapotranspiración potencial (ET_o), se estimaron (i) la oferta hídrica (OH), como la suma de las precipitaciones (P_p), el riego y el agua útil del suelo hasta 2 m de profundidad al inicio de cada etapa

anteriormente mencionada, y (ii) las temperaturas supraóptimas ($hs > 35$), como las horas con temperaturas superiores a 35°C estimadas a partir de la función seno entre la temperatura máxima y la mínima (Logan y Boyland 1983). Se calculó la tasa de crecimiento del cultivo (TCC, en $\text{g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) para el período crítico y el llenado activo del grano según la Ec. 3.1.

$$\text{TCC} = \frac{\text{BT } n - \text{BT } n-1}{\text{día } n - \text{día } n-1} \quad (3.1)$$

donde $n-1$ y n representan el inicio y el fin de la etapa considerada, respectivamente.

El efecto del ambiente sobre el crecimiento de los cultivos se evaluó en función de la respuesta de las variables de interés a un índice de aridez (IA) estimado para cada ventana reproductiva (i.e. un total de 12 índices) según la Ec. 3.2.

$$\text{IA} = 1 - \text{Pp ET}_0^{-1} \quad (3.2)$$

Se obtuvieron así doce índices de aridez para cada especie, que permitieron analizar la respuesta de cada una al ambiente sin incluir características intrínsecas de las mismas más allá de las fenológicas (Fig. 3.2). Las distintas condiciones ambientales dieron lugar a un rango amplio del índice, que varió entre -0.34 para soja en la RPH y 0.86 para maní en la RSC. La distribución de los tratamientos considerando el IA durante la ventana reproductiva (IA_{vent}) se acercó a lo esperado, predominando los valores bajos del índice para la RPH (-0.34 a 0.31) y los altos para las otras regiones (0.23 a 0.80 para RSH y 0.10 a 0.87 para RSC). El IA se calculó también separadamente para el período crítico y el llenado del grano de cada especie.

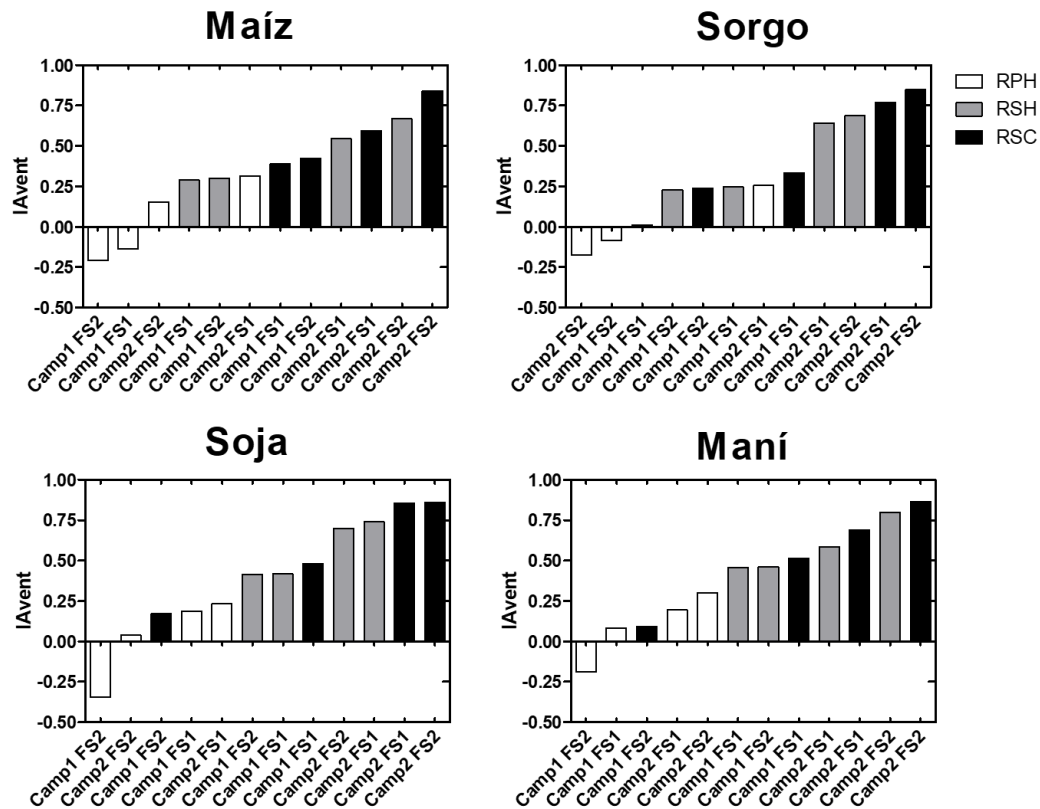


Figura 3.2. Índice de aridez ($1-Pp ET_0^{-1}$) en la ventana reproductiva (IAvent), de cada especie para cada ambiente evaluado. Ambientes ordenados por valores crecientes del índice. Camp: campaña; FS: fecha de siembra. Abreviatura de las regiones (RPH, RSH y RSC) como en Fig. 2.1.

Para que las respuestas al ambiente de las variables de interés (rendimiento en grano, determinantes fisiológicos y componentes numéricos) fueran comparables entre especies, los datos de cada variable se relativizaron respecto al valor máximo obtenido para cada una de ellas (Ec. 3.3).

$$VR_{xn} = (VA_{xn} / V_{MAXx}) \quad (3.3)$$

donde VR_{xn} es el valor relativizado del rasgo 'x' en el ambiente 'n', VA_{xn} es el valor absoluto del rasgo 'x' en el ambiente 'n' y V_{MAXx} corresponde al valor máximo del rasgo 'x' a través de todos los ambientes evaluados.

El dispositivo experimental permitió generar variabilidad para poder analizar las relaciones entre variables a través de los ambientes por análisis de correlación y

componentes principales (ACP) utilizando Infostat (Di Rienzo et al. 2011). Las relaciones correspondientes a aquellas variables ambientales y fisiológicas más estrechamente vinculadas al rendimiento en grano y sus componentes según el ACP se cuantificaron mediante análisis de regresión.

3.3 Resultados

3.3.1 Rendimiento en grano, sus determinantes fisiológicos y condiciones de crecimiento asociadas

Los 12 ambientes explorados mediante la combinación factorial de 2 campañas, 3 regiones y 2 fechas de siembra generaron una amplia variación de condiciones de crecimiento que estuvieron acompañadas de una gran variación del RG y sus determinantes fisiológicos para las cuatro especies estudiadas (Cuadro 3.1). En promedio, la duración de la ventana reproductiva (Dvent) fue similar para maíz (76 días) y sorgo (79 días), pero menos extendida para soja (59 días) y maní (65 días). Sin embargo, su duración varió entre un mínimo de 42 días, para los cultivos de maní sembrados tardíamente durante la segunda campaña en la RSC (Cuadros 3.1 y Suplementario S1), y un máximo de 96 días, para los cultivos de sorgo sembrados tardíamente durante la primera campaña en la RPH.

La variación del RG (Cuadro 3.1) fue mayor para las legumbres (CV de 44.2% para la soja y 66.5% para el maní) que para las gramíneas (CV de 33.7% para el maíz y 38.8% para el sorgo). A su vez, el RG máximo de cada especie correspondió siempre a la RPH, siendo muy superior para las gramíneas C4 que para las legumbres C3 (Cuadro 3.1). Maíz, soja y sorgo lo alcanzaron durante la siembra tardía de la primera campaña y maní durante la siembra temprana de la segunda. El RG mínimo, en cambio, siempre tuvo lugar en la segunda campaña, pero en la RSH para las gramíneas y en la RSC para las legumbres.

Cuadro 3.1. Estadística descriptiva correspondiente al rendimiento en grano, sus determinantes fisiológicos y componentes numéricos para cada especie evaluada. Datos calculados en base al valor promedio de tres repeticiones para cada combinación de Región × Campaña × Fecha de siembra.

Especie	Resumen	RG	BTvent	IC	RFAint-vent	ETc-vent	Dvent	NG	PG
		g m ⁻²	g m ⁻²		MJ m ⁻²	mm	días	# m ⁻²	mg
MAIZ	Media	954	1626	0.49	496	305	76	3702	253.7
	D.E.	321	550	0.04	110	75	8	925	36.3
	CV	34	34	8.17	22	25	10	25	14.3
	Mín	494	801	0.41	368	210	64	2277	197.2
	Máx	1553	2411	0.54	729	464	84	5430	318.1
	Mediana	997	1622	0.50	481	293	78	3682	249.8
SORGO	Media	739	1723	0.34	609	246	80	30899	24.3
	D.E.	287	837	0.05	117	79	10	11158	4.3
	CV	39	49	13.66	19	32	13	36	17.9
	Mín	351	836	0.27	373	125	59	17201	16.2
	Máx	1386	3698	0.42	809	355	96	54344	30.8
	Mediana	679	1418	0.35	612	232	79	32490	25.2
SOJA	Media	291	514	0.30	408	177	59	2049	140.2
	D.E.	129	366	0.07	104	67	9	649	29.4
	CV	44	71	23.85	25	38	15	32	21.0
	Mín	90	189	0.17	216	66	47	872	100.2
	Máx	456	1367	0.39	592	330	78	2782	183.0
	Mediana	289	375	0.32	422	182	59	2177	141.0
MANI	Media	250	530	0.26	492	246	65	461	551.4
	D.E.	166	297	0.14	135	86	10	272	161.4
	CV	67	56	55.69	27	35	16	59	29.3
	Mín	0	73	0.00	317	100	42	0	129.4
	Máx	454	958	0.40	760	360	79	809	691.4
	Mediana	268	499	0.29	471	277	63	533	594.3

BTvent: biomasa total acumulada en la ventana reproductiva; CV: coeficiente de variación; D.E.: desvío estándar; Dvent: duración ventana reproductiva; ETc-vent: evapotranspiración del cultivo acumulada en la ventana reproductiva; IC: índice de cosecha; NG: número de granos por m²; PG: peso individual del grano; RFAint-vent: radiación fotosintéticamente activa interceptada en la ventana reproductiva; RG: rendimiento en grano. Para maní, el valor mínimo de PG no considera los casos de NG= 0.

La producción de biomasa mostró una variabilidad similar a la del RG para el caso de maíz (CV de 33.8%), mayor a la del RG para el sorgo y la soja (CV de 48.5 y 71.2%, respectivamente) y menor a la del RG para el caso de maní (CV de 56.1%). La producción máxima de biomasa durante la ventana reproductiva (Cuadro 3.1) se correspondió con el RG máximo para maíz, sorgo y soja y se verificó en la RPH, pero no coincidió con el RG máximo en maní, que se verificó en la RSH. Al igual que para el RG, los valores mínimos de biomasa durante la ventana reproductiva (Cuadro 3.1) tuvieron siempre lugar durante la segunda campaña (Cuadro Suplementario S1) y coincidieron con el mínimo RG en el caso de maíz, sorgo y maní. En el caso de la soja la mínima biomasa se registró en la RSC pero en la época de siembra tardía (Cuadro Suplementario S1). Las diferentes tendencias

en RG respecto a la biomasa acumulada durante la ventana reproductiva se explicaron a través del índice de cosecha (IC). El maíz fue el cultivo con menor variación del índice de cosecha (CV= 8.2%, rango: 0.41-0.54), seguido por el sorgo (CV= 13.7%, rango: 0.27-0.42), la soja (CV= 23.9%, rango: 0.17-0.39) y el maní (CV= 55.7%, rango: 0-0.40). Para esta última especie se registraron dos casos de RG nulo que dieron lugar a IC= 0 y se verificaron en ambas épocas de siembra de la segunda campaña en la RSC (Cuadro Suplementario S1). Estos casos estuvieron asociados a la imposibilidad de enclavar provocada por el desecamiento prolongado del horizonte superficial.

En cuanto a los recursos empleados para dar lugar al RG y biomasa descritos, los valores medios de radiación fotosintéticamente activa interceptada durante la ventana reproductiva (RFA_{int-vent}) señalaron a la soja como la especie con menor capacidad para capturar radiación (408 MJ m⁻²) y al sorgo como la especie con mayor capacidad (609 MJ m⁻²). Estas diferencias en RFA_{int-vent} no se manifestaron en igual sentido en el caso de las gramíneas para la evapotranspiración media del cultivo durante igual período (ET_{c-vent}), en que el maíz tuvo un consumo 24% superior al del sorgo. En el caso de las legumbres, el consumo hídrico del maní fue un 39% superior al de la soja. Al analizar la variabilidad en el uso de estos recursos, se pudo observar que los valores máximos de RFA_{int-vent} correspondieron siempre a la siembra temprana de la segunda campaña en la RPH (Cuadro Suplementario S1), siendo sorgo>maní>maíz>soja (Cuadro 3.1). En cambio, la condición de crecimiento en la cual se registró la mínima RFA_{int-vent} de cada especie coincidió entre cada grupo de especies. Para las gramíneas ocurrió en la fecha tardía de la segunda campaña en la RSH, mientras que para las legumbres ocurrió en la misma campaña y fecha pero en la RSC. Respecto a la variabilidad en la ET_{c-vent}, los valores máximos (Cuadro 3.1) siempre tuvieron lugar en la siembra temprana de la primera campaña en la RPH (Cuadro Suplementario S1). Los valores mínimos, en cambio,

ocurrieron en la siembra tardía de la segunda campaña para maíz, sorgo y soja, mientras que para maní ocurrieron durante la misma campaña y época de siembra pero en la RSH.

El ACP (Fig. 3.3) explicó más del 67% de la variabilidad total de los datos, con un 42.8-52.4% a través del primer componente (CP1) y un 20.3-29.8% a través del segundo (CP2). Para todas las especies, el CP1 abarcó buena parte de la variación detectada en RG, biomasa acumulada durante la ventana reproductiva (BTvent), oferta hídrica (OHvent), IAvent y DPVvent, aunque esta tendencia fue algo más débil para maní en el caso de las tres últimas variables (vectores más distribuidos entre ambos componentes). El maíz y el maní tuvieron mayores valores relativos de RG, BTvent y OHvent hacia la derecha del eje, mientras que en el sorgo y la soja fue a la inversa. La variación relativa del IC también quedó abarcada por el CP1 para el maní, pero no para el resto de las especies. El CP2 abarcó claramente, para todos los cultivos y en el sentido positivo del eje, a la variación en temperatura media de la ventana (Tmed-vent), y total o parcialmente (i.e. distribuida entre ambos ejes) según la especie a la variación en evapotranspiración potencial (ETo-vent), radiación incidente (Rinc-vent) y horas con temperaturas superiores a 35°C (hs>35vent). Para todas las especies, los valores del ambiente húmedo y regado (RPH) se orientaron siempre hacia valores relativos superiores de los vectores de RG y BTvent (i.e. interceptaron al vector en su trayectoria representada gráficamente), mientras que los de los ambientes sub-húmedo (RSH) y semiárido (RSC) conducidos en secano se orientaron hacia valores relativos inferiores de estas variables (i.e. interceptaron al vector en su trayectoria opuesta en 180° a la representada gráficamente).

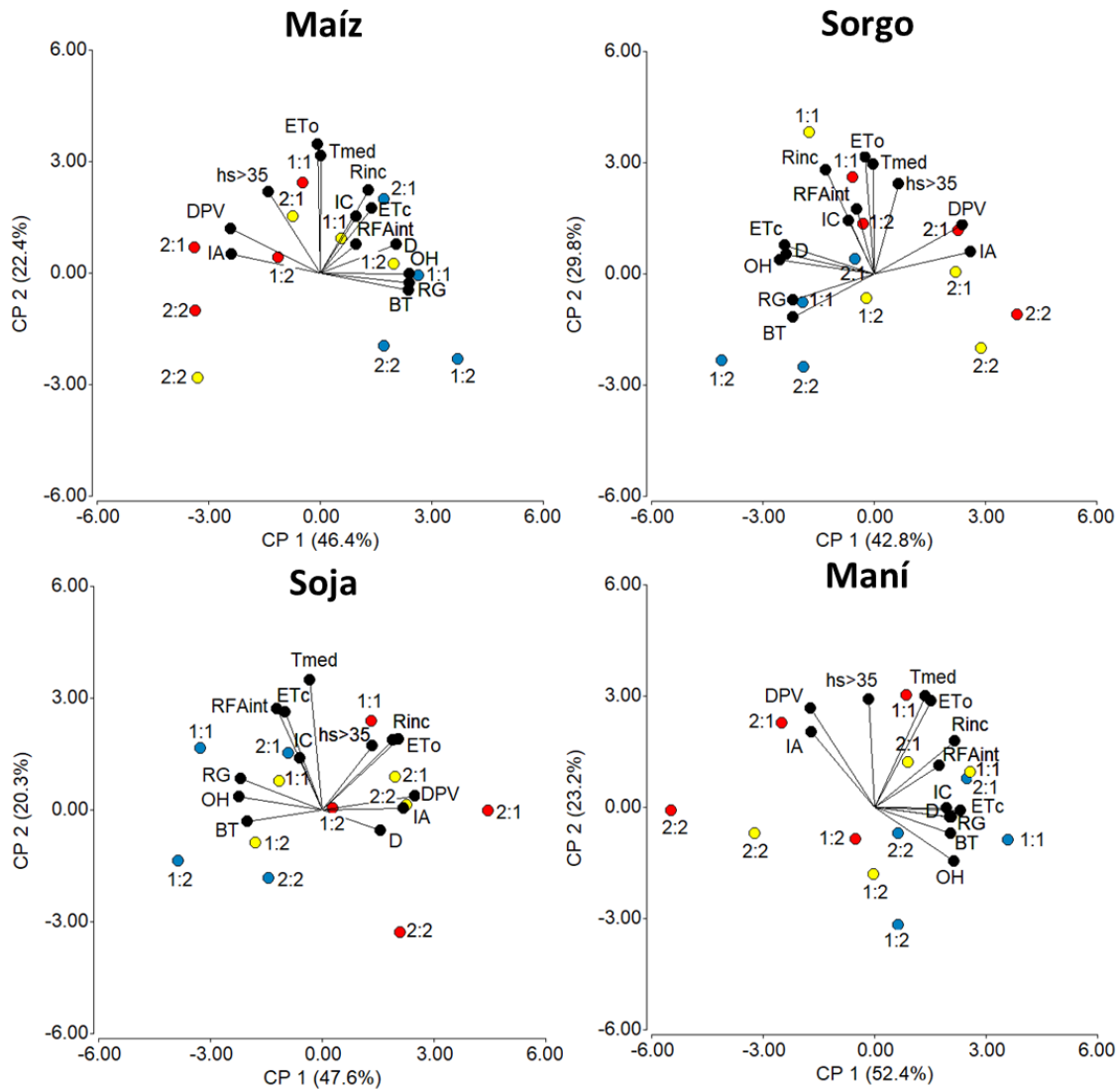


Figura 3.3. Biplot para los dos primeros componentes principales (CP) correspondientes al análisis del rendimiento en grano (RG), sus determinantes fisiológicos y condiciones de crecimiento durante la ventana reproductiva para cultivos de maíz, sorgo, soja y maní creciendo en tres ambientes (RSC: círculos rojos, RSH: círculos amarillos y RPH: círculos azules), durante dos campañas (primer número cercano a cada símbolo) y dos fechas de siembra (segundo número cercano a cada símbolo). Los vectores corresponden a las variables RG, biomasa aérea total (BT), índice de cosecha (IC), índice de aridez (IA), déficit de presión de vapor (DPV), oferta hídrica (OH, como suma de las precipitaciones, el riego y el agua útil del suelo), horas con temperatura $>35^{\circ}\text{C}$ (hs>35), temperatura media (Tmed), duración de la ventana reproductiva (D), radiación incidente (Rinc) y fotosintéticamente activa interceptada (RFAint) acumulada, evapotranspiración potencial (ETo) y evapotranspiración del cultivo (ETc). En las figuras se omitió el subíndice vent para facilitar la visualización.

El ángulo agudo entre los vectores del RG y la OH_{vent} denota una fuerte asociación positiva entre estas variables, mientras que el ángulo obtuso entre cualquiera de ellas con el DPV_{vent} y el IA_{vent} indica una asociación negativa. Así, los altos valores de RG

y biomasa producidos en la RPH (Cuadro Suplementario S1) se asociaron con ambientes de menor nivel de insaturación de la atmósfera y con una mayor proporción de oferta de agua respecto a la demanda. En contraposición, los ambientes de secano tuvieron siempre menor producción relativa de RG, biomasa, oferta hídrica y evapotranspiración que la RPH (los puntos interceptaron a los vectores de estas variables en su proyección en sentido inverso). Los peores desempeños relativos para la RSC y RSH se asociaron fuertemente a la segunda época de siembra de la segunda campaña. Esta respuesta se contrapuso con la alta productividad alcanzada en la RPH en esas condiciones, si bien en este ambiente los RG también fueron mayores en la primera campaña. El ángulo de $\approx 90^\circ$ verificado para todas las especies entre la Tmed-vent y el RG o la BTvent denota una asociación nula entre estas variables, que también se verificó respecto de la ETo-vent para maíz, sorgo y maní. En el caso de soja, el ángulo $>90^\circ$ entre RG y BTvent respecto de ETo-vent denota una asociación negativa casi similar a la indicada para DPVvent e IAvent. Para maíz, sorgo y maní existió una relación predominantemente positiva entre Rinc-vent, RFAint-vent, ETc-vent y duración de la ventana reproductiva (Dvent) y de esta última con RG y BTvent, que no se verificó y hasta tuvo sentido opuesto en el caso de la soja.

Para las gramíneas y la soja, las variaciones del RG se explicaron por las variaciones registradas en la BTvent ($r \geq 0.82$; $P \leq 0.05$; Cuadro Suplementario S2), ya que el IC tuvo poco peso relativo (vector comparativamente corto) y asociación nula (ángulo cercano a 90° del ACP) con el RG. En maní, en cambio, el RG se asoció fuertemente a ambos determinantes fisiológicos ($r \geq 0.89$; Cuadro Suplementario S2). Al considerar la respuesta del RG a las principales variables ambientales determinantes de su variación (IAvent, DPVvent y OHvent) durante la ventana reproductiva (Cuadro Suplementario S2), para todas las especies se verificó que el RG relativo (RGr) tuvo (i) una reducción significativa de entre 44% o más por unidad de variación en el IAvent (Fig. 3.4A), y de

36% o más por unidad de variación en el DPVvent (Fig. 3.4B), y (ii) un aumento de 7% o más por cada 100 mm de oferta hídrica (Fig. 3.4C). La tendencia respecto a la caída del RGr respecto al aumento del índice de aridez ubicó al maní como la especie más sensible, seguida del maíz y la soja con similar comportamiento y finalmente el sorgo con menor sensibilidad, si bien no hubo diferencias significativas entre especies. La caída del RGr respecto al DPVvent distinguió a las legumbres como más sensibles (70-94%) que las gramíneas (36-48%), destacándose siempre el sorgo con menor caída relativa. Las diferencias entre especies respecto a la OHvent discriminaron con mayor sensibilidad a las legumbres (20-26% RGr cada 100 mm de OHvent) respecto de las gramíneas (7-12% RGr cada 100 mm de OHvent), siendo nuevamente el sorgo la especie con menor respuesta.

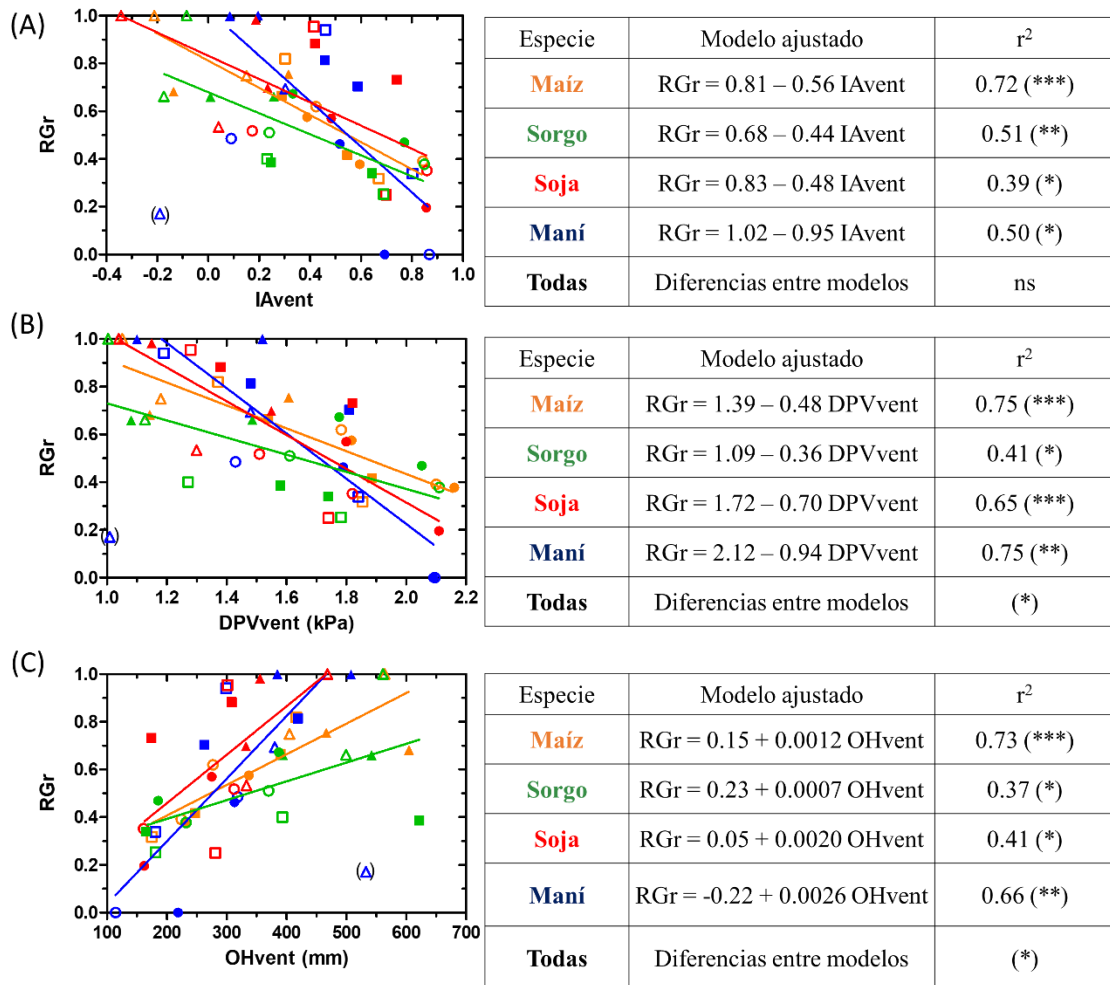


Figura 3.4. Respuesta del rendimiento en grano relativo (RGr) a (A) el índice de aridez (IAvent), (B) el déficit de presión de vapor (DPVvent) y (C) la oferta hídrica (OHvent) durante la ventana reproductiva. La coloración de los símbolos y líneas representa a cada cultivo: maíz (anaranjado), sorgo (verde), soja (rojo) y maní (azul). Los símbolos representan los ambientes (RSC: círculo, RSH: cuadrado, RPH: triángulo), llenos para la siembra temprana y vacíos para la tardía. Las líneas de colores representan los modelos lineales ajustados a cada cultivo y descritos en las tablas acompañantes incluyendo las diferencias entre dichos modelos. Para maní, el punto entre paréntesis no fue considerado en los ajustes por considerarse un fuera de tipo (*outlier*) provocado por temperaturas subóptimas+excesos hídricos para el llenado del grano en la RPH (n= 11). *, **, *** indican significativo para $P \leq 0.05$, 0.01 y 0.001, respectivamente.

3.3.2 Número de granos y peso individual del grano, sus determinantes fisiológicos y condiciones de crecimiento asociadas

Al igual que para los determinantes fisiológicos, la diversidad de condiciones de crecimiento promovió una gran variación en los componentes numéricos del RG (Cuadro 3.1), i.e. el número de granos por m^2 (NG) y el peso individual del grano (PG). El maní fue el cultivo con máxima variación en el NG (CV= 59%) y el PG (CV= 29.3%), mientras que la variación mínima correspondió al maíz tanto para el NG (CV= 25%) como para el PG (CV= 14.3%). Los valores máximos de NG (5430, 809, 2782 y 54344 granos m^{-2} para maíz, maní, soja y sorgo, respectivamente) correspondieron casi siempre a la RPH durante la primera campaña, excepto para la soja que lo maximizó en la misma campaña, pero en la RSH. Los valores mínimos de NG (2277, 0, 872 y 17201 granos m^{-2} , respectivamente) siempre ocurrieron durante la segunda campaña, pero tuvieron lugar en la RSH para las gramíneas y en la RSC para las legumbres, dándose el caso de NG= 0 en ambas épocas de siembra para el maní pues la condición de desecamiento del horizonte superficial no permitió el enclavado. Sin considerar esta condición particular, el NG mínimo para maní tuvo lugar en la segunda época de siembra de la segunda campaña en la RSH (257 granos m^{-2}). Los valores máximos de PG (318, 691, 183 y 30.8 mg, respectivamente) se obtuvieron casi siempre en la RSH, excepto para la soja que maximizó este componente en la RPH (Cuadro Suplementario S1). Maíz, soja y sorgo lo hicieron durante la primera campaña y el maní durante la segunda. Los valores mínimos, en cambio, correspondieron siempre a la segunda fecha de siembra de la segunda campaña en la RSC (197, 0, 100 y 16.2 mg para maíz, maní, soja y sorgo, respectivamente). Sin considerar los casos de RG= 0 de maní, el PG mínimo correspondió a la siembra tardía de la primera campaña en la RPH (129 mg).

El ACP referido a la determinación del NG durante el período crítico explicó, nuevamente, una alta proporción de la variación registrada en las variables analizadas

(>63%; Fig. 3.5), con la mayor proporción de la variación en el CP1 (34.5-54.3 %) respecto al CP2 (17.9-28.9 %). El CP1 tendió a abarcar buena parte de la variación en RG, NG, tasa de crecimiento del cultivo durante el período crítico (TCCpc) e IApc de las cuatro especies, aunque en sorgo (las cuatro variables) y maní (el NG) tendieron a distribuirse más entre ambos componentes. Las tres primeras variables guardaron siempre una relación positiva entre sí y opuesta al IApc. El CP1 también discriminó buena parte de la variación en (i) la OHpc de las cuatro especies, aunque en sorgo un poco más distribuida entre ambos componentes, (ii) el DPVpc de todas excepto el maní, en que se ubicó más sobre el CP2, y (iii) las temperaturas supraóptimas ($hs > 35pc$) y la ETo-pc de los cereales pero no de las legumbres, para las cuales ambas variables se orientaron sobre el CP2. El CP2 abarcó más claramente la variación en Tmed-pc hacia valores positivos del eje. Para todas las especies excepto el maíz (ángulo casi recto y vector de Tmed-pc corto), la Tmed-pc siempre guardó una asociación positiva con la ETo-pc y la Rinc-pc. La relación entre Tmed-pc y RFAint-pc, en cambio, difirió entre gramíneas y legumbres. Para las gramíneas fue positiva y estrecha, pero para las legumbres no. Para todas las especies el NG guardó una relación positiva estrecha con la TCCpc y mucho menos fuerte (prácticamente nula en maíz) con la RFAint-pc. Por último, la variabilidad en ETc-pc se ubicó predominantemente sobre el CP2 para maíz y en posición intermedia entre ambos ejes para el resto de las especies. La asociación del NG con esta variable fue levemente positiva en caso del sorgo y prácticamente nula para las otras especies.

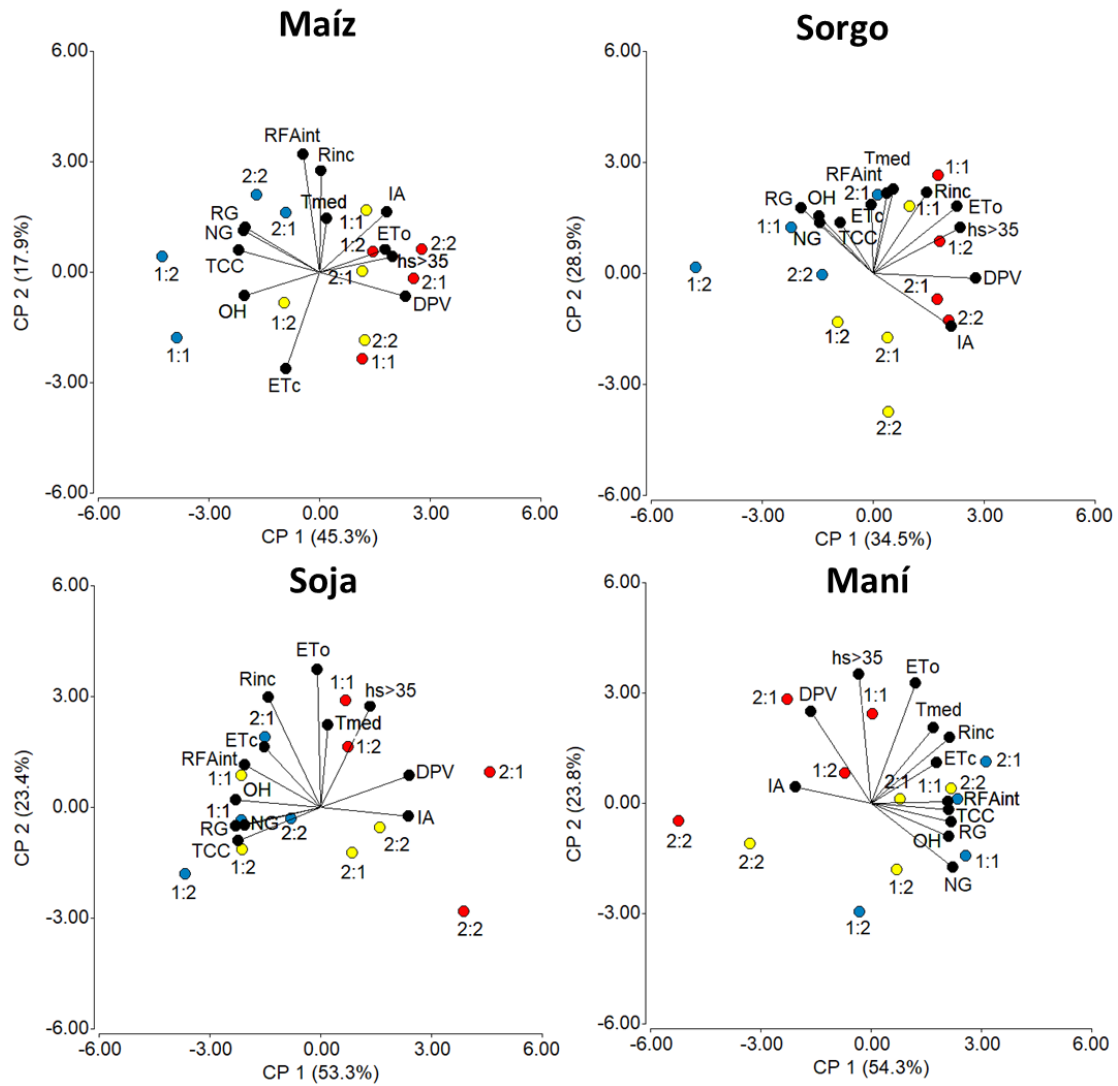


Figura 3.5. Biplot para los dos primeros componentes principales (CP) correspondientes al análisis de la determinación del número de granos (NG), su relación con el RG y condiciones de crecimiento asociadas para cultivos de maíz, sorgo, soja y maní creciendo en tres ambientes, durante dos campañas y dos fechas de siembra. Los vectores corresponden a las variables NG, RG, temperatura media (Tmed), radiación incidente (Rinc) y fotosintéticamente activa interceptada (RFAint), evapotranspiración potencial (ETo), horas con temperatura mayor a 35°C (hs>35), déficit de presión de vapor (DPV), índice de aridez (IA), tasa de crecimiento del cultivo (TCC), evapotranspiración del cultivo (ETc) y oferta hídrica (OH), todas evaluadas para el período crítico (en las figuras se omitió el subíndice pc para facilitar la visualización). Símbolos como en la Figura 3.3.

Respecto a los ambientes, para las gramíneas se destacó claramente la RPH hacia valores relativos superiores del NG y las otras dos regiones hacia valores relativos inferiores. Para las legumbres, en cambio, la RSH tuvo desempeños relativos más similares a los de la RPH (particularmente durante la primera campaña) y ambas claramente superiores a los de la RSC. Para todas las especies se verificó que, tanto en la RSH como en la RSC, las peores condiciones para la determinación del NG preponderaron durante la segunda campaña y generalmente aún más en la segunda fecha de siembra (excepto para soja en RSC en que ambas fechas tuvieron mal desempeño, pero peor para la siembra temprana que para la tardía).

La variación registrada en el NG relativo (NGr) explicó entre un 74 % (maíz) y un 89 % (soja) de la variación observada en el RGr (Fig. 3.6A). En el caso de las pendientes mayores a 1, la abscisa al origen positiva indicaría un RGr nulo cuando el NGr es de sólo un 13.9% o 17.7% del valor potencial en maíz y soja, respectivamente. Por un lado, para todas las especies las variaciones en el NGr estuvieron significativamente explicadas por las variaciones en la TCC relativa de este período (TCCr-pc; Fig. 3.6B). Por otro lado, aunque para todas las especies el NGr respondió positivamente a la oferta hídrica durante el período crítico y negativamente al IApc y el DPVpc (Fig. 3.5) en dicha etapa, sólo las variaciones en DPVpc explicaron las variaciones en el NGr de manera significativa ($P < 0.05$) de las especies evaluadas, aunque no en sorgo (Fig. 3.6C).

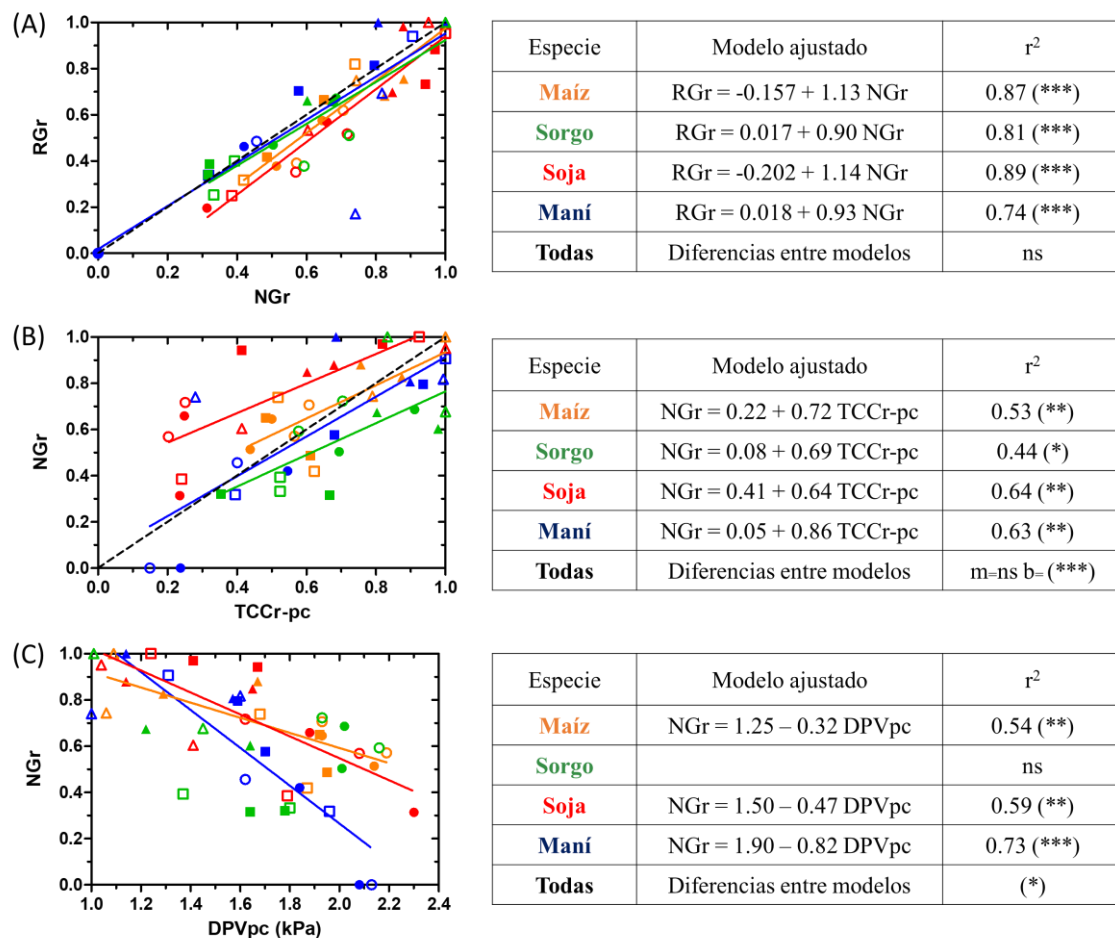


Figura 3.6. Respuesta de (A) el rendimiento en granos relativo (RGr) al número de granos relativo (NGr), (B) el NGr a la tasa de crecimiento del cultivo relativa durante el período crítico (TCCr-pc), y (C) el NGr al DPV durante el período crítico (DPVpc). Símbolos y líneas como en Fig. 3.4. La línea punteada en (A) y (B) representa la relación 1:1. *, **, *** indican significativo para $P \leq 0.05$, 0.01 y 0.001, respectivamente.

Respecto a la determinación del peso individual del grano (PG) y su relación con el RG, el análisis de componentes principales también explicó una alta proporción (>68 %) de la variabilidad total de los datos correspondientes a dichas variables y otras medidas durante el período de llenado del grano, con el CP1 abarcando un 36.1-53.7 % de la misma y el CP2 un 18.6-32.2 % (Fig. 3.7). Para el maíz y la soja, la mayor parte de la variación en PG, RG, OHII, IAIL, DPVII, TCCII y duración del llenado (DII) se ubicó sobre el CP1.

Para el maíz, PG, RG, OHll, TCCll y Dll se ubicaron hacia valores positivos del eje mientras IAll y DPVll lo hicieron hacia valores negativos. Para la soja estas variables se orientaron exactamente al revés del maíz, excepto la Dll que estuvo en antagonismo y no en concordancia con el PG. El sorgo tendió a ubicar la variación de la mayoría de las variables indicadas entre ambos componentes, excepto la OHll y la Dll que mantuvieron su variación sobre el CP1. A diferencia del maíz y la soja, el PG del sorgo tuvo una relación nula (vector en ángulo recto) con la TCCll y el RG, que guardaron una relación estrecha entre sí y opuesta al IAll y el DPVll. El CP2 abarcó claramente la variación en ETo-ll, Rinc-ll, RFAint-ll, Tmed-ll y hs>35ll de maíz y sorgo, mientras que la ETc-ll de estas especies tendió a ubicarse sobre el CP1 (sorgo) o entre ambos componentes (maíz). En el caso de la soja, también ubicaron su variación sobre el CP2 la Tmed-ll y la RFAint-ll, pero la ETo-ll y la ETc-ll invirtieron la distribución de su variación respecto a las gramíneas (la primera ubicó su variación sobre el CP2 y la segunda sobre el CP1). El maní fue la especie más diferente en lo que a determinación del PG se refiere. Si bien su variación se distribuyó entre ambos CPs y en relación nula con el RG como en el caso del sorgo, los mayores valores relativos de PG sí se asociaron con mayores valores relativos de IAll y DPVll y en sentido opuesto a los mayores valores relativos de TCCll, Dll, ETc-ll y OHll.

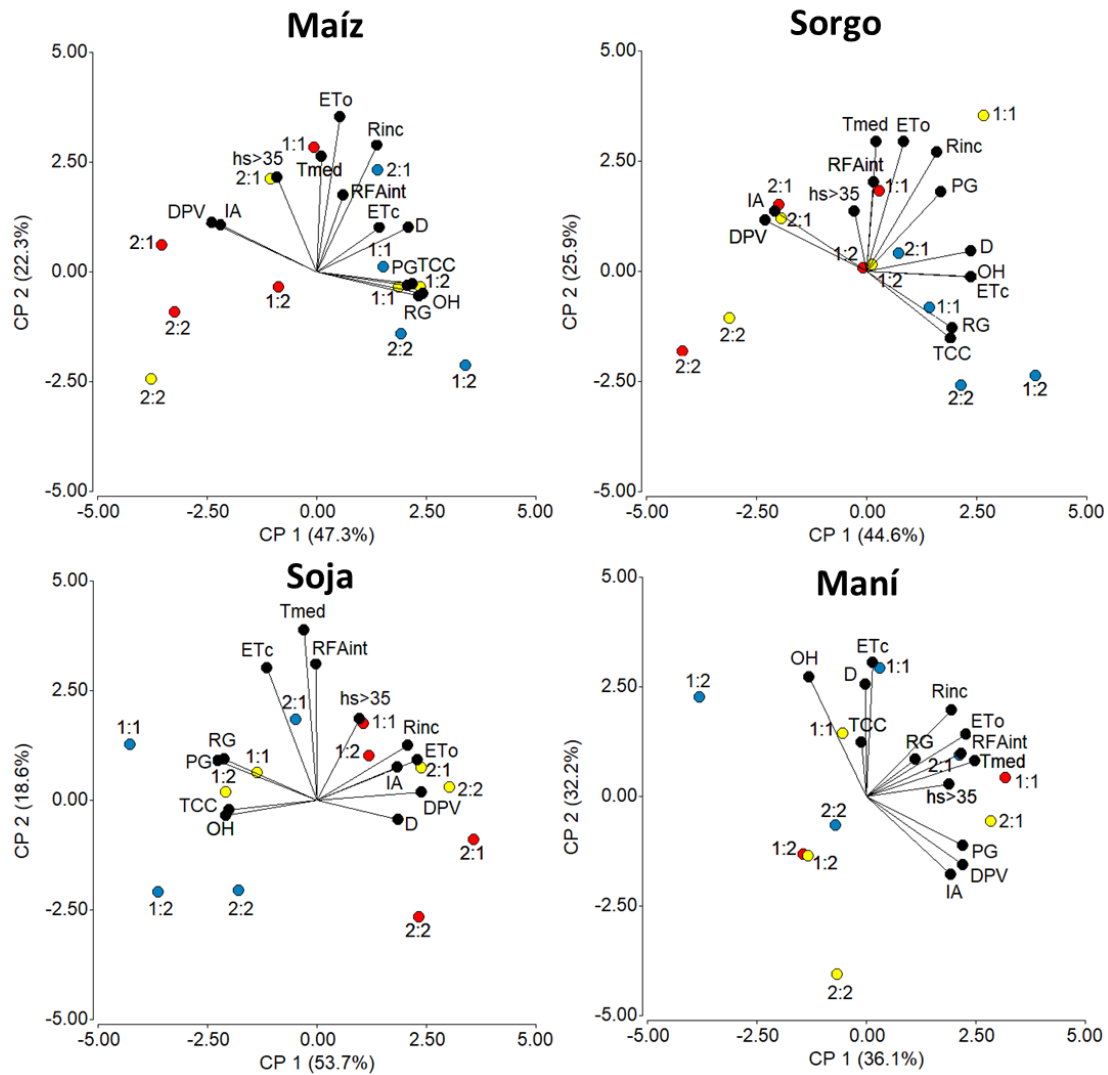


Figura 3.7. Biplot para los dos primeros componentes principales (CP) correspondientes al análisis de la determinación del peso individual del grano (PG), su relación con el RG y condiciones de crecimiento asociadas para cultivos de maíz, sorgo, soja y maní creciendo en tres ambientes, durante dos campañas y dos fechas de siembra. Los vectores corresponden a las variables PG, RG, temperatura media (Tmed), radiación incidente (Rinc) y fotosintéticamente activa interceptada (RFAint), evapotranspiración potencial (ETo), horas con temperatura mayor a 35°C (hs>35), déficit de presión de vapor (DPV), índice de aridez (IA), duración del llenado (D), tasa de crecimiento del cultivo (TCC), evapotranspiración del cultivo (ETC) y oferta hídrica (OH), todas evaluadas durante el llenado de los granos (en las figuras se omitió el subíndice II para facilitar la visualización). Símbolos como en la Figura 3.3.

Para el maíz y la soja se pudo verificar que los mayores valores de PG predominaron en la RPH (sus puntos se ubicaron sobre la proyección del vector correspondiente a valores relativos mayores), acompañados por los de la primera campaña de la RSH en ambas fechas de siembra. Por el contrario, los menores valores relativos de PG de estas

especies correspondieron siempre a la RSC, principalmente en la segunda campaña. El sorgo mostró un comportamiento diferente para este componente del RG, ya que los mayores valores relativos correspondieron a siembras tempranas de los tres ambientes, destacándose los de RSH y RSC de la primera campaña. En el caso del maní, hubo sólo 10 datos de PG debido a dos casos de $NG=0$, ambos correspondientes a la segunda campaña de la RSC. En esta especie, al revés del maíz y la soja, los mejores desempeños correspondieron a las regiones sub-húmeda y semiárida y los peores a la RPH. En cuanto al efecto de la fecha de siembra, además de lo mencionado para sorgo existió una tendencia más clara, aunque contrapuesta, entre las especies gramíneas que entre las legumbres. En el caso del maíz, a diferencia del sorgo, los mayores PG relativos correspondieron a siembras tardías (ambas campañas de la RPH y la primera campaña de la RSH), pero fue más variable el efecto de la fecha de siembra entre los valores relativos más bajos. En el caso del sorgo, en cambio, los menores valores relativos correspondieron siempre a siembras tardías (principalmente de la segunda campaña de las regiones sub-húmeda y semiárida).

Al evaluar la respuesta del RGr al PG relativo (PGr) sólo se detectaron como significativos los efectos positivos ya mencionados en el análisis de componentes principales para maíz y soja (Fig. 3.8A). En función del ajuste obtenido, el RGr resultaría nulo cuando el PGr cae por debajo de un 37.3% en maíz o 38.3% en soja respecto al valor potencial. A partir de ese umbral, la respuesta del RGr al PGr es levemente mayor en soja que en maíz. Para estas dos especies, las variaciones en PGr estuvieron bien explicadas ($P<0.001$) por las variaciones en la tasa de crecimiento del cultivo durante el llenado del grano (Fig. 3.8B), siendo esta tasa principalmente modificada por el DPVII y la oferta hídrica ($P<0.05$; Cuadro Suplementario S4). Con excepción del sorgo, el PGr de todas las especies respondió a la OHII y el DPVII ($P<0.05$; Cuadro Suplementario S4), aunque de manera contrapuesta en el maní respecto al maíz y la soja (Figs. 3.8C y D).

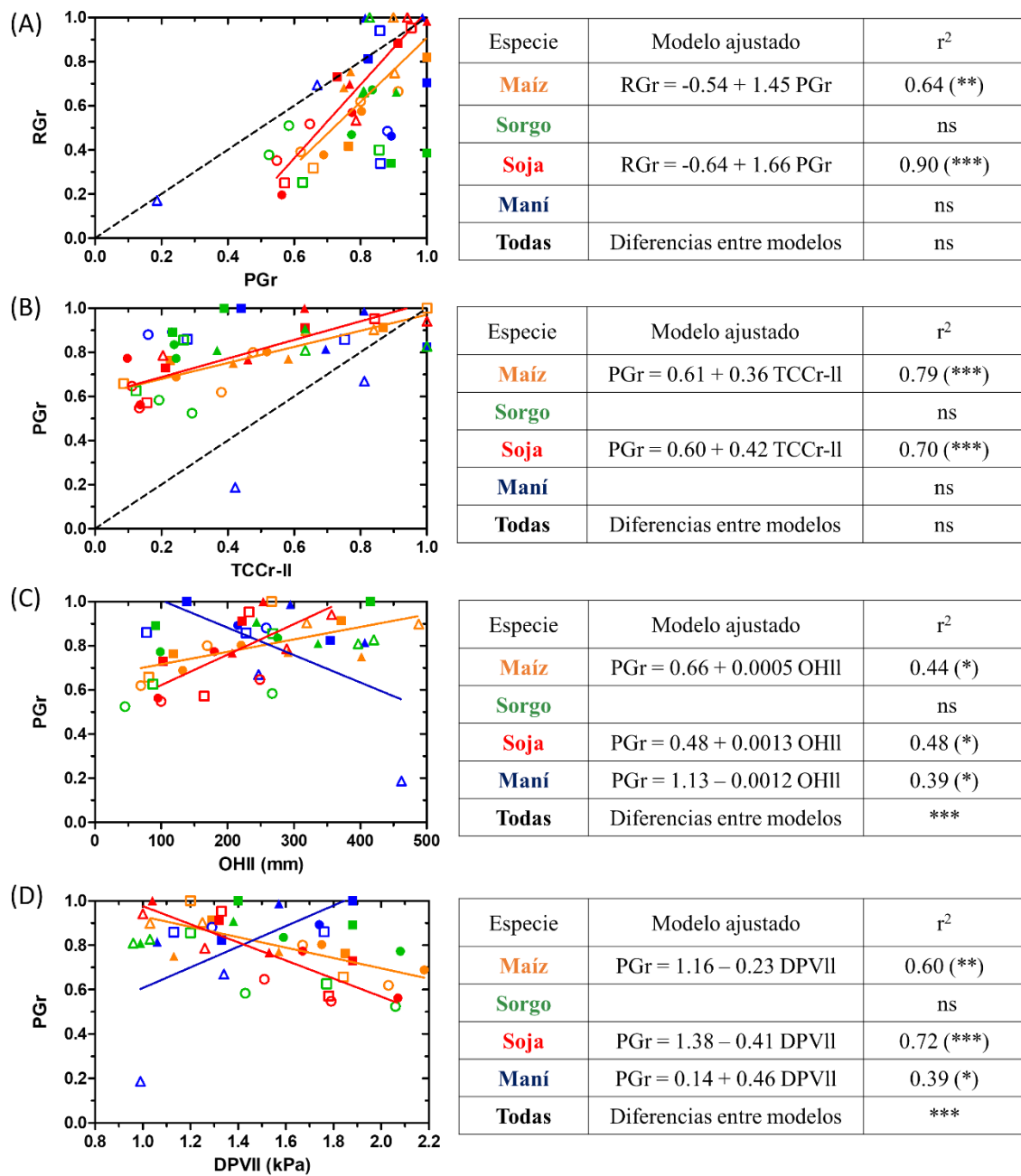


Figura 3.8. Respuesta de (A) el rendimiento en grano relativo (RGr) al peso individual del grano relativo (PGr), (B) del PGr a la TCCr relativa durante el llenado de los granos (TCCr-II), (C) del PGr a la OH durante el llenado de los granos (OHII) y (D) del PGr al DPV durante el llenado de los granos (DPVII). Símbolos y líneas como en Fig. 3.4. La línea punteada en (A) y (B) representa la relación 1:1. *, **, *** indican significativo para $P \leq 0.05$, 0.01 y 0.001, respectivamente.

3.4 Discusión

En el presente capítulo se cuantificó la respuesta del RG, sus determinantes fisiológicos (i.e. BTvent e IC) y los componentes numéricos (NG y PG) de cuatro especies

primavero-estivales para grano (maíz, sorgo, soja y maní) cuando fueron expuestas a variaciones importantes de la oferta hídrica y foto-termal durante el ciclo. A diferencia de estudios previos, en que se evaluó la merma de rendimiento provocada por el déficit hídrico en un único ambiente (tropical árido) y exclusivamente entre cereales (Muchow 1989b) o entre legumbres (Muchow 1985b), en esta tesis se utilizó un conjunto de variables edafoclimáticas para caracterizar el gradiente de condiciones de crecimiento entre tres sitios pertenecientes a tres mega-ambientes contrastantes (húmedo, sub-húmedo y semiárido) de la región templada central de Argentina. En ellos, además, las especies de interés se cultivaron en forma simultánea y el gradiente ambiental se amplió por la combinación de dos campañas agrícolas con dos épocas de siembra contrastantes (temprana y tardía), dando como resultado 12 ambientes.

El dispositivo experimental permitió establecer una respuesta negativa del RG de las cuatro especies al aumento de la aridez y la disminución de la oferta hídrica. Sin embargo, en todos los casos se destacó el sorgo como la especie con RG menos sensible al amplio gradiente explorado, tanto con el DPV como con la oferta hídrica (Fig. 3.4). La menor respuesta al DPV de sorgo respecto al maíz confirma estudios previos en condiciones controladas referidos a una menor tendencia a cambiar su tasa transpiratoria ante cambios del DPV (Choudhary et al. 2020), aunque por otra parte dicha tasa no sería necesariamente más elevada que la de las otras especies estudiadas (Cuadro 3.1). Estas tendencias confirmarían al sorgo como especie mejor adaptada que el maíz a ambientes proclives a sequía (Muchow 1989a,b; Schittenhelm y Schroetter 2014). El presente estudio, además, amplía la comparación respecto a otras especies como soja y maní, con las que también compite por asignación de área cultivada en Argentina y respecto a las cuales no se tenía referencia.

El RG de todas las especies estuvo fuertemente determinado por la producción de biomasa, mientras que el índice de cosecha fue importante sólo en el caso del maní (Fig. 3.3 y cuadro suplementario S2). Así, en condiciones de secano en que la productividad está principalmente limitada por la oferta hídrica (Ittersum y Rabbinge 1997), la variación de este recurso a lo largo del ciclo incide en la producción de biomasa y ésta en el RG tanto de legumbres (Muchow et al. 1993) como de cereales (Muchow 1989b), siendo el efecto negativo de una deficiencia mayor cuando ésta ocurre durante la etapa reproductiva que durante la etapa vegetativa (Andriani et al. 1991; Rao et al. 1985; Sinclair et al. 1990). El índice de cosecha, en cambio, tiende a ser más estable, excepto en condiciones de sequías terminales (Blum 2009) y particularmente cuando las mismas se combinan con una duración del ciclo que reduce más allá de un cierto límite la proporción del agua transpirada durante el llenado de los granos respecto al total de agua transpirada durante el ciclo (Passioura 2006). Sin embargo, también pueden existir reducciones pronunciadas del IC ante deficiencias hídricas de menor duración pero que ocurren en momentos particulares del ciclo de ciertas especies, como el período alrededor de floración en maíz (Hall et al. 1982; Fischer y Palmer 1984) y el de enclavado en maní (Haro et al. 2008, 2011). En ambos casos la consecuencia es una reducción severa del número de granos fijados, con la consecuente disminución del IC, que en el caso particular de esta tesis alcanzó su máxima expresión con un $IC = 0$ para el cultivo de maní durante la segunda campaña en la RSC, independientemente de la fecha de siembra (Fig. 3.4 y Cuadro Suplementario S1). Esta condición fue promovida por la sequía severa ocasionada por la segunda fase consecutiva de *La Niña* que se registró durante la segunda campaña, la cual mantuvo el horizonte superficial seco durante todo el período de enclavado y dio lugar a una fijación de granos nula. Cabe destacar, no obstante, que el segundo valor más bajo de IC en maní (siembra tardía de la primera campaña en la RPH) no correspondió a una

condición limitada por agua sino a un ambiente caracterizado por bajos niveles de irradiación y temperaturas subóptimas, tanto del aire como del suelo. Estas condiciones también pueden limitar el crecimiento de los granos por sus efectos negativos sobre la eficiencia en el uso de la radiación y la actividad de los destinos (Awal y Ikeda 2003; Haro et al. 2007), aunque no necesariamente llegar a detenerlo como una helada. Ese ambiente, por ende, resultó ‘fuera de tipo’ para esta especie en lo referido a las relaciones entre el RG o sus componentes y las variables utilizadas en esta tesis, i.e. aquellas de valor para caracterizar la condición hídrica del ambiente.

Confirmando resultados previos (Board 1987; Craufurd y Peacock 1993; Otegui et al. 1995; Haro et al. 2007), las variaciones del número de granos explicaron las variaciones observadas en el RG de todas las especies estudiadas y estuvieron ligadas con variables determinantes del estatus hídrico del cultivo durante el período crítico. En este sentido, se destacó muy especialmente el DPV durante esa etapa, en particular para los cultivos de maíz, soja y maní (Fig. 3.6C). Si bien existen diferencias entre las cuatro especies en la ubicación de la etapa crítica para la definición del NG, puede generalizarse que este componente está fuertemente asociado con el crecimiento del cultivo en ese intervalo (Craufurd y Peacock 1993; Andrade et al. 1999; Haro et al. 2007; Egli 2011). En dicha etapa, el crecimiento del cultivo es muy sensible a la alta demanda evaporativa (ET_o-pc), especialmente cuando se combina con baja oferta hídrica (Andrade et al. 2002). Los resultados de esta tesis confirmaron que la baja oferta hídrica y alta ET_o de la región semiárida afectan este componente y de ese modo el RG (Fig. 3.5). Para las cuatro especies existen antecedentes de reducciones del NG en el periodo crítico ante condiciones ambientales restrictivas (e.g. deficiencia hídrica y/o nutricional en maíz, Echarte y Tollenaar 2006; D’Andrea et al. 2008; restricciones hídricas y lumínicas en soja, Grassini et al. 2021; rango de calidad ambiental en sorgo, Heinrich et al. 1983; dureza del suelo en

maní, Haro et al. 2008), como también es generalizado el efecto negativo de las temperaturas supraóptimas (maíz, Rattalino Edreira et al. 2011b; soja, Ergo et al. 2018; maní, Vara Prasad et al. 2001; sorgo, Prasad et al. 2008; Prasad y Djanaguiraman 2011). Si bien en esta tesis no se apreció una respuesta negativa del NG a esta última condición, comportamiento probablemente debido a no explorarse temperaturas de intensidad y/o duración equivalentes a las de los ensayos manipulativos como los citados, sí pudo comprobarse una tendencia negativa del NG ante el incremento en la frecuencia de temperaturas supraóptimas en todas las especies (Cuadro Suplementario S3).

A diferencia de lo ocurrido con el NG, se pudo verificar la existencia de comportamientos mucho más diversos del PG que del NG respecto al RG. Por un lado, la relación PG-RG fue muy estrecha para soja y maíz, pero no para maní y sorgo, con un efecto positivo de la TCC durante el llenado sobre el PG de los primeros, pero no de los segundos (Figs. 3.8A y B). Por otro lado, se espera que una mejora en la disponibilidad de asimilados por grano durante el llenado tenga un efecto positivo en el PG de soja y sorgo pero no de maíz (Borrás et al. 2004; Gambín y Borrás 2007). Esta última relación entre una mejora en la disponibilidad de asimilados por grano durante el llenado efectivo del grano y el PG no se exploró en esta tesis y probablemente a ello se deban las diferencias en maíz y sorgo (relación positiva y nula de TCC- PG, respectivamente). A su vez la DII tendió a afectar (i) positivamente al PG en maíz, asociado con la capacidad de las plantas de sostener adecuadamente el suministro de asimilados en esta etapa (Gambín et al. 2006), y (ii) negativamente al PG de la soja, respuesta probablemente asociada al grupo de madurez elegido (GM V), que atrasó la ocurrencia del llenado (Remussi y Pascale 1977) con efectos muy negativos durante la segunda campaña, caracterizada por sequías terminales generalizadas en los tres mega-ambientes.

Respecto a los cultivos en los cuales el RG respondió a los cambios en el PG, tanto el maíz como la soja compartieron la tendencia muy antagónica entre RG, PG, oferta hídrica y tasa de crecimiento del cultivo durante el llenado del grano respecto a IA y DPV en dicha etapa (Fig. 3.7). Existen antecedentes donde se han referido los efectos negativos de ciertos cambios ambientales sobre el PG de estos cultivos, como tratamientos de defoliación en maíz (Echarte et al. 2006) o de sombreado y defoliación en soja (Enrico et al. 2010), evidenciando una disminución en este componente producto de un corte anticipado del llenado ante restricciones en la fuente de asimilados. En el caso del sorgo el RG prácticamente no guardó relación con el PG, que como ya se comentara tuvo poca variación relativa (sección 3.3.2). La literatura existente ha encontrado resultados similares al comparar los componentes del rendimiento de genotipos de sorgo y destacar a los más estables por mantener el PG en los ambientes más restrictivos (Heinrich et al. 1983), dado que el almacenamiento de reservas del tallo durante el llenado de grano estabilizaría este componente bajo cualquier estrés que deprime la fuente fotosintética en dicha etapa (Blum et al. 1997). En el caso del maní, en cambio, el PG tendió a mayores valores relativos en los ambientes de mayor aridez y menor oferta hídrica (Figs. 3.8 C y D). En cuanto a esta respuesta, contrapuesta a la de la otra leguminosa estudiada, probablemente encuentre explicación en efectos negativos de una elevada oferta hídrica para el llenado de granos que se encuentran creciendo inmersos en la matriz del horizonte superficial. Este efecto negativo quizá se explique no sólo por pudrición (principalmente cuando hay más arcilla como en la RPH, que no favorece un drenaje rápido de los excesos hídricos), sino también por una mayor disminución de la temperatura en otoño en los suelos húmedos, con consecuencias negativas sobre el llenado del grano por menor actividad de esos destinos (Awal y Ikeda 2003). A su vez, en antagonismo con el PG, aunque de menor intensidad que el IA y el DPV, se ubicó la frecuencia de temperaturas supraóptimas para los

casos de maíz y soja, pero no para sorgo y maní (Fig. 3.7). Existen evidencias del efecto perjudicial de las temperaturas supraóptimas sobre el PG en maíz (Rattalino Edreira et al. 2014; Mayer et al. 2014) y combinadas con baja oferta hídrica en soja (Ergo et al. 2018; Carrera et al. 2021; Veas et al. 2022), que pueden incluso interrumpir el llenado de los granos.

3.5 Conclusiones

En conjunto, los resultados de este capítulo destacan estrategias contrastantes para las cuatro especies en cuanto a la determinación del RG entre regiones caracterizadas por distintos regímenes hídricos. Estas estrategias se expresaron en sus diferencias en generación de biomasa, partición de biomasa a estructuras reproductivas, fijación y llenado de dichas estructuras.

El RG de las cuatro especies aumentó con la reducción del IA y el DPV y el incremento de la OH, destacándose el sorgo por su mayor estabilidad respecto al DPV y OH. Las tendencias observadas en cuanto a la generación de biomasa y partición permitieron identificar estrategias disímiles entre los cultivos. En los cuatro cultivos el RG se asoció a la producción de biomasa, mientras que el índice de cosecha fue importante sólo en el caso del maní. Finalmente, en cuanto a los componentes del RG, se observó una alta correlación positiva entre el NG y el RG en los cuatro cultivos, no así entre el RG y PG en que la correlación no existió para el caso del sorgo y maní. Precisamente, ambos cultivos difirieron en la respuesta del PG a la OH y al DPV durante el llenado respecto a maíz y soja (respuesta positiva), siendo nula en sorgo y negativa en maní.

**EFICIENCIAS DE USO DEL AGUA Y LA RADIACIÓN EN MAÍZ, SOJA, SORGO Y MANÍ:
ANÁLISIS DE SU ESTABILIDAD A TRAVÉS DE UN GRADIENTE EDAFOCLIMÁTICO EN LA
REGIÓN CENTRAL DE ARGENTINA**

4.1 Introducción

Producir suficientes alimentos para la creciente población mundial a partir de una base de recursos relativamente finita requiere de planteos productivos orientados a un uso eficiente de los mismos (Lobell et al. 2013). Por ello, comprender los mecanismos involucrados en los cambios que se registran en la eficiencia en el uso de la radiación (EUR) y del agua (EUA) en respuesta a cambios en su oferta a través de los ambientes de interés es un aspecto central para mejorar la producción de biomasa, que como se identificó en el Capítulo 3 fue el determinante fisiológico más importante para explicar las variaciones del RG de las cuatro especies.

Si bien se conocen las diferencias en EUR y EUA entre especies C3 como soja y maní respecto a las C4 como maíz y sorgo (Gosse et al. 1986; Sinclair y Muchow 1999), pocos estudios han evaluado las variaciones en dichas eficiencias de manera simultánea cuando los cultivos son expuestos a un rango amplio de condiciones ambientales (i.e. índice de aridez, DPV, $hs > 35^{\circ}\text{C}$, oferta hídrica). Al hacerlo en ambas especies C4, se estableció que tanto la biomasa como la EUR estimada a partir de ella se redujeron en respuesta a la mayor aridez representada como un aumento del DPV (de 0.9 a 2.2 kPa) y dicha reducción fue superior en sorgo que en maíz (Kiniry et al. 1998). Algo similar ocurrió en maní, donde la producción de biomasa se redujo casi a la mitad en secano cuando el DPV aumentó de 1 a 3 kPa respecto al tratamiento bajo riego (Simmonds y Ong 1987). Esa menor biomasa producida en secano, en parte fue producto de la reducción en la capacidad fotosintética representada por la EUR (Simmonds y Ong 1987; Isoda et al. 1996). En soja se ha documentado una EUR estable en ambientes con DPV variable cuando se evaluó en condiciones de riego abundante (Muchow et al. 1993), pero existen evidencias más recientes en esta especie de variabilidad genotípica para la respuesta de la conductancia estomática y la fotosíntesis a variaciones en el DPV (Gilbert

et al. 2011). Las temperaturas extremas también afectan la fotosíntesis y/o la EUR. Por un lado, se destaca el efecto negativo de las temperaturas supraóptimas tanto en especies C4 como el maíz (Cicchino et al. 2010; Rattalino Edreira y Otegui 2012) como en C3 como la soja (Ergo et al. 2018), reduciendo la generación de biomasa y consecuentemente el RG. En sentido inverso, temperaturas subóptimas también afectan estos rasgos, tanto por su efecto directo sobre la capacidad fotosintética para producir biomasa (Andrade et al. 1993) como por su efecto indirecto a través de la actividad de los destinos (Cárcova y Otegui 2001; Awal y Ikeda 2003). Efectos similares se pueden atribuir a la oferta hídrica sobre la EUR, con respuestas negativas provocadas por una restricción en este recurso tanto en maíz y sorgo (Muchow 1989b) como en soja (Muchow 1985) y maní (Haro et al. 2010).

Al igual que con la EUR, el análisis de la variabilidad en la respuesta de la EUA al ambiente destaca el efecto negativo del incremento en el DPV (Dardanelli et al. 1998a,b; Abbate et al. 2004; Kemanian et al. 2005), aunque con diferencias entre especies. Así, tanto el maíz como el sorgo carecieron de la capacidad de reducir su transpiración ante un DPV alto (>3 kPa), mientras que en los moderadamente altos (2-3 kPa) el maíz era capaz de hacerlo mientras que la respuesta del sorgo a esa condición fue sólo la de reducir el área foliar (Choudhary et al. 2020). Ese mismo estudio destacó que el maíz detuvo la transpiración con una mayor humedad del suelo que el sorgo (i.e. mayor sensibilidad al déficit hídrico del primero). Al comparar la EUA evapotranspirada entre una especie C4 como sorgo con una C3 como soja (Teare et al. 1973), se destacó la mayor EUA de la primera durante la etapa vegetativa (7 y 2 g mm⁻¹ m⁻², respectivamente), comportamiento atribuido no sólo al metabolismo fotosintético C4 sino también a un mayor control de la pérdida de agua por el cereal. El mayor control de la pérdida de agua de los cereales es atribuible a una respuesta estomática más sensible a los cambios que

operan en el ambiente (DPV, disponibilidad hídrica del suelo), describiéndose a estas especies como isohigras respecto a las menos sensibles como la soja, que son an-isohigras (Tardieu y Simonneau 1998). En el caso de maní, un estudio comparativo entre las variedades Florman INTA y Manfredi 393 INTA identificó la menor EUA de la primera. Esta respuesta desfavorable se asoció al inicio temprano de su ‘enclavado’ en coincidencia con una etapa de impedancia mecánica en la capa superior del suelo (0-15 cm) y consecuentemente fallas en los clavos para penetrarlo (Collino et al. 2000). Efectos negativos similares se han documentado para la fotosíntesis (Sadras et al. 2000) y la EUR (Bingham et al. 2007) durante el llenado de granos en respuesta a una reducción en el número de granos durante el periodo crítico, destacando la importancia de las interacciones manejo \times fenología \times ambiente en la generación de biomasa y granos.

Finalmente, la comparación entre especies de la respuesta al ambiente de la EUR y la EUA requiere también discernir entre los productos generados durante las etapas vegetativa y reproductiva, especialmente dadas las diferencias en cuanto a la composición de la biomasa que se sintetiza en cada una (Sinclair y Muchow 1999). Las diferencias entre dichas etapas tienden a ser bajas para los cereales y altas para las oleaginosas (Sinclair y Muchow 1999), destacándose además para las legumbres una menor EUR en etapas tempranas atribuible al requerimiento para formación de nódulos (Andrade 1995).

Los objetivos de este capítulo fueron evaluar y analizar la variación de la EUR y la EUA de maíz, soja, sorgo y maní creciendo a lo largo de un rango ambiental amplio generado por el uso de fechas de siembra contrastantes (temprana y tardía) durante dos ciclos agrícolas (Camp1 y Camp2) a lo largo de una transecta edafoclimática entre las regiones Húmeda (RPH), Sub-Húmeda (RSH) y Semiárida (RSC) de la zona central de Argentina.

4.2 Materiales y Métodos

En el presente capítulo, las variables de interés para cada combinación de especie y ambiente se calcularon para todo el ciclo (identificado con el subíndice ‘c’) y para dos etapas de éste: vegetativa (subíndice ‘veg’) y reproductiva (subíndice ‘rep’). Cada una de estas etapas abarcó los períodos en los cuales el crecimiento correspondió esencialmente a órganos vegetativos o reproductivos (Fig. 4.1). Según la especie estas etapas fueron, respectivamente, (i) pre R1 y post R1 en maíz (Ritchie y Hanway, 1982), (ii) pre R3 y post R3 en soja (Fehr y Caviness, 1977) y maní (Boote, 1982), y (iii) pre E6 y post E6 en sorgo (Vanderlip, 1993).

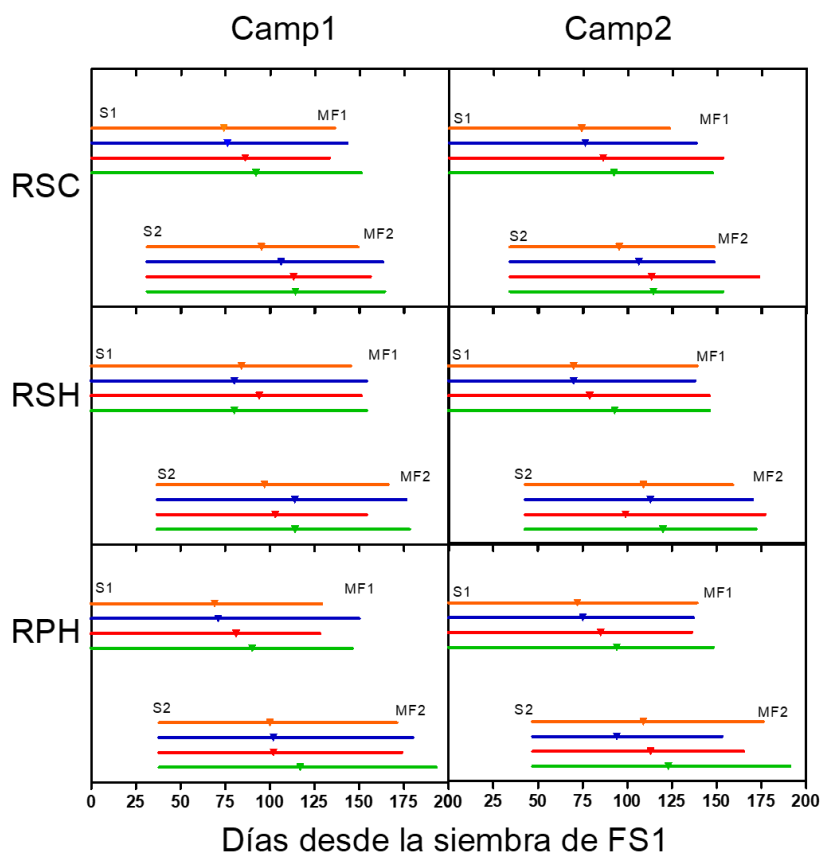


Figura 4.1. Duración de las etapas vegetativa (pre-triángulo invertido) y reproductiva (post-triángulo invertido) de cada especie en función de los días desde la siembra (S_n) de la primera fecha de siembra (FS1) y hasta la madurez fisiológica (MF n). El triángulo invertido indica la ocurrencia de R1 en maíz (naranja), E6 en sorgo (verde) y R3 en soja y maní (rojo y azul, respectivamente). Abreviaturas como en Fig. 3.1.

Las condiciones de crecimiento, el diseño experimental y los cálculos para estimar las eficiencias de uso de la radiación (EUR) y del agua (EUA) están detallados en el Capítulo 2. Los cálculos para estimar el índice de aridez (IA) y la oferta hídrica (OH) en el ciclo y en cada etapa (vegetativa y reproductiva) están detallados en el Capítulo 3.

Los resultados se sometieron a análisis de componentes principales (ACP), correlación y regresión como los aplicados en el Capítulo 3.

4.3 Resultados

4.3.1 Generación de biomasa y eficiencia en el uso de recursos correspondientes a todo el ciclo

Los 12 ambientes explorados generaron una amplia variación de condiciones de crecimiento, las cuales estuvieron acompañadas de una gran variación de la biomasa total aérea acumulada durante todo el ciclo (BTc) y sus determinantes fisiológicos para las cuatro especies estudiadas (Cuadro 4.1). En promedio, la duración total del ciclo (Dc) fue similar para sorgo (136 días) y maní (135 días), pero menos extendida para maíz (129 días) y soja (126 días). Sin embargo, Dc varió entre un mínimo de 106 y un máximo de 154 días, ambos casos correspondientes a cultivos de maní en la RSH, el primero sembrado tardíamente durante la segunda campaña (Camp2) y el segundo temprano durante la primera campaña (Camp1).

Cuadro 4.1. Estadística descriptiva referida a los valores correspondientes a todo el ciclo (identificado con la letra ‘c’) de la biomasa total y sus determinantes fisiológicos para cada especie evaluada. Datos calculados en base al valor promedio de tres repeticiones para cada combinación de Región × Campaña × Fecha de siembra.

Especie	Resumen	BTc g m ⁻²	EURc g MJ ⁻¹	EUAc g mm ⁻¹	RFAint-c MJ m ⁻²	ETc-c mm	Dc días
MAIZ	Media	1934	2.90	3.85	661	506	129
	D.E.	622	0.67	1.22	125	80	10
	CV	32	23.09	31.67	19	16	8
	Mín	1028	1.75	2.47	489	368	114
	Máx	2970	3.87	6.13	912	644	145
	Mediana	1908	2.86	3.35	632	486	129
SORGO	Media	2182	2.48	4.18	878	513	137
	D.E.	861	0.85	1.27	156	82	9
	CV	39	34.42	30.34	18	16	7
	Mín	1063	1.56	2.76	564	386	119
	Máx	3762	4.18	6.35	1200	638	148
	Mediana	1792	2.26	3.72	882	522	138
SOJA	Media	975	1.30	1.86	734	519	127
	D.E.	401	0.34	0.71	196	85	11
	CV	41	26.42	38.05	27	16	9
	Mín	361	0.82	0.86	438	418	113
	Máx	1731	2.07	3.38	1082	736	151
	Mediana	978	1.20	1.89	735	511	127
MANI	Media	867	1.23	1.63	694	533	135
	D.E.	268	0.27	0.46	130	74	14
	CV	30.84	21.61	28.04	18.77	13.92	10
	Mín	452	0.87	0.90	522	404	106
	Máx	1234	1.73	2.40	984	670	154
	Mediana	877	1.24	1.62	711	510	138

BTc: biomasa total aérea acumulada en el ciclo; CV: coeficiente de variación; D.E.: desvío estándar; Dc: duración del ciclo; ETc-c: evapotranspiración del cultivo acumulada en el ciclo; EURc: eficiencia en el uso de la RFAint-c; EUAc: eficiencia en el uso del agua en base a ETc-c; RFAint-c: radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada en el ciclo; Mín: mínimo; Máx: máximo.

La variación de la BTc (Cuadro 4.1) fue mayor para soja (CV de 41.1%) y sorgo (CV de 39.4%) que para maíz (CV de 32.1%) y maní (CV de 30.8%). Promediando los valores medios de BTc, los correspondientes a las gramíneas más que duplicaron ($\times 2.23$) a los de las legumbres. A su vez, la BTc máxima de cada especie correspondió siempre a la RPH (Cuadro Suplementario S5), destacándose la superioridad del sorgo entre las gramíneas y de la soja entre las legumbres (Cuadro 4.1). Maíz, soja y sorgo alcanzaron la máxima BTc durante la siembra tardía de la primera campaña y maní durante la siembra temprana de la segunda (Cuadro Suplementario S5). La BTc mínima, en cambio, siempre

tuvo lugar en la segunda campaña, pero en la RSH para las gramíneas y soja y en la RSC para maní (Cuadro Suplementario S5).

Respecto a la captura de recursos durante el ciclo, los valores medios de radiación fotosintéticamente activa interceptada (Cuadro 4.1) señalaron al maní como la especie con menor capacidad para capturar radiación (694 MJ m^{-2}) y al sorgo con la máxima (878 MJ m^{-2}). La evapotranspiración total del cultivo (ETc-c), en cambio, fue en promedio muy similar para las cuatro especies (506-533 mm). Mientras los valores máximos de RFAint-c (Cuadro 4.1) correspondieron siempre a la siembra temprana de la segunda campaña en la RPH (Cuadro Suplementario S5), la condición de crecimiento en la cual se registró el valor mínimo de cada especie fue la fecha tardía de la segunda campaña en la RSH, excepto para el maní. Para esta última especie ocurrió en la misma campaña y época de siembra pero en la RSC. Respecto a la variabilidad en la ETc, los valores máximos siempre tuvieron lugar en la siembra temprana de la primera campaña en la RPH. Los valores mínimos, en cambio, ocurrieron en la siembra tardía de la segunda campaña en la RSH, coincidentemente con una duración de ciclo corta (116, 113, 129 y 127 días para maíz, soja, sorgo y maní, respectivamente).

Los valores medios de eficiencia en el uso de la radiación para producir BTc (EURc; Cuadro 4.1) permitieron identificar entre las legumbres al maní con una eficiencia (1.23 g MJ^{-1}) 5.4% inferior a la soja (1.30 g MJ^{-1}) y entre las gramíneas al sorgo (2.48 g MJ^{-1}) con una eficiencia 14.5% inferior al maíz (2.90 g MJ^{-1}). Al analizar la variabilidad en esta eficiencia, se pudo observar que los valores máximos de EURc para maíz, soja y sorgo coincidieron con los de BTc y correspondieron a la siembra tardía de la primera campaña en la RPH. En el caso de maní, en cambio, la EURc máxima se registró en la misma combinación de Camp \times FS pero de la RSH. En cuanto a la EURc mínima, para las gramíneas ocurrió en la siembra temprana de la segunda campaña en la RSH, pero no

para las legumbres. Entre estas últimas sólo hubo coincidencia con las gramíneas en cuanto a la campaña, pero en el maní correspondió a la siembra temprana en la RSC y en soja a la siembra tardía de la RSH.

Las diferencias comentadas para la EURc media se mantuvieron para la EUAc media en el caso de las legumbres (la de soja fue un 14% superior a la del maní) pero no en el caso de las gramíneas (la del sorgo fue un 8.6% superior a la del maíz). Respecto a la variabilidad en la EUAc, los valores máximos ocurrieron siempre en la primera campaña y en coincidencia con los máximos de EURc (Cuadro 4.1). Los valores mínimos de EUAc, en cambio, tuvieron lugar siempre en la segunda campaña (Cuadro 4.1), coincidiendo con los mínimos de EURc en el caso de las legumbres, pero no en el de las gramíneas. Para estas últimas ocurrieron en la siembra temprana de la RSC para maíz y en la siembra tardía de la RSH para sorgo.

El ACP (Fig. 4.2) explicó entre un 67.6% (maní) y un 79.7% (sorgo) de la variabilidad total de los datos, con un 43.9-55.4% a través del primer componente (CP1) y un 22.7-24.3% a través del segundo (CP2). Para todas las especies, el CP1 abarcó buena parte de la variación detectada en BTc, OHc, IAc, hs>35c, DPVc, EURc y EUAc, y parte de la variación detectada en RFAint-c (excepto en sorgo, que fue abarcada por el CP2) y ETc-c (excepto en maíz, que fue abarcada por el CP2). Para la mayoría de las especies, la Tmed-c tuvo poco peso relativo en el análisis (vector corto), excepto para el sorgo en que también quedó abarcada principalmente por el CP1 y en sentido contrario a la producción de biomasa y las eficiencias en uso de recursos. Para el maíz y el maní los valores relativos mayores de BTc y variables positivamente asociadas a ella se ubicaron hacia la izquierda del eje, para el sorgo y la soja a la inversa. A su vez, para maíz y maní este componente distinguió en general al ambiente húmedo y regado (RPH), hacia valores

negativos del eje, de los ambientes sub-húmedo (RSH) y semiárido (RSC) conducidos en seco, hacia valores positivos del eje. En el caso del sorgo y soja fue a la inversa.

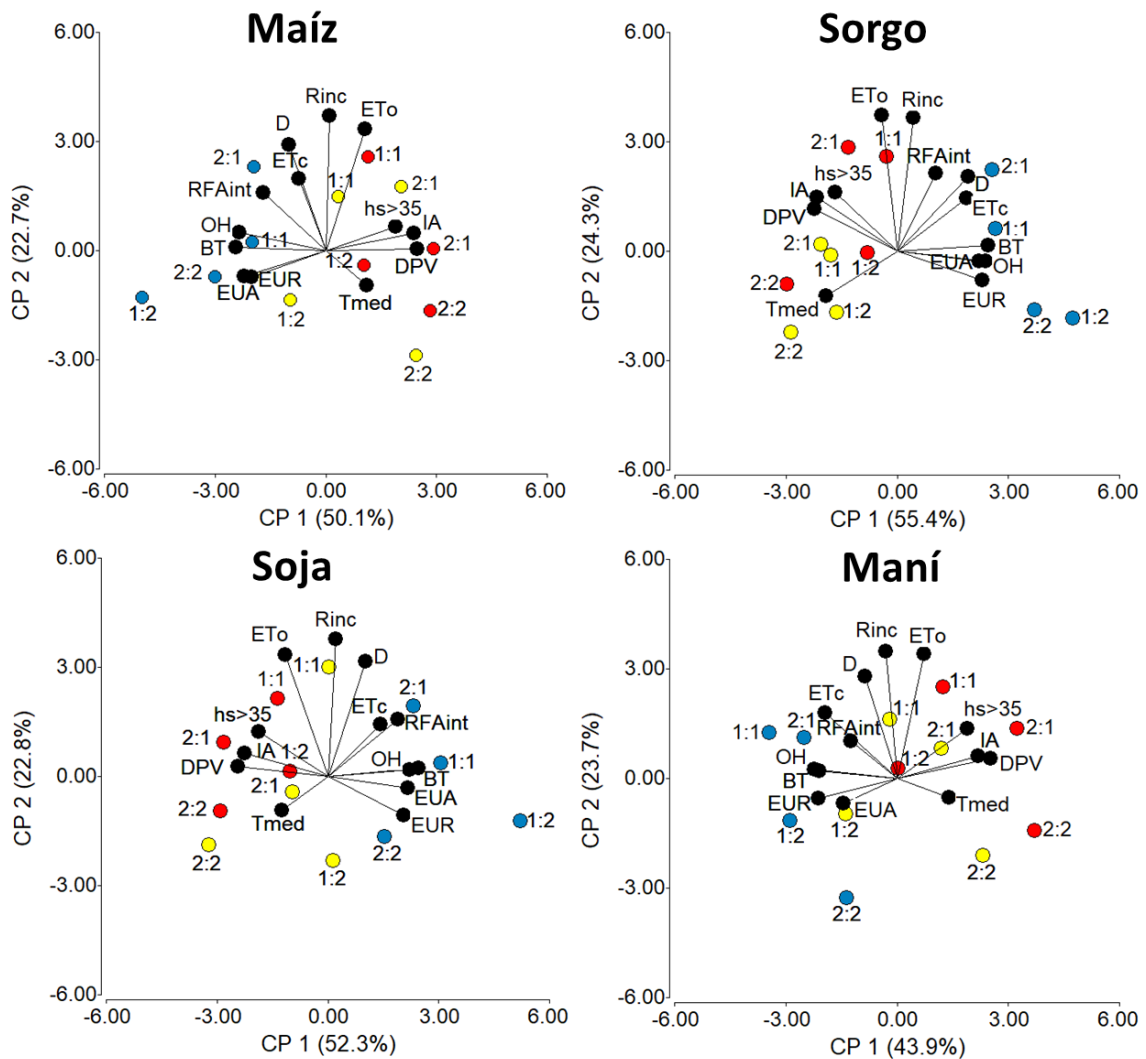


Figura 4.2. Biplot para los dos primeros componentes principales (CPn) correspondientes al análisis de la eficiencia en el uso de la radiación y del agua durante todo el ciclo (EUR y EUA, respectivamente) y condiciones de crecimiento asociadas para cultivos de maíz, sorgo, soja y maní creciendo en tres ambientes (RSC: círculos rojos, RSH: círculos amarillos y RPH: círculos azules), durante dos campañas (primer número cercano a cada símbolo) y dos fechas de siembra (segundo número cercano a cada símbolo). Los vectores corresponden a las variables EUR, EUA, biomasa aérea total (BT), índice de aridez (IA), déficit de presión de vapor (DPV), oferta hídrica (OH), horas con temperatura >35°C (hs>35), temperatura media (Tmed), duración del ciclo (D), radiación incidente (Rinc) y fotosintéticamente activa interceptada (RFAint) acumuladas, evapotranspiración potencial (ETo) y evapotranspiración del cultivo (ETC), todas correspondientes al ciclo entre emergencia y madurez fisiológica de cada especie (en las figuras se omitió el subíndice para facilitar la visualización).

El CP2 abarcó para todos los cultivos la variación en evapotranspiración potencial (ET_{o-c}), radiación incidente (Rinc-c) y duración del ciclo (Dc) en el sentido positivo del eje, aunque en el caso del sorgo la Dc se distribuyó entre ambos componentes. El ángulo de 90° entre Rinc-c y ET_{o-c} con las variables indicadas en el CP1 denota una asociación nula entre los dos grupos, particularmente con BT_c. El CP2 también distinguió ambas épocas de siembra, con la FS1 hacia valores positivos (i.e. acumulan más Rinc-c y ET_{o-c} a lo largo de un ciclo más prolongado) y la FS2 hacia los negativos (i.e. tendencia opuesta para las variables indicadas).

El ángulo agudo entre los vectores de BT_c, EUR_c, EUAc y OH_c denota una fuerte asociación positiva entre estas variables, mientras que el ángulo obtuso entre cualquiera de ellas con el DPV_c, el IAc y las $hs > 35c$ indica una asociación negativa. A su vez, la BT_c guardó siempre una relación más estrecha con la eficiencia en el uso de recursos que con la cantidad de recursos capturados o la Dc. La cantidad de recursos capturados, en cambio, sí tendió a asociarse con la duración del ciclo (Dc), y más fuertemente para la radiación solar (RFA_{int-c}) que para el consumo de agua (ET_{c-c}). La relación de la captura de recursos, en general, fue menos robusta con la oferta de los mismos, tanto en el caso de la radiación solar (Rinc-c) como de la demanda evaporativa (ET_{o-c}).

Respecto a la producción de biomasa a través de los diferentes ambientes, los mayores valores relativos correspondieron a la RPH (puntos ubicados sobre la trayectoria representativa de valores relativos superiores del vector) y los menores a los ambientes de secano (los puntos interceptaron a los vectores de estas variables en su proyección en sentido inverso). Los peores desempeños relativos para la RSC y RSH se asociaron fuertemente a la segunda época de siembra de la Camp2. Esta respuesta se contrapuso con la alta productividad alcanzada en la RPH en esas condiciones, si bien en este ambiente la BT_c fue mayor en la Camp1.

Al considerar la respuesta de la EURr-c a las principales variables ambientales determinantes de su variación durante el ciclo (OHc y DPVc), para todas las especies se verificó que la EURr-c tuvo (i) un aumento significativo de entre 6.9% o más por cada 100 mm de OHc (Fig. 4.3A) y (ii) una reducción de 40% o más por unidad de variación en el DPVc (Fig. 4.3B). En el caso de maní, la EURr-c no tuvo respuesta al incremento en la OHc. Al igual que para la EURr-c, la EUAr-c estuvo principalmente modificada por la OHc y el DPVc ($P < 0.05$), con excepción del maní para la OHc. Al considerar la respuesta de la EUAr-c a ambas variables ambientales, para todas las especies se verificó que ésta tuvo (i) un aumento significativo de ca. 7% por cada 100 mm de oferta hídrica (Fig. 4.4A) y (ii) una reducción de 44% o más por unidad de variación en el DPVc (Fig. 4.4B).

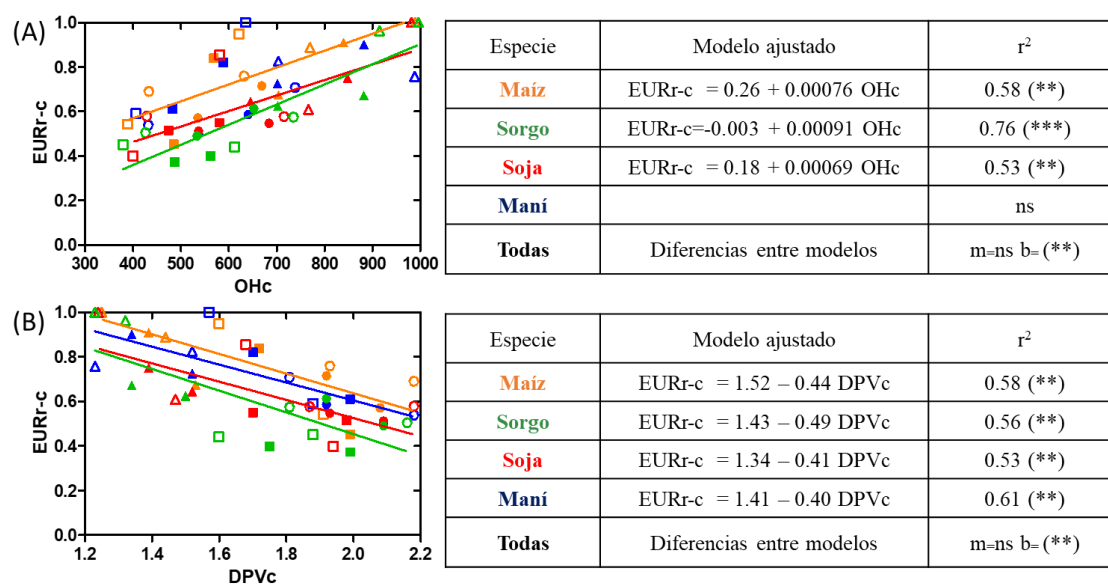


Figura 4.3. Respuesta de la EURr-c a (A) la OHc y (B) el DPVc. La letra ‘c’ denota el ciclo completo. La coloración de los símbolos y líneas representa a cada cultivo: maíz (anaranjado), sorgo (verde), soja (rojo) y maní (azul). Los símbolos representan los ambientes (RSC: círculo, RSH: cuadrado, RPH: triángulo), llenos para la siembra temprana y vacíos para la tardía. Las líneas de colores representan los modelos lineares ajustados a cada cultivo y descritos en las tablas acompañantes incluyendo las diferencias entre dichos modelos. *, **, *** indican significativo para $P \leq 0.05$, 0.01 y 0.001, respectivamente.

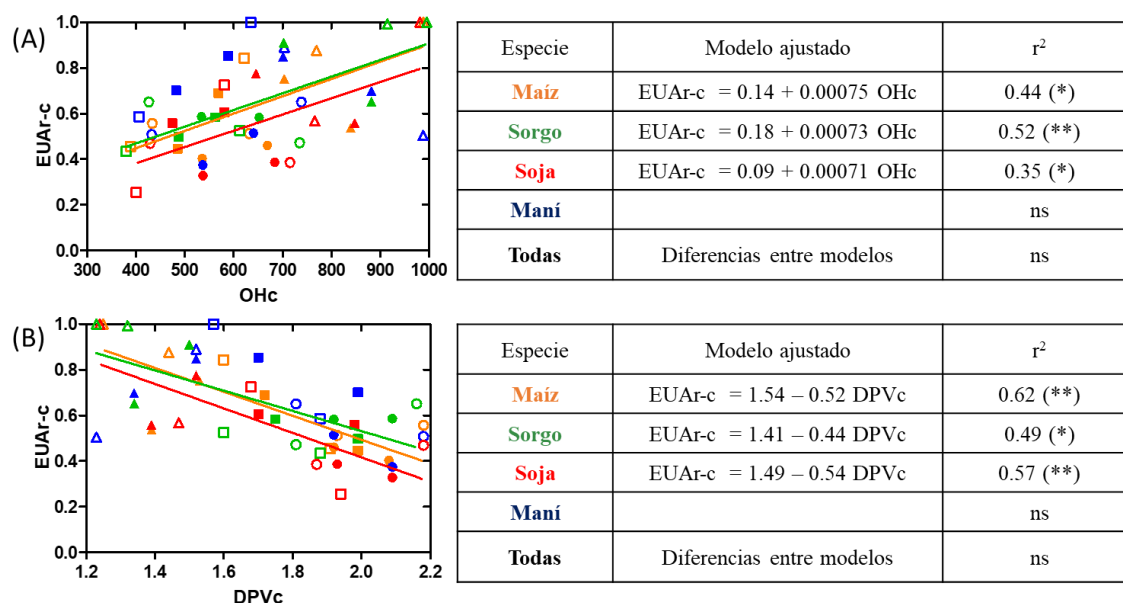


Figura 4.4. Respuesta de la eficiencia en el uso del agua relativa (EUAr-c) a (A) la OHc y (B) el DPVc. Símbolos y líneas como en Fig. 4.3. *, **, *** indican significativo para $P \leq 0.05$, 0.01 y 0.001, respectivamente.

4.3.2 Generación de biomasa y eficiencia en el uso de recursos en la etapa vegetativa

En el caso de la etapa vegetativa, nuevamente ambos componentes principales explicaron más del 70 % de la variación registrada en las variables analizadas, excepto en maní que fue del 63.3% (Fig. 4.5). La mayor proporción de la variación se registró en el CP1 (40.8-50.9%) respecto al CP2 (20.9-34.6%). El CP1 tendió a abarcar buena parte de la variación en BTveg, EUAveg, EURveg y OHveg en todos los cultivos excepto en maní. En este último, tanto la BTveg como las eficiencias de uso de recursos fueron principalmente explicadas por el CP2, mientras la OHveg se distribuyó entre ambos componentes, pero en ángulo recto con la BTveg (i.e. sin guardar asociación con ella). Para esta legumbre, tampoco el nivel de insaturación del aire (DPVveg) o la condición de aridez del ambiente (IAveg) o las temperaturas supraóptimas ($hs > 35veg$) modificaron negativamente la capacidad de producir biomasa como lo hicieron en las otras especies, y sólo la cantidad

de radiación interceptada durante la etapa vegetativa (RFA_{int-veg}) se destacó como variable ligada a las condiciones del ambiente capaz de modular dicha capacidad. Si bien la BT_{veg} siempre se asoció positivamente con la EUR_{veg} y la EUA_{veg}, para sorgo y maní el peso relativo (i.e. dimensión del vector) de ambas eficiencias fue similar, mientras que para maíz y soja el peso relativo de la EUR_{veg} fue inferior al de la EUA_{veg}. En cuanto al uso de recursos, la evapotranspiración del cultivo (ET_{c-veg}) y la cantidad de radiación interceptada (RFA_{int-veg}) tendieron a asociarse positivamente con la BT_{veg} en todas las especies, aunque la intensidad de dicha relación (ángulo de los vectores) varió entre ellas, siendo (i) maíz>maní≈soja>sorgo para la RFA_{int-veg} (para sorgo fue casi nula), y (ii) maní>sorgo≈soja>maíz para la ET_{c-veg} (para maíz fue casi nula). En el caso del maíz, esta última variable tuvo un peso relativo muy bajo en la explicación de la variabilidad de los datos.

La temperatura media (T_{med-veg}), cuya ubicación respecto a los CPs difirió entre especies (sobre CP2 en maíz, entre ambos componentes en sorgo y soja, o sin peso relativo en el análisis en maní), tuvo una relación nula (maíz) o negativa (soja y sorgo) con las eficiencias de uso de recursos y la producción de biomasa. También tendió a ser negativa la asociación de la T_{med-veg} con la duración de la etapa vegetativa (D_{veg}) y la demanda atmosférica (ET_{o-veg}) durante dicha etapa.

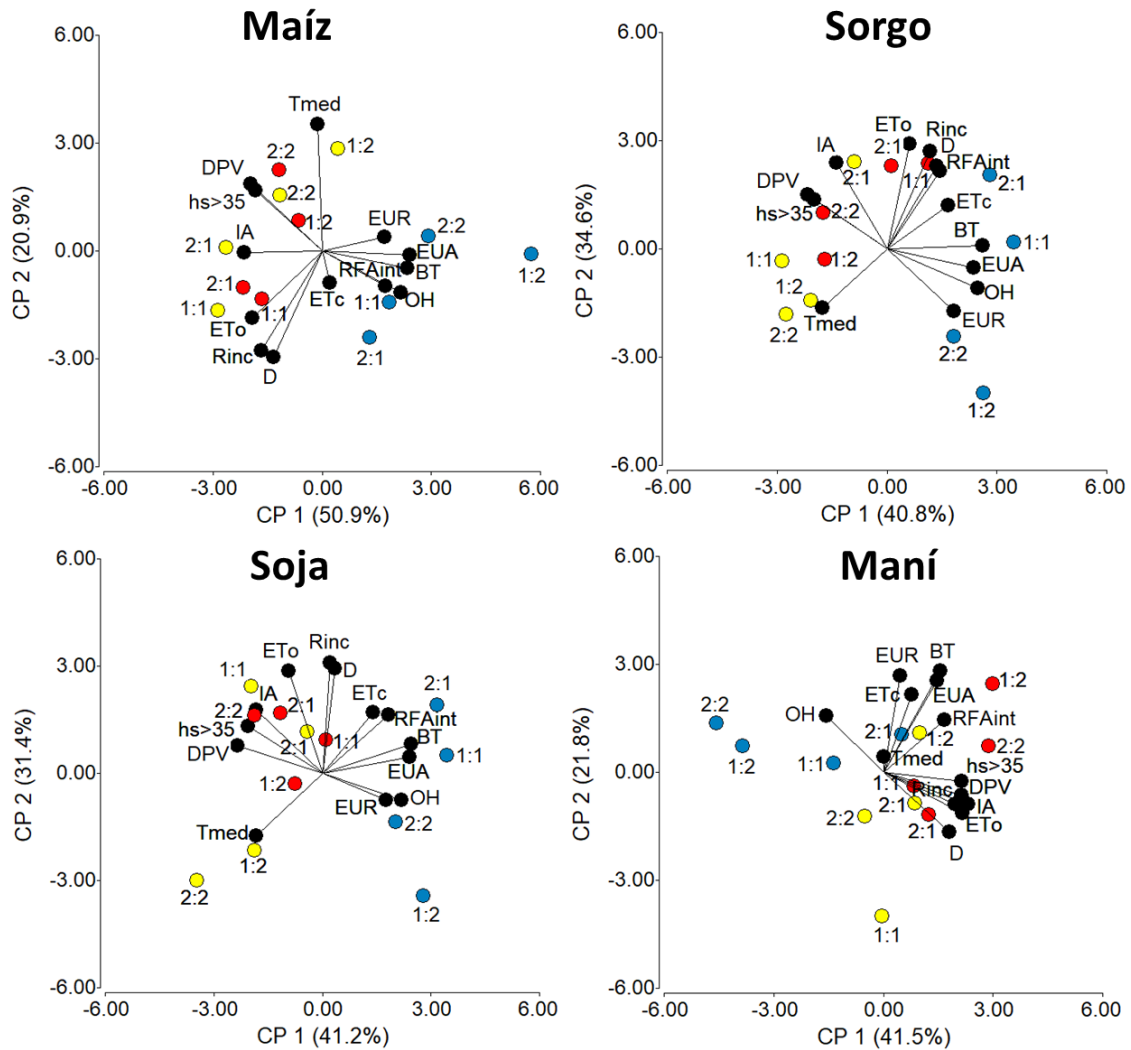


Figura 4.5. Biplot para los dos primeros componentes principales (CP) correspondientes al análisis de la determinación de la eficiencia en el uso de la radiación y del agua durante la etapa vegetativa (EUR y EUA, respectivamente) y su relación con la BT de la etapa y condiciones de crecimiento asociadas para cultivos de maíz, sorgo, soja y maní creciendo en tres ambientes, durante dos campañas y dos fechas de siembra. Los vectores corresponden a las variables EUR, EUA, BT, temperatura media (Tmed), radiación incidente (Rinc) y fotosintéticamente activa interceptada (RFAint), evapotranspiración (ETo), horas con temperatura mayor a 35°C (hs>35), déficit de presión de vapor (DPV), índice de aridez (IA), duración de la ventana vegetativa (D), evapotranspiración del cultivo (ETc), oferta hídrica (OH), todas evaluadas desde la emergencia hasta floración (para maíz y sorgo) y comienzo de formación de vainas y cajas (para soja y maní, respectivamente). Símbolos como en la Figura 4.2 (se omitió el subíndice veg para facilitar la visualización).

En las gramíneas+soja los ambientes repitieron para la etapa vegetativa las tendencias descritas para el ciclo (Fig. 4.2), con los datos de la RPH acompañando los valores relativos mayores de BTveg y rasgos asociados positivamente a ella, mientras los datos de RSH y RSC se ubicaron en sentido opuesto. En la soja y el sorgo, los mayores

valores relativos de BTveg correspondieron a las siembras tempranas de la RPH, mientras que en maíz prevalecieron los de las siembras tardías. Para las tres especies, los peores valores relativos de biomasa en la etapa vegetativa correspondieron a la RSH, predominando en esta tendencia las siembras tempranas en maíz y las tardías en soja y sorgo. El maní se separó de estas tendencias generales que había compartido para el ciclo total, pues los mayores valores relativos de BTveg correspondieron a la RSC, mientras los menores se registraron en las otras dos regiones. En el caso de la RPH acompañando valores relativos altos de OHveg y bajos de duración de la etapa vegetativa (Dveg), IAvveg y DPVveg, mientras que en la RSH fue a la inversa.

Al considerar la respuesta de la EURr-veg a la principal variable ambiental determinante de su variación (OHveg), se verificó que tanto en las gramíneas como en la soja la EURr-veg tuvo un aumento significativo de 9% o más por cada 100 mm de oferta hídrica (OHveg; Fig. 4.6). Similar a lo señalado para el ciclo, el maní fue la única especie para la cual la EURr-veg no respondió positivamente al incremento en la OHveg. En cuanto a la respuesta de la EUAr-veg a la principal variable ambiental determinante de su variación (DPVveg; Cuadro Suplementario S7), se verificó que tanto en las gramíneas como en soja la EUAr-veg tuvo una reducción significativa de entre 45% y 54% por unidad de DPVveg (Fig. 4.7). Nuevamente, el maní fue la única especie en que esta relación no se verificó.

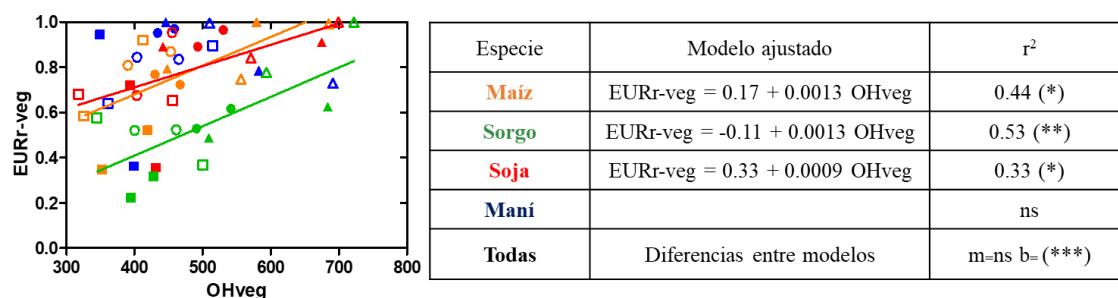


Figura 4.6. Respuesta durante la etapa vegetativa de la eficiencia en el uso de la radiación relativa (EURr-veg) a la oferta hídrica (OHveg). Símbolos y líneas como en Fig. 4.3. *, **, *** indican significativo para $P \leq 0.05$, 0.01 y 0.001, respectivamente.

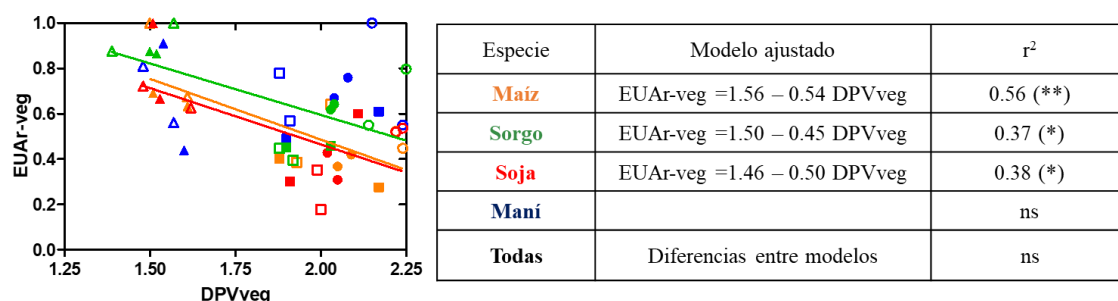


Figura 4.7. Respuesta durante la etapa vegetativa de la eficiencia en el uso del agua relativa (EUAr-veg) al DPVveg. Símbolos y líneas como en Fig. 4.3. *, **, *** indican significativo para $P \leq 0.05$, 0.01 y 0.001, respectivamente.

4.3.3 Generación de biomasa y eficiencia en el uso de recursos en la etapa reproductiva

Durante la etapa reproductiva, el análisis de componentes principales también explicó una alta proporción de la variabilidad total de los datos correspondientes a las variables consideradas (>70 %), con el CP1 abarcando un 48.1-50.2 % de la misma y el CP2 un 22.7-25.5 % (Fig. 4.8). Las tendencias para la etapa reproductiva no variaron sustancialmente de las descritas para la vegetativa, con la BTrep, OHrep, EURrep y EUArep en oposición a IArep y DPVrep, pero incluyendo en este caso también al maní en la respuesta antagónica observada y con un menor peso relativo de EUArep en sorgo y maní (vector más corto) que en maíz y soja (vector de dimensión similar al de la EURrep). La variación

en estos rasgos fue predominantemente abarcada por el CP1, en particular para el caso del sorgo. En las legumbres+maíz, en cambio, las eficiencias tendieron a distribuir parte de su variación también sobre el CP2 y para el maní también IArep y DPVrep se ubicaron entre ambos ejes.

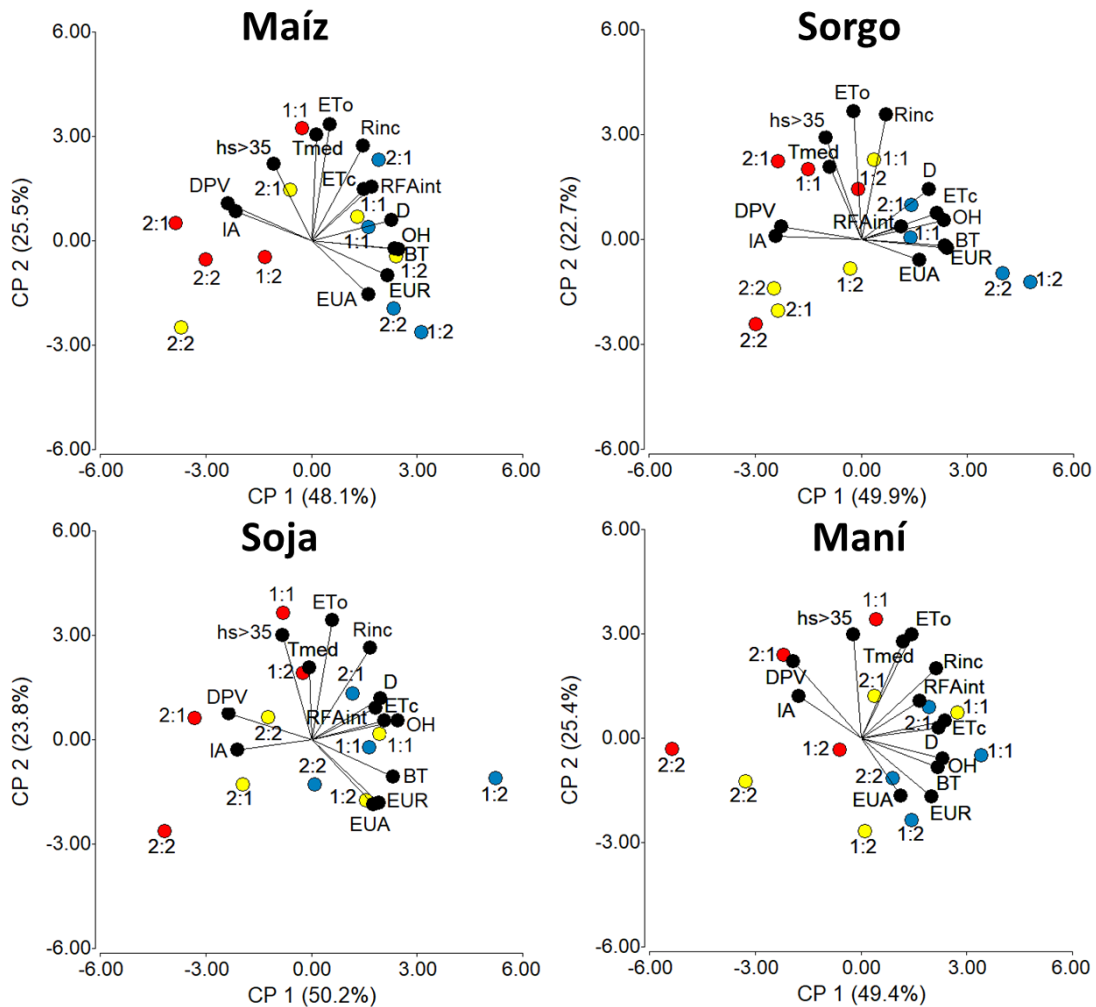


Figura 4.8. Biplot para los dos primeros componentes principales (CP) correspondientes al análisis de la determinación de la eficiencia en el uso de la radiación y del agua (EUR y EUA, respectivamente) durante la etapa reproductiva y su relación con la BT y condiciones de crecimiento asociadas durante dicha etapa para cultivos de maíz, sorgo, soja y maní creciendo en tres ambientes, durante dos campañas y dos fechas de siembra. Los vectores corresponden a las variables EUR, EUA, BT, temperatura media (Tmed), radiación incidente (Rinc) y fotosintéticamente activa interceptada (RFAint), evapotranspiración (ETo), horas con temperatura mayor a 35°C (hs>35), déficit de presión de vapor (DPV), índice de aridez (IA), duración de la ventana reproductiva (D), evapotranspiración del cultivo (ETc) y oferta hídrica (OH), todas evaluadas desde floración (para maíz y sorgo) y comienzo de formación de vainas y cajas (para soja y maní, respectivamente) hasta madurez fisiológica. Símbolos como en la Figura 4.2 (se omitió el subíndice rep para facilitar la visualización).

A diferencia de la etapa vegetativa, la duración de la etapa reproductiva (D_{rep}) se asoció positivamente con la producción de biomasa en todas las especies, mientras que las temperaturas supraóptimas ($hs>35_{rep}$) tuvieron una respuesta antagónica a la producción de biomasa y las eficiencias de uso de recursos en las legumbres y el maíz, pero no en el sorgo (ángulo de casi 90° con la B_{Trep}). La variable $hs>35_{rep}$ se asoció positivamente con la $T_{med-rep}$, la ET_{o-rep} y la $RFA_{inc-rep}$, que a su vez estuvieron estrechamente relacionadas entre sí pero en menor oposición a la producción de biomasa y las eficiencias de uso de recursos que $hs>35_{rep}$.

Se pudo verificar que los mayores valores relativos de biomasa y eficiencia en el uso de recursos durante la etapa reproductiva correspondieron siempre a la RPH. Sin embargo, mientras esta tendencia fue muy clara en sorgo (casi exclusivamente los valores de esta región interceptaron al vector de B_{Trep} en su trayectoria positiva), en las otras especies también hubo casos de la RSH en condiciones de desempeño relativo superior. La ubicación de los datos correspondientes a la RSC, en cambio, predominó sobre la trayectoria de valores relativos menores de estas variables para todas las especies. También se verificó un predominio hacia valores relativos menores de la segunda campaña respecto a la primera. Respecto a la época de siembra, los máximos valores relativos de B_{Trep} pertenecieron a la siembra tardía de la primera campaña de la RPH en el caso de gramíneas+soja. Esa condición también correspondió a un valor relativo elevado para el caso del maní, aunque fue levemente superado por la siembra temprana de esa campaña en esa región. Dejando de lado el mejor desempeño relativo, no hubo una diferencia clara entre épocas de siembra respecto a esta variable, como sí lo tuvieron respecto a la temperatura ambiente y la demanda atmosférica, en que las siembras tempranas predominaron hacia valores relativos superiores y las tardías hacia valores relativos menores.

Al considerar la respuesta de la EURr-rep a las principales variables ambientales determinantes de su variación (OHrep y DPVrep), se verificó que en todas las especies la EURr-rep tuvo (i) un aumento significativo de entre 11% y 13% por cada 100 mm de oferta hídrica (OHrep; Fig. 4.9A) y (ii) una reducción significativa de 42% o más por unidad de DPVrep, registrándose para esta última variable una respuesta menor en sorgo, intermedia en maíz y soja y mayor en maní ($P < 0.05$; Fig. 4.9B). Por otra parte, también se verificó que la EUAr-rep no se asoció a las principales variables ambientales durante la etapa de interés. La EUAr-rep sí se asoció estrechamente a la EURr-rep (Fig. 4.10), sugiriendo un efecto de la primera sobre la BTr-rep mediado por la segunda.

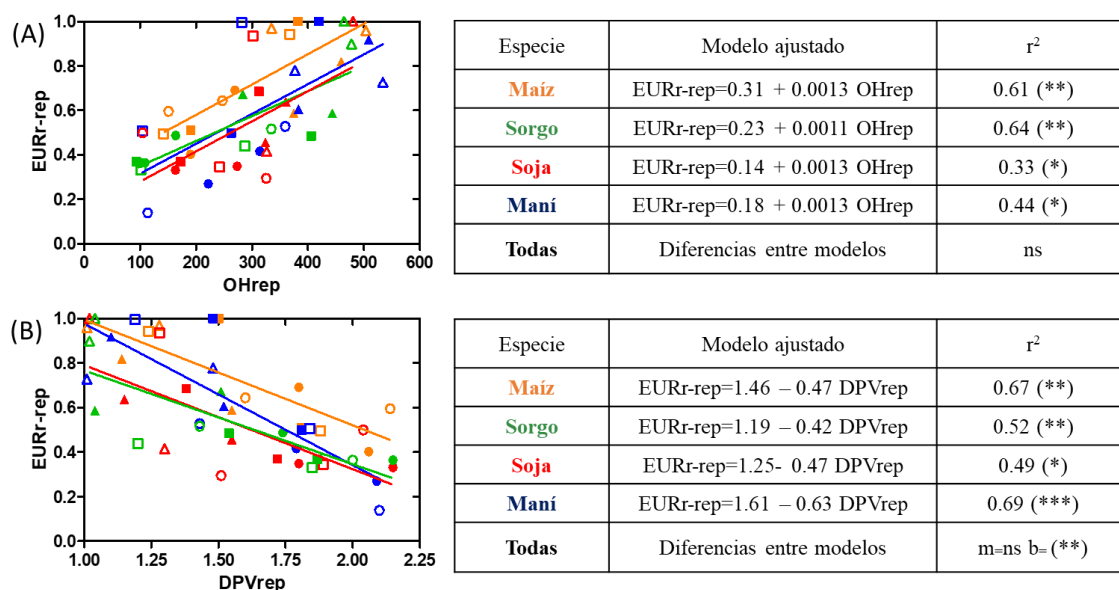


Figura 4.9. Respuesta durante la etapa reproductiva de la eficiencia en el uso de la radiación relativa (EURr-rep) a (A) la OHrep y (B) el DPVrep. Símbolos y líneas como en Fig. 4.3. *, **, *** indican significativo para $P \leq 0.05$, 0.01 y 0.001, respectivamente.

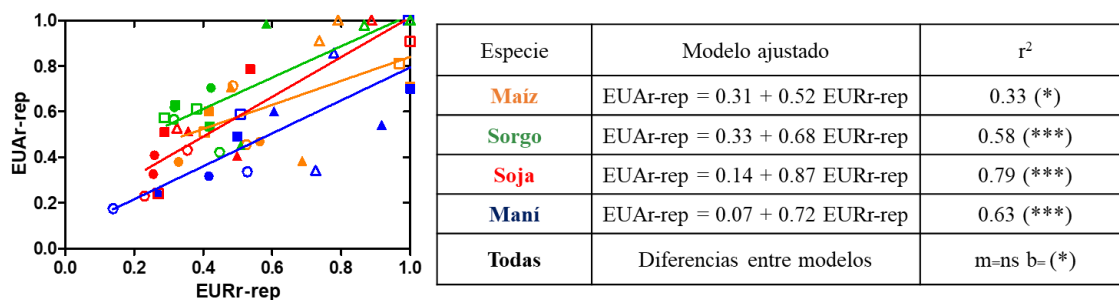


Figura 4.10. Relación durante la etapa reproductiva entre la eficiencia en el uso del agua relativa (EUAr-rep) y la eficiencia en el uso de la radiación relativa (EURr-rep). Símbolos y líneas como en Fig. 4.3. *, **, *** indican significativo para $P \leq 0.05$, 0.01 y 0.001, respectivamente.

4.4 Discusión

El objetivo de este capítulo fue evaluar la respuesta de la BT, principal determinante del rendimiento en grano de las cuatro especies estudiadas en las muy diversas condiciones de crecimiento incluidas en esta tesis (Capítulo 3), a sus determinantes fisiológicos. Para ello se analizó tanto la captura de los recursos luz (i.e. RFAint) y agua (ETc) como la eficiencia con que los mismos son convertidos en biomasa (EUR y EUA, respectivamente), para todo el ciclo y para sus dos principales etapas (vegetativa y reproductiva).

Los resultados obtenidos indican que la generación de biomasa de todas las especies tuvo mayor respuesta al incremento de la EUR y la EUA que al incremento en la captura de luz y agua a lo largo del ciclo (Fig. 4.2 y Cuadro Suplementario S6). Este resultado es avalado por estudios previos que, en condiciones de crecimiento más acotadas, han señalado avances en la productividad de genotipos modernos de las cuatro especies de interés a partir de mejoras en la eficiencia en el uso de los recursos respecto a la captura de los mismos (Haro et al. 2017 en maní; Curin et al. 2020 en maíz; de Felipe et al. 2020 en soja; Demarco et al. 2022 en sorgo). Si bien el grado de inversión en programas de mejoramiento es asimétrico entre los cultivos de ambientes semiáridos como sorgo y maní respecto a los más mesofíticos como maíz y soja, reduciendo la ventaja

esperada de los primeros respecto a los segundos en ambientes marginales (Parra et al. 2020), cambios relevantes como la sustitución del hábito erecto por el procumbente en el porte del maní (Haro et al. 2017) o la reducción de la conductancia estomática en sorgo (Geetika et al. 2019) se han asociado con el aumento en la eficiencia en el uso de los recursos a través del tiempo.

En esta tesis, ambas eficiencias respondieron negativamente a la disminución de la oferta hídrica y el aumento del DPV durante el ciclo (Figs. 4.3 y 4.4). La respuesta de la EUR y la EUA a la oferta hídrica coincide con estudios previos en gramíneas (Muchow 1989a,b ; Farré y Faci, 2006) y legumbres (Muchow 1985a,b,c) sometidas a diferentes regímenes de humedad. Existieron, sin embargo, algunas diferencias entre especies que difieren de estos antecedentes. En la presente tesis las especies gramíneas fueron similares en la respuesta de su EUA a la OH, mientras que algunos estudios señalan una mayor sensibilidad del maíz respecto al sorgo (Farré y Faci 2006). Esta aparente inconsistencia podría atribuirse a diferencias en el patrón de OH a lo largo del ciclo. Por un lado, la esperada ventaja del sorgo respecto al maíz en cuanto a su mayor capacidad de extraer agua del suelo (Farré y Faci 2006) estaría asociada con la mayor capacidad del primero para sostener la transpiración a menores contenidos de agua útil que el maíz (Choudhary et al. 2020). Esta capacidad, sin embargo, no disminuye su EUA sino que se traduciría en una menor penalización de la misma ante un déficit hídrico por un menor efecto del control estomático sobre la fijación de carbono que sobre la pérdida de agua. Por otro lado, en el presente estudio esta supuesta mayor capacidad del sorgo pudo haber quedado enmascarada por las condiciones hídricas de la segunda campaña, en que ambas especies tuvieron valores similares de ETC, pues alcanzaron valores de contenido de humedad del suelo correspondientes a los de punto de marchitez permanente (Capítulo 2, Fig. 2.3). En

oposición a ambas gramíneas y soja, tanto la EUR como la EUA no respondieron claramente a la oferta hídrica en maní (sólo mostró una asociación significativa para la EURrep; Fig. 4.9). En este cultivo existirían mecanismos dinámicos, como el plegamiento foliar o *folding* (Matthews et al. 1988) que favorecen la intercepción de la radiación cuando el agua está disponible pero regulan la EUR cuando el agua se vuelve limitante, haciendo que a medida que el coeficiente de atenuación lumínica (k) aumenta la EUR disminuya (Kiniry et al. 2005). Por otra parte, y en paralelo a los resultados detallados en el Capítulo 3, altos contenidos de humedad en el suelo durante el llenado de los granos en siembras tardías probablemente hayan generado una disminución de la temperatura del mismo, con consecuencias negativas sobre la EUR (Awal y Ikeda 2003), especialmente en uno de los dos cultivos con ciclo más prolongado.

La EUR y la EUA a lo largo del ciclo también aumentaron ante la disminución del DPV en todas las especies, en concordancia con antecedentes previos (Dardanelli 1998a,b; Kiniry et al. 1998; Abbate et al. 2004; Kemanian et al. 2005). La excepción a esta tendencia fue la EUA en el caso del maní (Figs. 4.3B y 4.4B). Para el caso de maíz y sorgo, la EUR disminuyó en la medida que el DPV aumentó cuando se exploró un rango muy similar de DPV al analizado en esta tesis (Kiniry et al. 1998). Esta tendencia se asoció a la respuesta negativa de la tasa fotosintética a escala de hoja respecto al DPV, similar a lo argumentado previamente para la EUR ante una reducción de la OH. En línea con lo documentado en las gramíneas, en las legumbres también se documentó una reducción de ambas eficiencias ante el incremento del DPV. En soja, la disminución en EUA tuvo lugar a medida que el DPV aumentó por encima de 2.1 kPa (Fletcher et al. 2007; Ries et al. 2012; Blessing et al. 2018), y sería atribuible a un aumento de la transpiración sin cambio en la capacidad de fijar carbono y producir biomasa. En maní, el crecimiento se redujo en la medida que el DPV aumentó de 1 a 3 kPa y dicho crecimiento

se vio afectado tanto por reducciones en el área foliar (y por lo tanto en la interceptación de radiación) como en la productividad por unidad de radiación interceptada (Ong et al. 1987). En el presente estudio, los ambientes con alto DPV (RSC y RSH) coincidieron con una oferta hídrica en muchos casos altamente reducida, que en conjunto no permitieron expresar los beneficios del control estomático parcial que se ha observado ante el aumento del DPV sin restricciones hídricas (Fletcher et al. 2007; Gholipoor et al. 2013) o en respuesta a una restricción hídrica moderada (Liu et al. 2005). Este control se traduce en una mayor restricción a la pérdida de agua que a la fijación de carbono con el consecuente aumento de la EUA, tendencias que no se verificaron en esta tesis. Las tendencias observadas denotan, a su vez, que los genotipos utilizados no serían capaces de expresar marchitamiento lento o *slow-wilting*, como se ha documentado para soja (Fletcher et al. 2007), maíz (Gholipoor et al. 2013) y sorgo (Gholipoor et al. 2010).

Focalizando en la etapa vegetativa, el efecto de las deficiencias hídricas en la producción de biomasa de los cultivos se explicó tanto por la reducción en la cantidad de radiación interceptada y agua consumida, atribuibles a una disminución en el tamaño del canopeo, como por disminuciones en la capacidad fotosintética estimadas a través de la EUR y la EUA. Si bien la primera respuesta suele tener efectos relativos superiores a la segunda, porque la expansión foliar es más sensible a la oferta hídrica que la fijación de carbono (Boyer 1970; Sadras y Milroy 1996), en esta tesis no se evidenció el predominio de un proceso respecto del otro en esta etapa (Fig. 4.5). Posiblemente esto se deba a que, en las condiciones exploradas por los experimentos del presente estudio, las restricciones hídricas se fueron intensificando con el avance del ciclo (Capítulo 2, Fig. 2.4), haciendo que los efectos negativos sobre la generación de área foliar tuvieran menos impacto que el esperado sobre la captura de recursos debido a la naturaleza curvilínea de la relación entre la eficiencia de interceptación de luz y el índice de área foliar (Loomis y Connor

1992). Existen evidencias previas de este tipo de respuesta (Muchow 1985, 1989; Uhart y Andrade 1995). También se evidenció que tanto la biomasa como las eficiencias en el uso de recursos que la determinan disminuyeron en todas las especies ante el incremento de la aridez (Fig. 4.5), estableciéndose para esta etapa una relación negativa significativa entre la EUA y el DPV de todas excepto el maní (Fig. 4.7). Este resultado coincide con estudios previos (Choudhary et al. 2020) que señalaban, para maíz y sorgo, disminuciones de la EUA ante aumentos del DPV y una mayor variación relativa de la EUA en maíz que en sorgo al pasar de DPV moderado a alto (Fig. 4.7). En cuanto a las legumbres, en la presente tesis la soja tuvo un comportamiento intermedio entre los descritos para maíz y sorgo mientras que en el caso del maní no se registró una tendencia clara. Existen evidencias de cambios en la tasa de transpiración frente al aumento del DPV en cultivos de soja con buena provisión hídrica (Sadok y Sinclair 2009), como también de los posibles beneficios de este tipo de respuesta (*slow wilting*) para ambientes proclives a sequía (Sinclair et al. 2010) y que serían atribuibles a la mejora en la EUA que traería aparejada (Ye et al. 2020).

Finalmente, durante la etapa reproductiva la EUR respondió a las variaciones en OH y DPV en todas las especies, mientras no se verificó una tendencia similar en la EUA la cual únicamente manifestó respuesta significativa en el caso de soja (Fig. 4.9 y Cuadro Suplementario S8). Por un lado, la respuesta de la EUR al DPV ya había sido documentada para maíz y sorgo (Stockle y Kiniry 1990), pero no existían referencias equivalentes para legumbres. Por otro lado, la respuesta durante la etapa reproductiva de la EUR a las variables mencionadas no puede soslayar los efectos simultáneos (i.e. covariación) de las relaciones fuente-destino sobre la EUR. Así, existen evidencias de que una relación fuente-destino alta durante el llenado del grano puede reducir la fotosíntesis (Sadras et al. 2000) y consecuentemente la EUR en maíz (Rajcan y Tollenaar

1999; Borrás et al. 2004; Gambín y Borrás 2007) debido a un retrocontrol de la actividad fotosintética. Esta condición, que podría tener lugar como consecuencia de una pobre fijación de granos en ambientes con baja oferta hídrica durante el período crítico, como los que caracterizaron a las regiones sub-húmeda y semiárida (i.e. baja OH y alto DPV) respecto a la pampeana húmeda (i.e. alta OH y bajo DPV), podría ser la causa subyacente a las tendencias observadas en la EUR. Si bien algunas especies (e.g. soja y sorgo) serían más capaces que otras (e.g. maíz) de promover un aumento más sustancial del peso individual del grano en respuesta a las mejoras en la relación fuente-destino postfloración (Borrás et al. 2004; Gambín y Borrás 2007), en ningún caso dicho aumento compensaría las disminuciones en el número de granos y los efectos mencionados de retrocontrol que se tradujeron en la disminución observada de la EUR en respuesta al aumento del DPV postfloración (Fig. 4.9B). Independientemente de estas consideraciones, que requieren ser tenidas en cuenta en experimentos futuros, los resultados obtenidos enfatizan la importancia del ambiente sobre la productividad de la radiación y del agua, particularmente en aquellos caracterizados por altas demandas evaporativas y menor oferta hídrica. Por el mismo motivo, se destaca la necesidad de incorporar la variabilidad ambiental interanual de cada sitio para agregar un enfoque probabilístico a los hallazgos obtenidos con un número acotado de campañas y épocas de siembra.

4.5 Conclusiones

Los resultados de esta investigación demuestran que la EUR y EUA tuvieron un rol más determinante en la producción de la biomasa que la captura de los respectivos recursos. Las principales variables ambientales que modularon dichas eficiencias fueron la oferta hídrica y el nivel de insaturación del aire, aunque con diferencias atribuibles a la especie y la etapa del ciclo considerada. A lo largo del ciclo, la mayoría de las especies mostraron un aumento de la EUR y EUA cuando se incrementó OH y disminuyó el DPV,

excepto el maní, que solo modificó su EUR en respuesta al DPV. Esta tendencia se mantuvo consistente durante la etapa vegetativa. Durante la etapa reproductiva la EUR de todas las especies respondió al DPV y OH, mientras que la EUA se asoció estrechamente a la EUR sugiriendo un efecto de la primera sobre la BT mediado por la segunda. Las relaciones establecidas son un punto de partida importante para el desarrollo de futura investigación en regiones menos exploradas, como la RSC. En este sentido, mejorar nuestra capacidad de predicción a través de, por ejemplo, el uso de modelos de simulación que contemplen las probabilidades asociadas al cultivo, región y manejo es relevante para incrementar nuestra comprensión sobre los factores que determinan el rendimiento y así mejorar el manejo de cada especie en cada ambiente de interés.

**EVALUACIÓN DE ESTRATEGIAS DE MANEJO DE MAÍZ, SOJA, SORGO Y MANÍ EN
ESCENARIOS DE LA REGIÓN SEMIÁRIDA CENTRAL**

5.1 Introducción

La variabilidad climática es la principal fuente de incertidumbre para predecir los rendimientos esperados de un cultivo y planificar estrategias de manejo agrícola en seco. La variabilidad en las precipitaciones es probablemente la mayor fuente de inestabilidad en los resultados agrícolas de Argentina (Podestá et al. 1999; Magrin et al. 2005). En la RSC esa variabilidad genera aún mayor impacto por la mayor demanda ambiental característica de la región (de la Casa y Ovando 2016) y la coincidencia y recurrencia de sequías con temperaturas extremas (Rattalino Edreira et al. 2011a; Maddonni 2012), tanto máximas que provocan golpes de calor en etapas críticas como mínimas que acortan la estación de crecimiento por un menor período libre de heladas (Otegui et al. 2023). Esas condiciones promueven el aumento de la variabilidad interanual (Otegui et al., 2021) y la reducción del rendimiento de los cultivos estivales más sembrados (i.e. soja y maíz) en forma creciente desde la RPH a la RSC (Aramburu Merlos et al. 2015).

La variación de la fecha de siembra y la incorporación de cultivos mejor adaptados a ambientes semiáridos (e.g. sorgo y maní) son dos decisiones estratégicas que permitirían manejar el riesgo agrícola en la RSC (Muchow 1989a; Rotili et al. 2019). Retrasar la fecha de siembra en maíz y soja coloca las etapas reproductivas a partir de febrero. Este cambio promueve un balance hídrico más favorable, por una reducción de la demanda evaporativa, y reduce la frecuencia de temperaturas supraóptimas durante el período crítico (Maddonni 2012; Mercau y Otegui 2014; Mendez et al. 2018; Otegui et al. 2023), mejorando las condiciones para la fijación de granos y consecuentemente el rendimiento. Sin embargo, en esta región los cultivos podrían experimentar sequías terminales en años en que la estación de lluvias culmina anticipadamente (i.e. marzo en vez de abril), lo cual a su vez suele estar acompañado de un adelantamiento de las primeras heladas (Long et al. 2005). Ambos fenómenos penalizan el rendimiento a través de una reducción del peso

individual del grano (Borrás et al., 2004). Una estrategia alternativa para diversificar el riesgo es la incorporación de cultivos de ambientes semiáridos considerados con mejor adaptación frente a sequías y muy altas temperaturas, como el maní (Devries et al. 1989; Chakraborty et al. 2018) y el sorgo (Farré y Faci 2006; Singh et al. 2015). Además, una forma de reducir el riesgo de la agricultura en una empresa puede ser la combinación de diversas opciones (Lin 2011; Hernández Córdova y Soto Carreño 2012). En este capítulo se presenta una comparación del impacto de la variabilidad climática en la RSC sobre el rendimiento de cuatro especies cultivadas en fechas de siembra contrastantes (temprana y tardía), utilizando para ello modelos de simulación de aplicación agronómica (MSAA).

Los MSAA sintetizan, para numerosas especies de interés agrícola, el conocimiento ecofisiológico y agronómico existente, constituyéndose así en herramientas potentes que permiten la comparación de estrategias de manejo agrícola. La plataforma DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*; Jones et al. 2003) alberga y facilita el uso de algunos de los MSAA más empleados, permitiendo integrar información climática, edáfica y genética para apoyar la toma de decisiones complejas (Jones et al. 1998). Utilizando una serie histórica de años, los MSAA permiten cuantificar la variabilidad y riesgo climático de distintas estrategias de manejo (Holzworth et al. 2015; Watson et al. 2017). Para evaluar estrategias de fecha de siembra o cambio de cultivos en la RSC utilizando DSSAT, primero fue necesario i) confeccionar una base de datos con distintos suelos y una serie histórica de datos climáticos con frecuencia diaria, ii) calibrar algunos parámetros que definen el potencial de los cuatro cultivos que se pretende comparar, y iii) evaluar la magnitud del error y eventual sesgo en la simulación de los mismos.

Los objetivos de este capítulo de la tesis fueron (i) evaluar la precisión de los MSAA en la simulación de los resultados experimentales presentados en el Capítulo 3

(i.e. 12 ambientes), (ii) contextualizar las condiciones de crecimiento exploradas en los experimentos en el marco de la variabilidad climática histórica de la RSC, (iii) generar para la RSC escenarios de simulación que permitan evaluar el impacto sobre la variabilidad interanual de los rendimientos de distintas fechas de siembra de soja y maíz en distintos suelos y condiciones de recarga hídrica inicial y, iv) usar esos escenarios para comparar soja con maní y maíz con sorgo, con el fin de evaluar la covariación entre estrategias agrícolas.

5.2 Materiales y Métodos

Se utilizó los modelos CERES-Maize, CERES-Sorghum, CROPGRO-Soybean y CROPGRO-Peanut, todos integrados en DSSAT v 4.7.5 (Ritchie y Alagarswamy 2003; Hoogenboom et al. 2019). Los parámetros de los modelos que permiten simular la fenología y el rendimiento potencial de los genotipos utilizados para cada cultivo en este trabajo se basaron en los ya disponibles para materiales similares (Mercau et al. 2007; Aramburu Merlos et al. 2015; Ovando y Haro 2020) y la calibración de parte de los mismos (Cuadros 5.1 a 5.6) a los resultados de dos de los ensayos, con muy baja o nula limitación hídrica (corroborado por el balance hídrico de los modelos). Los experimentos utilizados fueron generalmente las dos fechas de siembra del primer año en Pergamino. Sin embargo, en maní se reemplazó la segunda fecha, afectada por pudrición en un temporal otoñal, por la segunda fecha del mismo año en Manfredi. Se realizaron dos grupos de simulaciones. Uno para evaluar la capacidad de los modelos para predecir los resultados experimentales y luego la representatividad de los mismos respecto al ambiente de cada región. El otro, y más importante a los fines de los objetivos de la tesis, para evaluar estrategias de manejo en la RSC.

Cuadro 5.1. Coeficientes genéticos calibrados para el híbrido de maíz DK 72-10. En negrita se destaca los valores modificados respecto a los previamente disponibles.

Parámetros	Maíz	
	Original	DK 72-10
P1	245	245
P2	0	0
P5	820	850
G2	950	850
G3	7.5	7
PHINT	45	45

Cuadro 5.2. Descripción de los coeficientes genéticos.

Parámetros	Descripción
P1	Tiempo térmico desde la emergencia de las plántulas hasta el final de la fase juvenil (expresado en grados día por encima de una temperatura base de 8 °C) durante el cual la planta no responde a los cambios en el fotoperíodo
P2	Grado en que se retrasa el desarrollo (expresado en días) por cada hora de aumento en el fotoperíodo por encima del fotoperíodo más largo en el que el desarrollo avanza a una velocidad máxima (que se considera de 12.5 horas)
P5	Tiempo térmico desde la floración hasta la madurez fisiológica (expresado en grados día por encima de una temperatura base de 8 °C)
G2	Número máximo posible de granos por planta
G3	Tasa de llenado del grano durante la etapa de llenado lineal del grano y en condiciones óptimas (mg día ⁻¹)
PHINT	Intervalo filocrono; el intervalo en tiempo térmico (en grados día) entre apariciones sucesivas de la punta de la hoja

Cuadro 5.3. Coeficientes genéticos calibrados para los híbridos de sorgo ADV 114, ADV 1200 y VDH 314. En negrita se destaca los valores modificados.

Parámetros	Sorgo			
	Original	ADV 114	ADV 1200	VDH 314
P1	360	360	360	360
P2	102	102	102	102
P2O	12.5	12.5	12.5	12.5
P2R	30	30	30	30
PANTH	617.5	617.5	617.5	617.5
P3	152.5	152.5	152.5	152.5
P4	81.5	81.5	81.5	81.5
P5	540	500	550	600
PHINT	49	49	49	49
G1	0	0	0	0
G2	6	6	6	6
EUR	3.2	2.8	2.8	2.8

Cuadro 5.4. Descripción de los coeficientes genéticos.

Parámetros	Descripción
P1	Tiempo térmico desde la emergencia de las plántulas hasta el final de la fase juvenil (expresado en grados día por encima de TBASE durante el cual la planta no responde a los cambios en el fotoperíodo)
P2	Tiempo térmico desde el final de la etapa juvenil hasta la iniciación de la panoja en días cortos (grados día por encima de TBASE)
P2O	Fotoperíodo crítico o la mayor duración del día (en horas) en el que se produce el desarrollo a un ritmo máximo. A valores superiores a P2O, la tasa de desarrollo se reduce
P2R	Grado en que se retrasa el desarrollo fásico que conduce a la iniciación de la panícula (expresado en grados día) por cada hora de aumento en el fotoperíodo por encima de P2O
PANTH	Tiempo térmico desde el final de la iniciación de la panoja hasta la antesis (grados día por encima de TBASE)
P3	Tiempo térmico desde el final de la expansión de la hoja bandera hasta la antesis (grados día por encima de TBASE)
P4	Tiempo térmico desde antesis hasta inicio de llenado de grano (grados día por encima de TBASE)
P5	Tiempo térmico desde el inicio del llenado del grano hasta la madurez fisiológica (grados día por encima de TBASE)
PHINT	Intervalo filocrono; el intervalo en tiempo térmico entre apariciones sucesivas de la punta de la hoja (en grados día)
G1	Escalador para el tamaño relativo de la hoja
G2	Escalador para la partición de asimilados a la panícula (panoja)
EUR	Eficiencia en el uso de la radiación ($g \text{ biomasa MJ RFAint}^{-1}$)

Cuadro 5.5. Coeficientes genéticos calibrados para las variedades de soja NA 5009 y de maní ASEM 400 INTA. En negrita se destaca los valores modificados para cada especie.

Parámetros	Soja		Maní	
	Original	NA 5009	Original	ASEM 400 INTA
CSDL	13	12.9	11.84	11.84
PPSEN	0.295	0.295	0	0
EM-FL	20	22	22	22
FL-SH	7.5	8	12	12
FL-SD	14.5	15.5	20.5	20.5
SD-PM	35	35.5	40	45
FL-LF	28	28	70	70
LF-MAX	1.1	1.1	1.25	1.25
SLAVR	375	375	320	320
SIZFL	180	180	17	17
XPRT	1	1	0.93	0.93
WTPSD	0.16	0.2	0.54	0.69
SPDUR	27	24	27	27
SDPDV	2.2	2.2	1.83	1.83
PODUR	9	9.5	13	20
THRSH	77	77	80	80
SDPRO	0.405	0.405	0.27	0.27
SDLIP	0.205	0.205	0.47	0.47

Cuadro 5.6. Descripción de los coeficientes genéticos de soja y maní.

Parámetros	Descripción
CSDL	Duración mínima del día por debajo de la cual el desarrollo reproductivo progresa sin efecto de la duración del día (en horas)
PPSEN	Pendiente de la respuesta relativa del desarrollo al fotoperíodo con el tiempo (1 hora^{-1})
EM-FL	Tiempo entre la emergencia de la planta y la aparición de la flor (R1; en grados día)
FL-SH	Tiempo entre la primera flor y la primera vaina (R3; en grados día)
FL-SD	Tiempo entre primera flor y primera semilla (R5; en grados día)
SD-PM	Tiempo entre inicio de producción de granos (R5) y madurez fisiológica (R7; en grados día)
FL-LF	Tiempo entre la primera flor (R1) y el final de la expansión de la hoja (en grados día)
LF-MAX	Tasa máxima de fotosíntesis de la hoja a 30°C , 350 ppm CO_2 y con saturación de luz ($\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
SLAVR	Área foliar específica del cultivar bajo condiciones de crecimiento estándar (en $\text{cm}_2 \text{ g}^{-1}$)
SIZFL	Tamaño máximo de hoja completa (tres folíolos; en cm^2)
XPRT	Fracción máxima del crecimiento diario que se divide en semilla + cáscara
WTPSD	Peso máximo por semilla (en g)
SFDUR	Duración del llenado de granos para la cohorte de vainas en condiciones de crecimiento estándar (en grados día)
SDPDV	Semilla promedio por vaina en condiciones de crecimiento estándar ($\# \text{ vaina}^{-1}$)
PODUR	Tiempo requerido para que el cultivar alcance la carga final de vainas en condiciones óptimas (en grados día)
THRSH	La proporción máxima de (semilla (semilla+cáscara) $^{-1}$) en la madurez. Hace que la semilla deje de crecer a medida que aumenta su peso seco hasta que las cáscaras se llenan en una cohorte (Porcentaje de trilla)
SDPRO	Fracción proteína en semillas (g de proteína, g de semilla $^{-1}$)
SDLIP	Fracción aceite en semillas (g de aceite, g de semilla $^{-1}$)

Para simular los doce ensayos se utilizaron datos diarios de temperaturas máxima, mínima y de rocío, velocidad de viento, lluvias de estaciones meteorológicas próximas a cada uno (datos de la EEA Pergamino, EEA Manfredi y SMN Villa Reynolds para RPH, RSH y RSC, respectivamente) y riegos cuando existieron. Los datos de radiación se tomaron de NASA POWER (<https://power.larc.nasa.gov>). Los parámetros que describen el suelo se estimaron en base a la serie de suelo sobre la que se realizó el ensayo en cada estación experimental y, en particular, los límites inferior y superior del contenido de agua útil se corrigieron en base a las mediciones del contenido hídrico por horizonte realizadas en los experimentos a lo largo del ciclo, que abarcó momentos con perfil muy húmedo y también muy seco. Para cada sitio se utilizó un único archivo de suelo para las distintas campañas, fechas de siembra y cultivos (Cuadros Suplementarios S9, S10, S11 y S12). El inicio de cada simulación coincidió con la fecha de medición del agua inicial en cada experimento y fecha de siembra. Los ensayos fueron conducidos sin limitaciones nutricionales y protegidos de la incidencia de adversidades bióticas y abióticas (Capítulo 2, sección 2.1.1). Las simulaciones se realizaron en condiciones de “potencial en secano”

(RSH y RSC) o incluyendo riego complementario en las mismas fechas que tuvieron lugar en los experimentos (RPH). En todos los casos se asumió que no hubo limitaciones nutricionales (i.e. rutina de nitrógeno apagada). La concentración de CO₂ atmosférico se fijó constante en 380 ppm. Los rendimientos, en cuanto a la variabilidad explorada en los 12 experimentos y en la RSC bajo distintos escenarios (secciones 5.3.2 y 5.3.3, respectivamente), se expresaron en kg ha⁻¹ a humedad comercial (i.e. 9% maní, 13.5% soja, 14.5% maíz y 15% sorgo; BCR 2015).

Se evaluó la precisión de los modelos para simular los resultados de fenología, generación de biomasa, rendimiento y sus componentes de los cuatro cultivos obtenidos en los ensayos presentados en el Capítulo 3. Para ello se calculó (i) la Raíz del Error Cuadrático Medio (*RMSE*), en las unidades de cada variable, (ii) el *rRMSE* (*RMSE* relativo a la media observada, como %), y (iii) el Sesgo (*rBias*, diferencia entre la media observada y simulada, relativo a la media observada, como %; Kobayashi y Salam 2000; Wallach 2006). Estos índices se obtuvieron tanto para los doce experimentos como para los dos ensayos sin episodios importantes de estrés usados parcialmente en la calibración. En el caso de maní, la fecha de R7, la biomasa en madurez, el rendimiento y sus componentes para la segunda campaña en RSC no fueron incluidos porque el modelo no simula el daño que provocó sobre el enclavado la muy alta temperatura en suelo descubierto. Tampoco se incluyeron en maní los datos de biomasa final, rendimiento y componentes de la segunda fecha de la primera campaña en Pergamino, afectado por pudrición de las cajas en un temporal de otoño.

Posteriormente, los modelos se utilizaron para evaluar, en cada cultivo, en qué medida los ensayos realizados en esta tesis cubrían la variabilidad de rendimientos esperados en cada región con manejos similares, en particular en la RSC. Para eso, cada combinación experimental de cultivo, fecha de siembra y condición inicial de agua en cada

campaña × localidad (Capítulo 2) fue simulada en los escenarios climáticos correspondientes a 50 años en cada región (1971 a 2021).

Por último, se definieron escenarios para la RSC para evaluar las diferencias en variabilidad esperable de rendimientos entre i) diferentes fechas de siembra, en maíz y soja, y ii) maíz y sorgo, como cereales alternativos, y soja y maní, como legumbres alternativas. Todos los escenarios fueron en base a la variabilidad climática de 50 campañas en Villa Mercedes (1971 a 2021), pero agregando la variabilidad ambiental generada por las series de suelo dominantes en la región. Estas series fueron Buena Esperanza (BE), Cramer (CR) y Granville (GR), con contenidos medios de arena en el perfil de 87, 82 y 71%, y capacidad de retener agua útil en 2.10 metros de profundidad de 150, 216 y 237 mm, respectivamente. Para definir escenarios de recarga se realizó una simulación, con una fecha de siembra frecuente en soja (10 de noviembre), en cada una de las 50 campañas, asumiendo que partía con el perfil húmedo (90% de agua útil), y se evaluó la variabilidad esperable de la recarga del perfil al 10 de octubre de la campaña siguiente. Se subdividió la variabilidad simulada en terciles de recarga y se analizó la distribución de agua en el perfil. Se definieron así tres escenarios de recarga inicial de agua al 10 de octubre, y su representatividad en la variabilidad esperable en cada suelo. A partir de esa condición hídrica inicial, las fechas de siembra evaluadas fueron: (i) para maíz 10 de octubre, 20 de noviembre y 5 de diciembre; (ii) para soja 20 de octubre, 5 y 25 de noviembre; (iii) para sorgo 20 de noviembre; y (iv) para maní 5 de noviembre. La comparación entre alternativas de fecha de siembra en soja y maíz, entre ambas legumbres y entre ambos cereales se realizó evaluando la distribución de frecuencias acumuladas de rendimiento en las 50 campañas para cada suelo y condición de recarga hídrica inicial. Se utilizó la correlación de Pearson para evaluar si la combinación de fechas de siembra

extremas o de cultivos permitiría diversificar riesgos productivos, simplificando el análisis al escenario de la serie Cramer (textura intermedia) y suelo húmedo (100% de agua útil) al 10 de octubre.

5.3 Resultados

5.3.1 Evaluación del modelo en la simulación de soja, maní, maíz y sorgo en un rango amplio de condiciones ambientales

La precisión de la simulación de la fenología, crecimiento, rendimiento y sus componentes en los 12 ambientes fue aceptable para los 4 cultivos, respaldando el uso de los MSAA para la evaluación comparativa de alternativas de producción en distintos escenarios. Los errores cuadráticos expresados en días para las fechas de floración y madurez fisiológica en maíz y sorgo, más las de inicio de formación de vainas y de granos en soja y maní, estuvieron dentro de rangos razonables (Fig. 5.1 y Cuadro 5.7). El error cuadrático normalizado ($rRMSE$) se comportó de manera similar, aunque el sesgo fue bajo y las diferencias Observado-Predicho no superaron el 10%. La excepción fue la fecha de inicio de formación de granos en las legumbres (i.e. R5), para la cual el modelo generalmente subestimó los valores observados. Sin embargo, este sesgo sería atribuible a que las escalas fenológicas utilizadas para las observaciones de campo correspondientes a esa etapa se centran en los nudos superiores, mientras que el modelo lo simula para el inicio del evento en los nudos centrales (i.e. inicio de formación de granos).

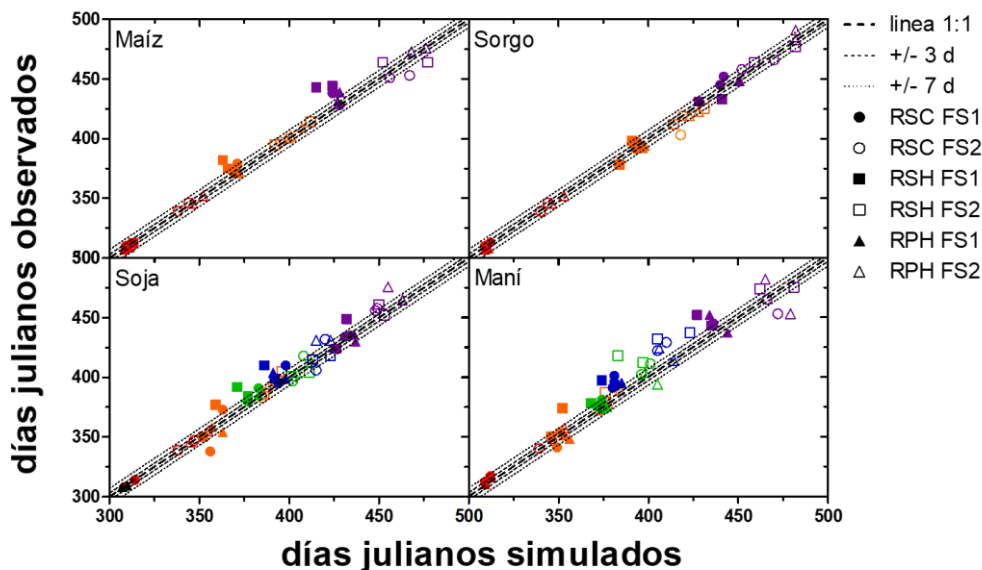


Figura 5.1. Eventos fenológicos de emergencia (rojo), floración (anaranjado), formación de vainas (verde), formación de granos (azul) y madurez fisiológica (violeta) expresados en días julianos para soja, maní, maíz y sorgo para los 12 ambientes evaluados. Símbolos cerrados corresponden a la primera fecha de siembra y abiertos a la segunda. La línea cortada central corresponde a la relación 1:1 y las punteadas contiguas a ella corresponden a ± 3 y 7 días julianos. RSC: Región Semiárida Central; RSH: Región Sub-Húmeda; RPH: Región Pampeana Húmeda. FS1: siembra temprana; FS2: siembra tardía.

Cuadro 5.7. Nivel de precisión y sesgo de la predicción de la fenología, expresado en días (*RMSE*) y como porcentaje de la duración del ciclo desde siembra (*rRMSE* y *rBias*) en todos los experimentos (Exp).

Especie	Medición	R1/E6	R3	R5	MF
		Todos Exp	Todos Exp	Todos Exp	Todos Exp
MAÍZ	<i>RMSE</i>	-7	-	-	-13
	<i>rRMSE</i>	-10	-	-	-10
	<i>rBias</i>	6	-	-	4
SORGO	<i>RMSE</i>	-6	-	-	-6
	<i>rRMSE</i>	-7	-	-	-4
	<i>rBias</i>	-4	-	-	1
SOJA	<i>RMSE</i>	-9	-8	-11	-9
	<i>rRMSE</i>	-16	-11	-12	-7
	<i>rBias</i>	3	5	7	4
MANÍ	<i>RMSE</i>	-9	-8	-17	-15
	<i>rRMSE</i>	-19	-11	-19	-11
	<i>rBias</i>	6	6	17	4

Las simulaciones de biomasa aérea total tuvieron un error mayor al de la fenología (Fig. 5.2 y Cuadro 5.8). El *RMSE* para biomasa aérea total a lo largo del ciclo tendió a aumentar hacia madurez fisiológica. Al evaluar el sesgo (*rBIAS*), las simulaciones tendieron a subestimar los valores observados en soja pero no hubo una tendencia clara en uno u otro sentido para las otras tres especies.

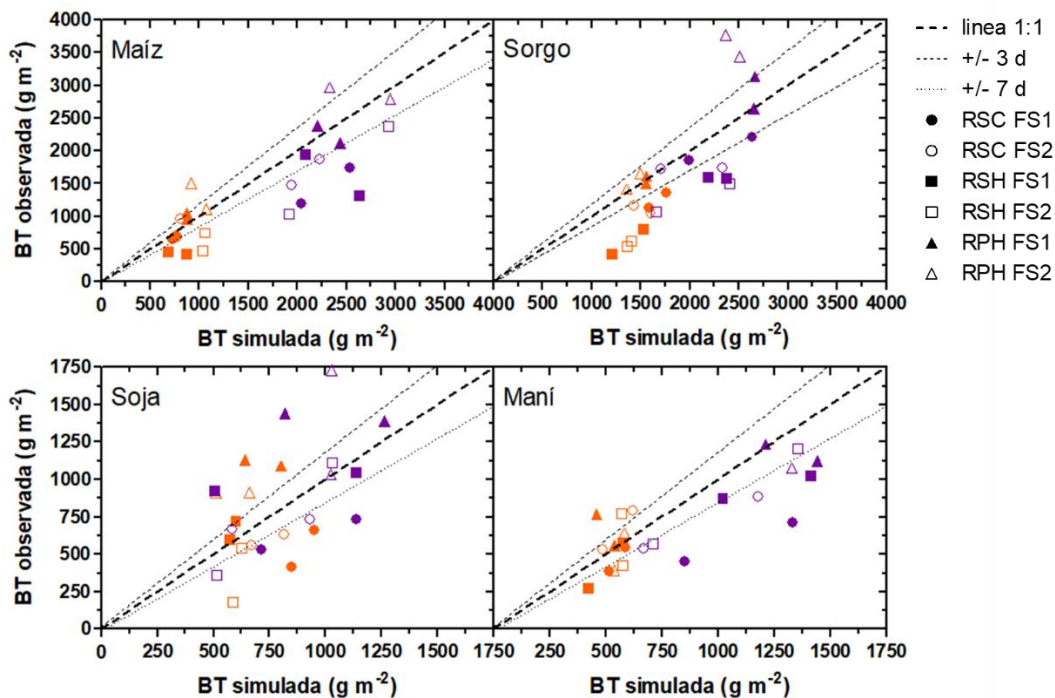


Figura 5.2. Biomasa aérea total (BT) para (i) inicio de llenado de granos en las legumbres y floración en los cereales (en anaranjado), y (ii) madurez fisiológica para las cuatro especies (en violeta). Los datos corresponden a los 12 ambientes evaluados. La línea cortada central corresponde a la relación 1:1 y las punteadas adyacentes corresponden a $\pm 15\%$. Abreviaturas de regiones y fechas de siembra como en Figura 5.1.

Cuadro 5.8. Nivel de precisión y sesgo en la predicción de la biomasa aérea total en floración (R1 maíz y E6 sorgo), fin del período crítico-inicio del llenado de grano (R5 soja y maní) y madurez fisiológica (MF), expresada en g m^{-2} (*RMSE*) y como porcentaje de la media observada (*rRMSE* y *rBias*) en todos los experimentos (Exp).

Especie	Medición	R5/R1/E6	MF
		Todos Exp	Todos Exp
MAÍZ	<i>RMSE</i>	-303	-653
	<i>rRMSE</i>	-38	-34
	<i>rBias</i>	-8	-22
SORGO	<i>RMSE</i>	-61	-987
	<i>rRMSE</i>	-4	-31
	<i>rBias</i>	4	22
SOJA	<i>RMSE</i>	-278	-335
	<i>rRMSE</i>	-40	-34
	<i>rBias</i>	-2	9
MANÍ	<i>RMSE</i>	-146	-309
	<i>rRMSE</i>	-26	-32
	<i>rBias</i>	3	-27

Los modelos mostraron una precisión menor en la predicción del rendimiento, aunque con un sesgo bajo (Figs. 5.3 y 5.4; Cuadro 5.9). La mayor imprecisión en sorgo y maíz sería en gran medida atribuible a la subestimación de los muy altos rendimientos logrados en la segunda fecha de siembra en Pergamino durante la primera campaña, que la simulación realizada no fue capaz de capturar. Si bien la evaluación general de los modelos tuvo valores de *rRMSE* algo elevados (22 a 37%), el *rBias* fue positivo y bajo en las cuatro especies (7 a 17%). Al analizar los componentes del rendimiento se observó que el desempeño de los MSAA para simular la variación del NG fue peor en ambos cereales (*rRMSE* 36-42%) que en las legumbres (*rRMSE* 28-33%). El PG, en cambio, fue aceptablemente simulado en todas las especies (*rRMSE* de 10-20%). Los valores de sesgo correspondientes a ambos componentes fueron siempre comparativamente menores a los del *rRMSE*, aunque se mantuvo la tendencia de valores más altos para los cereales que para las legumbres en el NG y bajos para todas las especies en el PG.

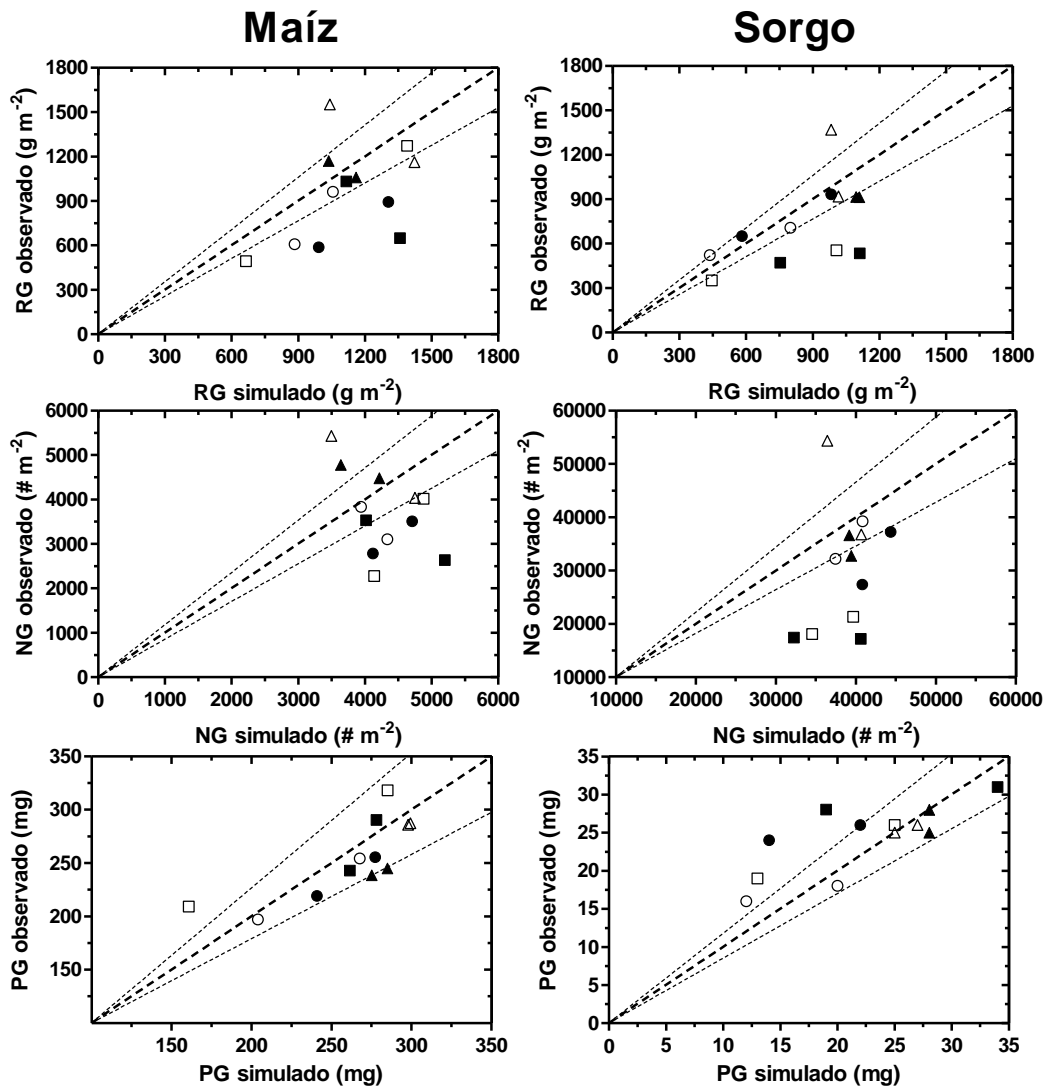


Figura 5.3. Rendimiento, número y peso de los granos observados y simulados para maíz y sorgo en los 12 ambientes evaluados. Los círculos, cuadrados y triángulos representan a la RSC, RSH y RPH, respectivamente. Los símbolos llenos corresponden a la fecha de siembra temprana y los vacíos a la fecha de siembra tardía. La línea cortada central corresponde a la relación 1:1 y las punteadas adyacentes corresponden a $\pm 15\%$.

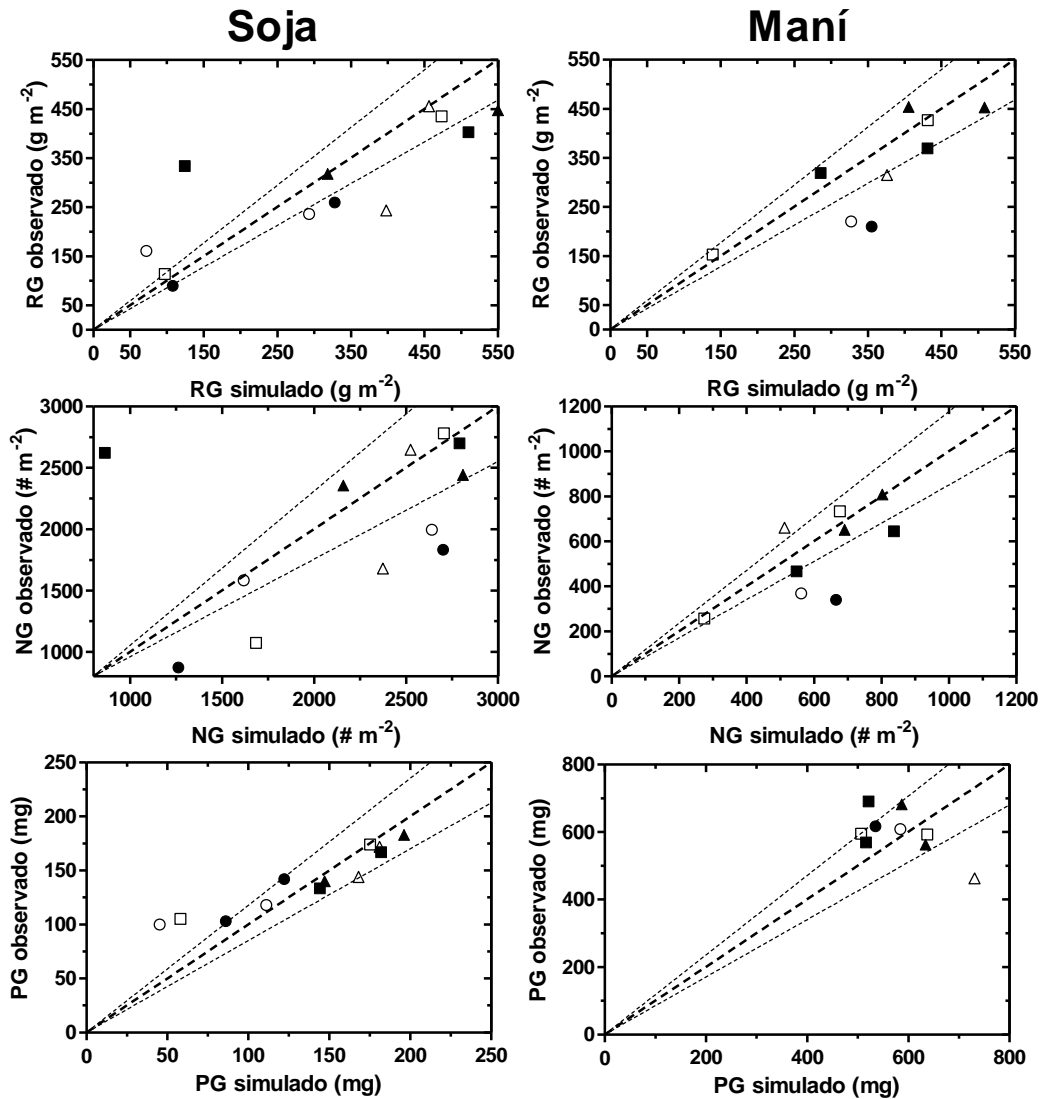


Figura 5.4. Rendimiento, número y peso de los granos observados y simulados para soja y maní en los 12 ambientes evaluados. Los círculos, cuadrados y triángulos representan a la RSC, RSH y RPH, respectivamente. Los símbolos llenos corresponden a la fecha de siembra temprana y los vacíos a la fecha de siembra tardía. La línea cortada central corresponde a la relación 1:1 y las punteadas adyacentes corresponden a $\pm 15\%$.

Cuadro 5.9. Nivel de precisión de cada modelo (*RMSE*, *rRMSE* y *rBias*) para el rendimiento en grano (RG) y el número (NG) y peso (PG) de los granos en todos los experimentos (Exp).

Especie	Medición	RG	NG	PG
		Todos Exp	Todos Exp	Todos Exp
MAÍZ	<i>RMSE</i>	-333	-1333	-26
	<i>rRMSE</i>	-35	-36	-10
	<i>rBias</i>	-17	-16	-3
SORGO	<i>RMSE</i>	-270	-12961	-5
	<i>rRMSE</i>	-37	-42	-20
	<i>rBias</i>	-17	-26	8
SOJA	<i>RMSE</i>	-95	-675	-25
	<i>rRMSE</i>	-32	-33	-18
	<i>rBias</i>	-7	-6	4
MANÍ	<i>RMSE</i>	-72	-154	-122
	<i>rRMSE</i>	-22	-28	-20
	<i>rBias</i>	-12	-13	2

5.3.2 Variabilidad explorada de rendimientos

Los rendimientos simulados para todas las condiciones experimentales exploradas por cada especie no se ubicaron de manera similar (i.e. hacia valores bajos, medios o altos) respecto a la totalidad de la variabilidad histórica de rendimientos simulada para cada una de las cuatro condiciones analizadas en cada región (Fig. 5.5), aunque sí se exploró buena parte de la variabilidad esperable en cada región al evaluarse el conjunto de alternativas. Así, por ejemplo, en el caso de la RPH las situaciones experimentales correspondieron predominantemente al tercil medio para maíz (50%, los otros casos en los terciles extremos), soja (igual que el maíz) y sorgo (75%, el otro caso en el tercil superior) pero no para maní (50% en el tercil superior y 50% en el inferior). En la RSC, en cambio, los casos predominaron entre los de los dos terciles inferiores (75% en maíz y 100% en las demás especies). En la RSH, en cambio, se cubrió mejor el rango de la variabilidad total esperable para la zona, principalmente en maíz y maní (datos para los

años experimentales en diferentes terciles según la función de frecuencia acumulada considerada) respecto a sorgo y soja (tendencia a ubicarse en los terciles extremos).

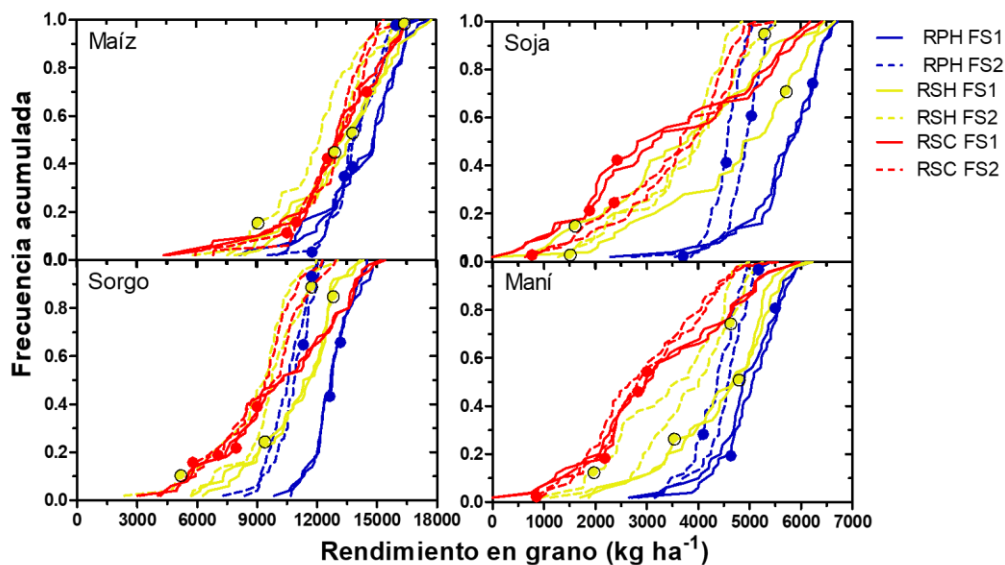


Figura 5.5. Frecuencia acumulada del rendimiento simulado de cuatro especies para un período de 50 años (1971–2021) en cada ambiente explorado. Los círculos destacan la ubicación de los rendimientos simulados para las campañas experimentales. Abreviaturas de regiones y fechas de siembra como en Figura 5.1.

5.3.3 Variabilidad de rendimientos en la RSC bajo distintos escenarios

5.3.3.1 Recarga inicial de agua

La recarga de agua edáfica al 10 de octubre mostró una elevada variabilidad interanual en la RSC (Fig. 5.6), aunque también condicionada por el tipo de suelo (Granville>Cramer>Buena Esperanza). Algunas campañas partirían con apenas 50 mm de agua útil en todo el perfil y otras con el perfil completamente cargado. Esto último corresponde a 237, 216 y 150 mm de agua útil para GR, CR y BE, respectivamente. Para cubrir esa variabilidad en los análisis de estrategias, para cada serie se definieron tres escenarios de recarga (Fig. 5.7): moderadamente Seco (mS, 35% de recarga del perfil hasta 2.1 m), moderadamente Húmedo (mH, 65% de recarga) y Húmedo (Hu, 100% de recarga). Sin

embargo, esos escenarios tienen distinta frecuencia según la serie de suelo (Fig. 5.6). En 2 de cada 3 años la serie BE, la más arenosa y con menos capacidad de almacenar agua, partió con los suelos en condición Hu, mientras que esta condición ocurrió en sólo 1 de cada 3 años en CR y GR. En el resto de los años, en las tres series de suelo, los escenarios mS y mH representaron aproximadamente la misma proporción (i.e. un tercio de los años en BE y dos tercios de los años en las otras dos series de suelo). A su vez, corresponde destacar que el escenario Hu de BE se compara en agua útil con el escenario mH en CR y GR, mientras el escenario mS de estas dos últimas series se compara al mH de BE (Figs. 5.6 y 5.7).

La distribución de la recarga en los distintos estratos del perfil en cada escenario se estableció en base a una simplificación de los datos simulados para las 50 campañas. Los años con una recarga elevada y baja (i.e. escenarios húmedo y moderadamente seco) tuvieron una distribución uniforme de la humedad a lo largo del perfil (Fig. 5.7). En cambio, en los años con recarga intermedia se encontró frecuentemente que el primer metro de suelo estaba relativamente cargado y el segundo relativamente seco (Fig. Suplementaria S1), por lo que se simplificó ese patrón para cada serie de suelo (Fig. 5.7).

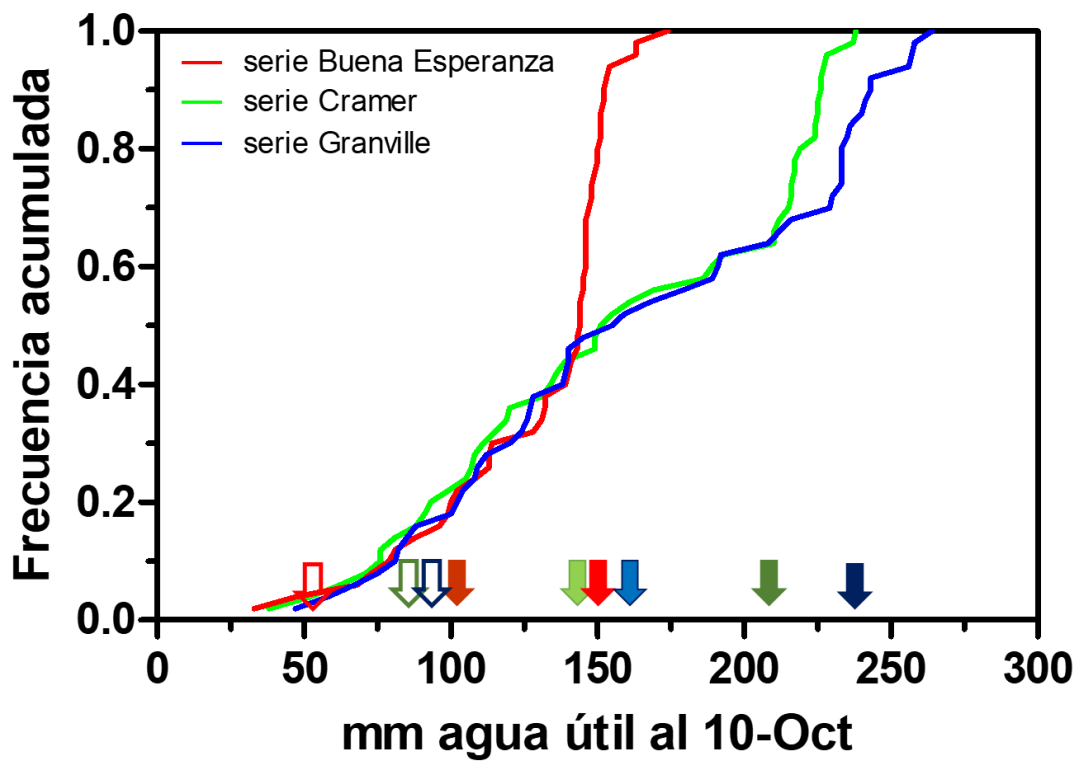


Figura 5.6. Frecuencia acumulada del contenido de agua útil simulado al 10 de octubre durante un período de 50 años (1971–2021) para las series de suelo Buena Esperanza (rojo), Cramer (verde) y Granville (azul) de la Región Semiárida Central. Las flechas corresponden a la ubicación del 35 (flechas vacías), 65 (flechas claras) y 100% (flechas oscuras) de agua útil para cada serie de suelo.

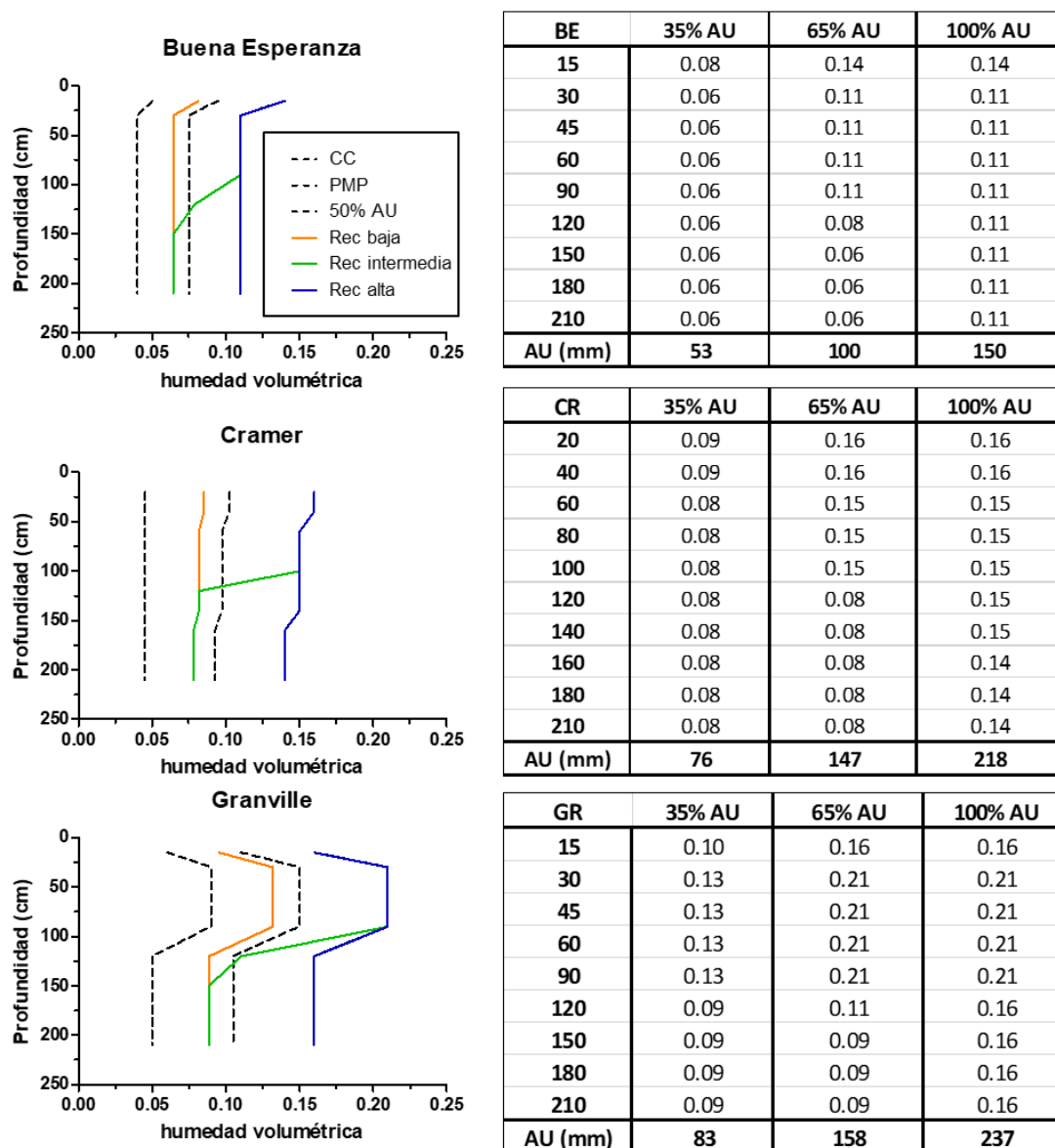


Figura 5.7. Contenido volumétrico de agua del suelo al 10 de octubre en función de la profundidad (en cm) para las series de suelo Buena Esperanza, Cramer y Granville según la recarga de humedad baja (anaranjada), intermedia (verde) y alta (azul) a partir de la serie histórica de datos climáticos (1971-2021). Las líneas continuas representan el punto de marchitez permanente (negra) y capacidad de campo (azul). La línea discontinua negra representa el 50% de agua útil. Las tablas ubicadas a la derecha de cada figura ilustran el contenido de humedad volumétrica por estrato de suelo y el contenido total de agua útil (AU) expresado en milímetros (mm).

5.3.3.2 Comparación de estrategias: modificación de fecha de siembra y sustitución de especies

A partir de los 3 escenarios de humedad al 10 de octubre y de las 3 series de suelo características de la RSC, se analizó la distribución de los rendimientos para la serie climática histórica, simulando tres fechas de siembras para maíz y soja y una fecha para maní y sorgo (Cuadro Suplementario S13). Para el caso del maíz, las diferencias de rendimiento entre fechas de siembra fueron mayores en los suelos con mayor capacidad de retención de agua (i.e. CR y GR) que en el suelo más arenoso (i.e. BE), en que fueron menores (Fig. 5.8). La siembra tardía de este cultivo (5 de diciembre) se caracterizó por presentar tanto *pisos de rendimiento* (i.e. percentil 20) como *techos de rendimiento* (i.e. percentil 90) más altos que las otras fechas. Los pisos fueron especialmente mayores respecto de la siembra temprana del 10 de octubre, mientras que las diferencias de techos fueron mucho menores. En la medida que la recarga al 10 de octubre fue mayor, las diferencias entre fechas de siembra se redujeron en los tres tipos de suelos. Particularmente para las siembras tempranas en los suelos menos arenosos, una buena disponibilidad inicial de agua redujo fuertemente el riesgo de una mayor reducción de rendimiento asociado a las mismas.

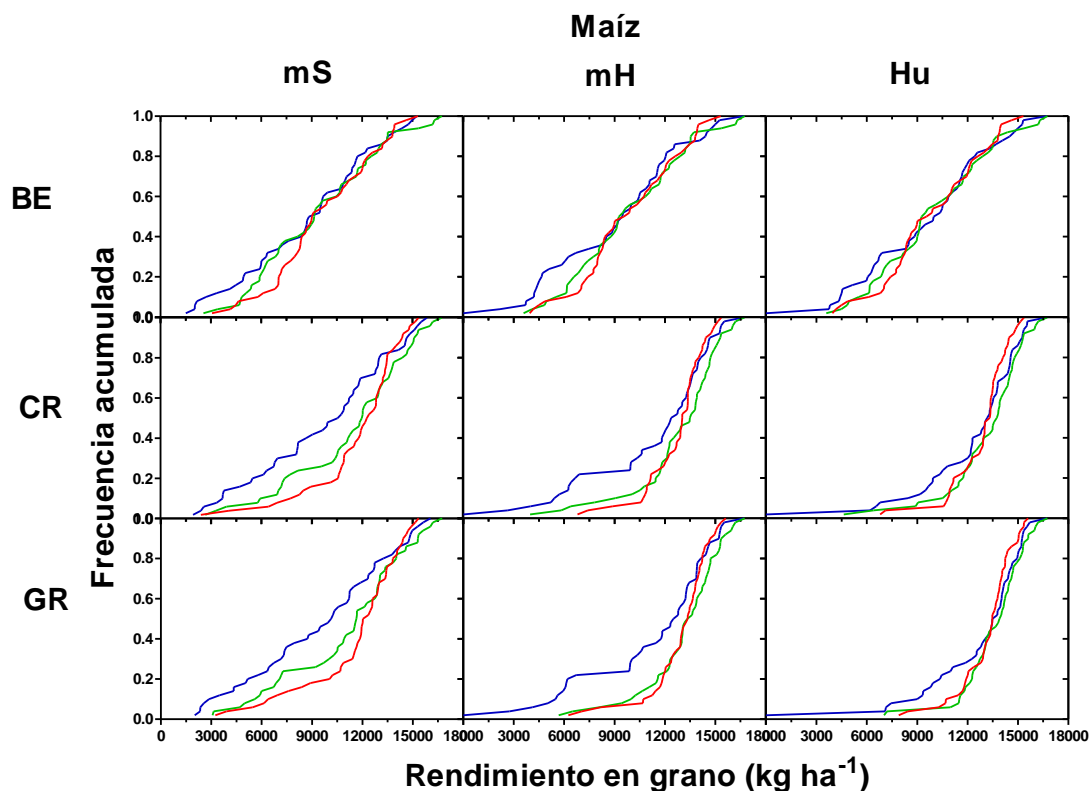


Figura 5.8. Frecuencia acumulada del rendimiento simulado de maíz para una serie histórica de 50 años (1971–2021) en la Región Semiárida Central, considerando los escenarios de recarga hídrica baja (mS-columna izquierda), intermedia (mH-columna intermedia) y alta (Hu-columna derecha) y las series de suelo Buena Esperanza (BE-fila superior), Cramer (CR-fila intermedia) y Granville (GR-fila inferior). Las líneas continuas representan a las fechas de siembra de 10 de octubre (azul), 20 de noviembre (verde) y 5 de diciembre (rojo).

En soja, similar a maíz, las características del suelo maximizaron o minimizaron las diferencias entre fechas de siembra. En los suelos con mayor capacidad de retención hídrica (i.e. CR y GR) se generaron grandes diferencias de rendimiento según la fecha de siembra, mientras que sobre el suelo con baja capacidad de retención (i.e. BE) las diferencias fueron mucho menores (Fig. 5.9). En la peor condición de recarga inicial (mS) los rendimientos superaron los 3000 kg ha⁻¹ en un 20, 40 y 45% de los años para BE, CR y GR, respectivamente, sembrando tardíamente (25 de noviembre). Sin embargo, la probabilidad de obtener rendimientos por encima de los 3000 kg ha⁻¹ (en BE) y de los 4000 kg ha⁻¹ (en CR y GR) sería superior en las fechas del 20 de octubre y 5 de noviembre. El

comportamiento fue similar para las recargas moderada (mH) y completa (Hu), con la fecha tardía superando a las dos tempranas para la probabilidad de rendimientos mayores a 3500 kg ha⁻¹ (en BE) y 4500 kg ha⁻¹ (en CR y GR). En la serie con mayor capacidad de retención y en años con buena recarga, las fechas de siembra temprana e intermedia nunca superaron en promedio a la fecha tardía. Adicionalmente, para el genotipo utilizado (GM V indeterminada), la fecha temprana nunca supera en promedio a las otras, si bien es la que alcanza los rendimientos más altos en algunos años.

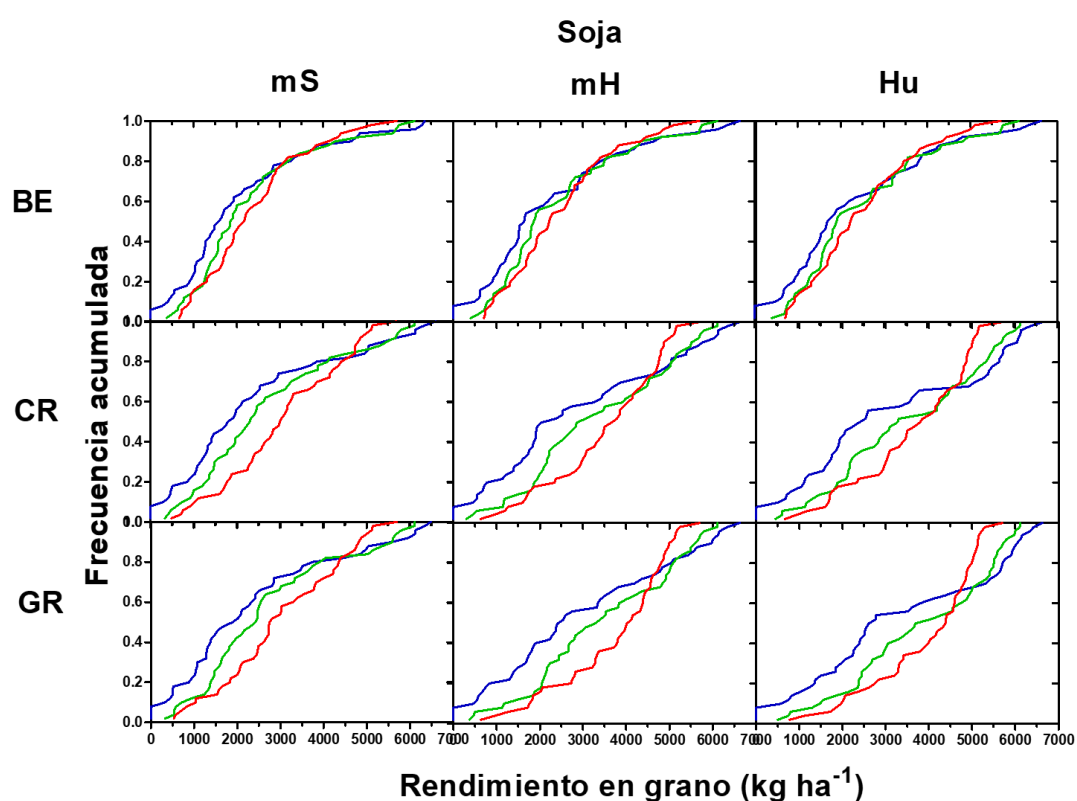


Figura 5.9. Frecuencia acumulada del rendimiento simulado de soja para una serie histórica de 50 años (1971–2021) en la Región Semiárida Central, considerando los escenarios de recarga hídrica baja (mS-columna izquierda), intermedia (mH-columna intermedia) y alta (Hu-columna derecha) y las series de suelo Buena Esperanza (BE-fila superior), Cramer (CR-fila intermedia) y Granville (GR-inferior). Las líneas continuas representan a las fechas de siembra de 20 de octubre (azul), 5 y 25 de noviembre (verde y rojo, respectivamente).

Para la época más habitual de siembra de sorgo, mediados de noviembre (se simuló el 20-Nov), su rendimiento sería ampliamente superado por el del maíz en todos los

escenarios evaluados (Fig. 5.10). La diferencia de rendimiento entre sorgo y maíz no se redujo al empeorar la condición hídrica, y ambos cultivos mostraron una clara respuesta al aumento del contenido de agua inicial, excepto en la serie más arenosa (BE), donde no existieron diferencias entre especies. Este último resultado estaría asociado a la escasa variación en recarga que ese suelo permite.

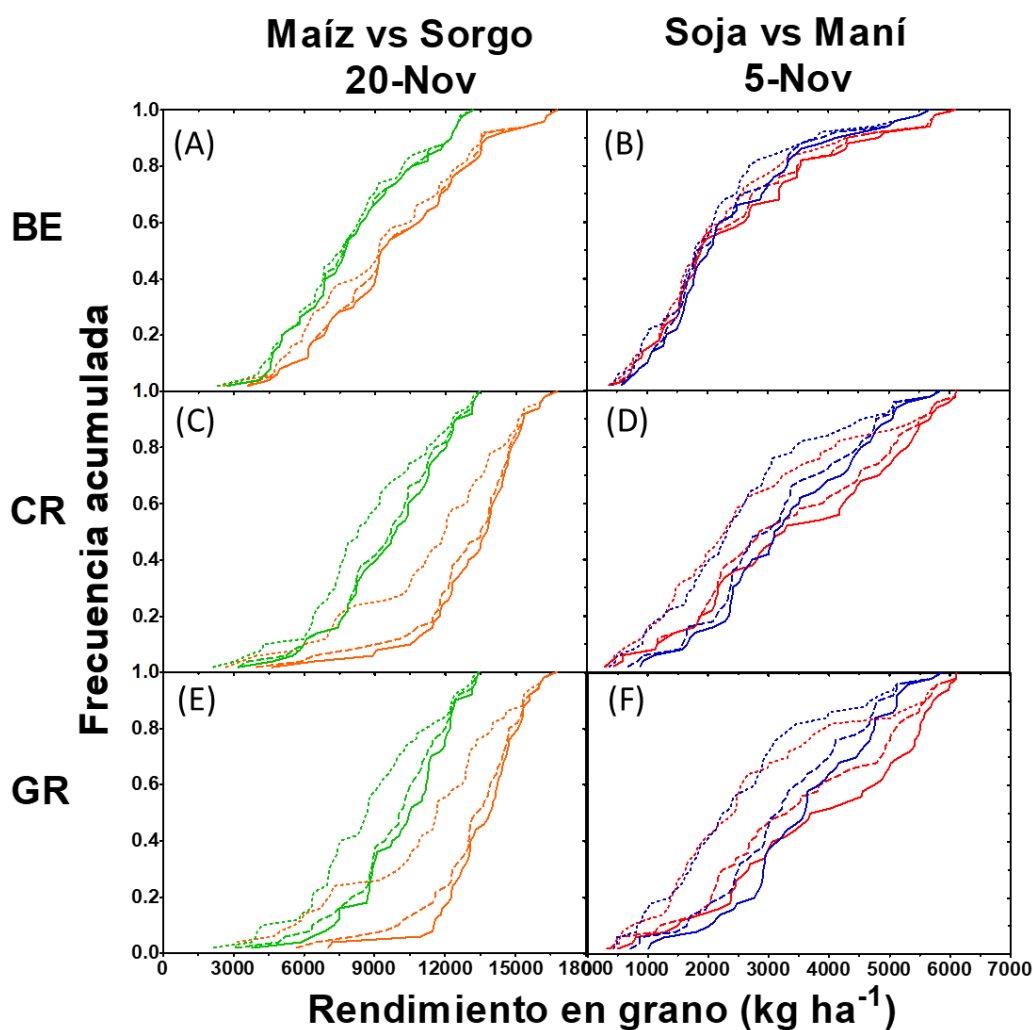


Figura 5.10. Frecuencia acumulada del rendimiento simulado de maíz y sorgo (A, C y E) y de soja y maní (B, D y F) para una serie histórica de 50 años (1971–2021) considerando una fecha de siembra intermedia y los escenarios de suelo Buena Esperanza (BE-A y B), Cramer (CR-C y D) y Granville (GR-E y F). Soja, maní, maíz y sorgo se representan por los colores rojo, azul, anaranjado y verde, respectivamente. Las líneas representan los escenarios de recarga hídrica baja (35%-punteada), intermedia (65%-cortada) y alta (100%-continua).

En la fecha de siembra más frecuente en la región para el maní, principios de noviembre (se simuló el 5-Nov), el rendimiento de este cultivo superaría al de soja en los

escenarios con rendimiento esperado $< 3000 \text{ kg ha}^{-1}$. Esta tendencia se invierte (RG soja $>$ RG maní) en los escenarios con rendimiento $> 3000 \text{ kg ha}^{-1}$ (Fig. 5.10). Por un lado, la menor diferencia de rendimiento entre ambas especies correspondería a los tres escenarios de recarga en la serie más arenosa. Por otro lado, la soja aventajaría claramente al maní cuando ambos crecen en las series con mayor capacidad de retención hídrica y la estación de crecimiento se inicia en las condiciones Hu (100% AU) y mH (65% AU).

Contemplando solo la variabilidad de rendimientos, se evaluó la ventaja relativa de un cambio (variación de la fecha de siembra) en el manejo de cada cultivo dominante (soja y maíz) respecto a la diversificación de cultivos para disminuir el riesgo agrícola (Fig. 5.11). Para ello se comparó la correlación entre fechas de siembra extremas para cada cultivo dominante respecto a la correlación que existe entre estos cultivos dominantes y sus cultivos alternativos (maní y sorgo, respectivamente) en una única fecha de siembra para cada uno. Para el caso del maíz, por un lado se destaca la baja correlación entre las fechas de siembra de principios de octubre y principios de diciembre ($r = 0.17$), lo cual indicaría que ambas estrategias son prácticamente independientes (Fig. 5.11A). Por otro lado, también se destaca para este cultivo la mayor variabilidad de rendimiento entre las siembras tempranas ($0-16717 \text{ kg ha}^{-1}$) que entre las tardías ($6791-15364 \text{ kg ha}^{-1}$), aunque dicha variabilidad se reduce considerablemente al no considerar el caso de rendimiento nulo estimado para una siembra temprana. Así, tomando todo el conjunto de datos de esta especie, el análisis de residuos a la relación 1:1 indicó que la siembra tardía superó en promedio a la temprana por 443 kg ha^{-1} (i.e., 3.57%). Si bien para el maíz existe una ventaja de las siembras tardías respecto a las tempranas, esta respuesta tiene lugar más claramente con rendimientos para temprana menores de 12192 kg ha^{-1} (i.e. tercil inferior de rendimiento para esta fecha), entre los cuales predominaron los años *La Niña* (41% de los casos) respecto a *El Niño* (29% de los casos). Para ese tercil ($n = 17$ casos),

la ventaja de las siembras tardías sobre las tempranas fue mucho más clara (+36%). En contrapartida, también fue clara, aunque de menor magnitud, la ventaja de las siembras tempranas respecto a las tardías (+13.5%) en el tercil superior de rendimiento ($RG > 13793 \text{ kg ha}^{-1}$ en siembra temprana), pese a existir en ese tercil una proporción aún mayor de campañas *La Niña* (47%) que en el tercil inferior. Consecuentemente, el beneficio de una u otra fecha de siembra no estaría para el maíz ligado exclusivamente a la oferta hídrica asociada a la variabilidad interanual provocada por el *ENOS*. Esta condición hace que la decisión de distribución porcentual de la superficie de maíz en cada campaña no pueda definirse exclusivamente por dicho pronóstico climático y vuelve aconsejable la opción de distribuir la superficie entre ambas épocas de siembra considerando que, si bien tiende a predominar la ventaja de las tardías respecto a las tempranas, existen también otros riesgos además del déficit hídrico (e.g., heladas tempranas y tardías, golpes de calor). A diferencia del maíz, la correlación entre fechas de siembra resultó más alta para la soja ($r = 0.60$; Fig. 5.11B), posiblemente debido al rango más estrecho de épocas de siembra posibles de esta especie. Tampoco fue muy diferente entre ellas el rango de rendimientos explorados. Tanto la siembra temprana de octubre ($0-6634 \text{ kg ha}^{-1}$) como la demorada a noviembre ($666-5699 \text{ kg ha}^{-1}$) cubrieron un rango muy amplio, aunque, coincidentemente con el maíz, nunca se proyectaron rendimientos nulos para la tardía como sí ocurrió para la temprana. También coincidentemente con el maíz, pero de manera más pronunciada que en el cereal, el análisis de residuos global indicó que la siembra tardía superó en promedio a la temprana por 523 kg ha^{-1} (i.e., 16.9%). Esta tendencia se acentuó muy pronunciadamente (+207%) para los años con expectativa de bajos rendimientos (tercil inferior), mientras que en años con expectativa de alto rendimiento el beneficio (+18.2%) fue para las siembras tempranas. A diferencia del maíz, en el caso de la soja sí sería más claro el beneficio de conocer anticipadamente la clasificación de la campaña según fase

del *ENOS*, ya que en el tercil inferior predominaron claramente las *Niñas* (47%) respecto a los *Niños* (17.6%) mientras lo opuesto ocurrió en el tercil superior (29.4% y 52.9%, respectivamente).

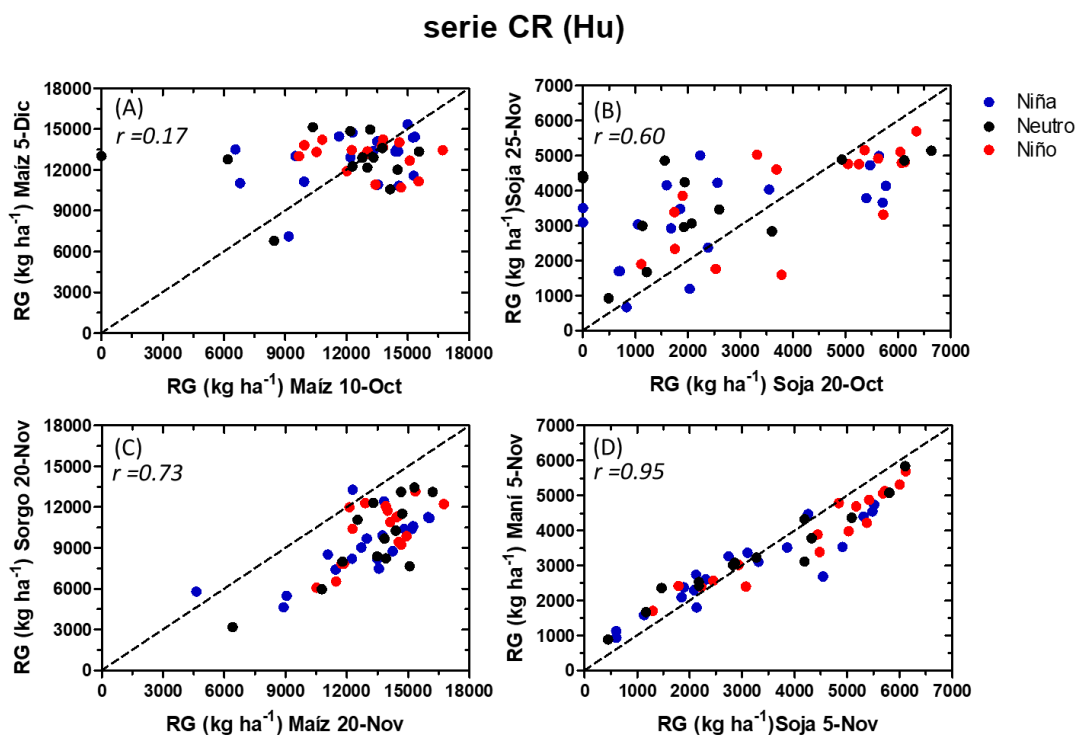


Fig. 5.11. Comparación entre (i) los rendimientos de maíz (A) y de soja (B) en dos fechas de siembra contrastantes, y (ii) los rendimientos de maíz vs sorgo (C) y soja vs maní (D). Los datos corresponden a los valores simulados para cada año de una serie histórica (1971-2021), considerando la serie de suelo Cramer (CR) y el escenario hídrico con 100% de humedad al 10 de octubre. La línea punteada representa la línea 1:1. Los colores de los puntos distinguen las diferentes fases del fenómeno *El Niño Oscilación del Sur*.

Cuando se comparó el rendimiento del maíz respecto al del sorgo (Fig. 5.11C) y el de la soja respecto al del maní (Fig. 5.11D) para evaluar la sustitución de especies, en ambos casos se obtuvo una alta correlación ($r=0.73$ para maíz-sorgo y $r=0.95$ para soja-maní). Este resultado indica para ambos casos una menor independencia para la estrategia de sustituir especies respecto a la estimada para el cambio en la fecha de siembra dentro de cada especie. En otras palabras, la elección entre cereales y entre legumbres no permitiría reducir el riesgo asociado a la variabilidad ambiental, ya que dentro de cada grupo

de especies no se modifica sustancialmente la época del año en la cual cada una ubica su etapa crítica, lo cual sí ocurre de manera más importante al modificar la época de siembra de una misma especie. No obstante, sí existieron diferencias importantes entre los cereales y entre las legumbres al considerar las respectivas sustituciones. Para los primeros casi no hubo condición alguna entre las evaluadas por simulación para la cual el sorgo representara una mejor alternativa que el maíz (sólo 2 campañas de las 50). Considerando todo el conjunto de datos, el sorgo representa una penalización al rendimiento de 26.5% respecto al de un maíz, tendencia que se sostiene tanto para el tercil inferior (-27%) como para el tercil superior (-26.7%). La tendencia también fue independiente de las fases del *ENOS*, ya que en promedio el sorgo penalizó el rendimiento en un 27.5% para *La Niña* y en un 25.6% para *El Niño*. La respuesta fue algo diferente entre las legumbres. Si bien el maní significaría en promedio una penalización del rendimiento de 5.34%, la tendencia no es uniforme a través de todos los ambientes explorados. Por un lado, el modelo lineal ajustado a la relación entre ambas legumbres ($RG \text{ maní} = 807.78 + 0.7168 RG \text{ soja}$) coincidió con la relación 1:1 en el valor de 2852 kg ha^{-1} , por encima del cual la soja aventajaría al maní y por debajo del cual el maní aventajaría a la soja. Considerando los terciles extremos, la soja tiene una clara ventaja sobre el maní en el alto (+14.2% respecto al promedio del tercil) pero es aún más clara la ventaja del maní sobre la soja en el bajo (+24% respecto al promedio del tercil). En este contraste se manifiesta fuertemente la influencia del *ENOS*, ya que en el tercil inferior se detectó un 52.9% de fases *La Niña* y un 17.6% de fases *El Niño*, tendencia que se invirtió en el tercil superior (29.4% *La Niña* y 52.9% *El Niño*). Este resultado dio lugar a un nuevo interrogante: ¿cuál sería la mejor decisión para este ambiente en el caso de existir ya en primavera un pronóstico de fase seca para el *ENOS*, sembrar maní el 5 de noviembre o atrasar la siembra de soja al 25 de noviembre? El primer aspecto destacado de esta comparación fue que, aunque la correlación entre

ambas alternativas resultó también alta ($r=0.857$), el valor umbral para decidir entre ellas fue de sólo 1854 kg ha^{-1} , dejando muy pocas campañas (sólo 8 de 50) en las cuales el maní superaría a una soja tardía. Así, el maní penalizó el rendimiento a través de todo el rango de ambientes evaluados en una magnitud similar (5.09%) a la obtenida respecto a una soja de siembra más temprana (5.34%), pero además no representó en este caso un beneficio claro aún para el tercil inferior de condiciones de producción (-1%).

5.4 Discusión

Este capítulo tuvo como objetivo evaluar la precisión de los modelos, contextualizar las condiciones de crecimiento exploradas y analizar escenarios productivos alternativos para la RSC que faciliten la toma de decisiones de manejo agrícola, considerando para ello tanto la variabilidad histórica interanual como el tipo de suelo y su recarga hídrica.

Los modelos CERES-Maize, CERES-Sorghum, CROPGRO-Soybean y CROPGRO-Peanut predijeron aceptablemente, sin sesgos importantes, la variabilidad de rendimientos a lo largo de una transecta longitudinal desde la zona húmeda a la semiárida de la región templada central de Argentina (Figs. 5.3 y 5.4). La evaluación de la precisión de las simulaciones respecto a estudios previos indicó un error bajo para la estimación de la fenología (en maíz, Lizaso et al. 2017; en soja, Messina et al. 2006; en sorgo, Sivamurugan et al. 2021; en maní, Suriharn et al. 2007) y algo mayor, pero con un sesgo bajo, para la simulación del RG de las cuatro especies (en maíz, Basso et al. 2016; en soja, Messina et al. 2006; en sorgo, Liang et al. 2021; en maní Suriharn et al. 2007; Guerra et al. 2008). El desempeño aceptable de los modelos para predecir la fenología permitiría

ubicar correctamente el ciclo y los periodos críticos, condición necesaria para inferir correctamente el RG y sus componentes (Evans 1993). Si bien estudios previos con modelos empíricos de uso zonal (Calviño et al. 2003) como semifuncionales simplificados (Otegui et al. 1996) destacaron que examinar un mayor número de variables no mejora la precisión, probablemente factores parcialmente incluidos en modelos semifuncionales como los de DSSAT expliquen el aumento del *RMSE* para el rendimiento en grano. Entre ellos se destacaría el efecto directo de las temperaturas supraóptimas y su interacción con la sequía, que debería ser considerado (Lizaso et al. 2017; Collins y Chenu 2021). En este sentido, existen evidencias que relacionan la reducción del rendimiento con el efecto de las temperaturas supraóptimas en maíz (Rattalino Edreida et al., 2011a; Rattalino Edreira y Otegui 2012), soja (Ergo et al. 2018; Veas et al. 2022), sorgo (Tari et al. 2013) y maní (Vara Prasad et al. 2000). En maní, además, la resistencia del suelo al enclavado no es considerada por el modelo y puede penalizar marcadamente el rendimiento (Haro et al. 2008), en particular en condiciones de sequía. A diferencia del error, tanto en términos absolutos (*RMSE*) como relativos (*rRMSE*), el sesgo (*rBias*) para el RG fue bajo, con una pequeña sobreestimación de los modelos respecto a los datos observados (Cuadro 5.9). Debido a la ausencia de sesgo importante para el RG se consideró aceptable ubicar el año experimental dentro de la variabilidad climática de cada región y evaluar el rango de rendimientos explorados para cada cultivo.

La limitación hídrica es una determinante muy fuerte de la variabilidad de rendimiento esperable en los cuatro cultivos. Dicha variabilidad, en parte asociada a anomalías en las precipitaciones (Podestá et al. 1999; Magrin et al. 2005), genera inestabilidad a lo largo de la transecta longitudinal desde la zona húmeda (RPH) a la sub-húmeda (RSH) y finalmente semiárida (RSC) de la franja templada central. Tanto RSH como RSC suelen

considerarse aún más inestables que la RPH debido al menor régimen de lluvias y la mayor demanda ambiental, que combinados determinan menores rendimientos en las cuatro especies estivales de interés (de la Casa y Ovando 2016). En este sentido, si bien ambas campañas analizadas correspondieron a fases *La Niña* del fenómeno *ENOS*, la intensidad de la fase fue mayor en la segunda que en la primera. Este contraste de las condiciones ambientales entre ambas campañas se evidenció en el contenido de humedad del suelo hasta los 2 m de profundidad (Capítulo 2, Fig. 2.4). La menor capacidad de retener agua junto con la mayor facilidad para ceder agua de los suelos de la RSC respecto a la RPH y el uso de riego complementario en esta última generaron diferencias sustanciales en cuanto al rango de rendimientos explorado en cada una, siendo $RPH > RSC$. A la RSH le correspondió una situación intermedia. Resultados similares entre tipos de suelos y extracción de agua de distintas especies han sido documentados tanto para Argentina (Dardanelli et al. 2004) como otros lugares del mundo (Ratliff et al. 1983) al evaluar el rendimiento de cultivos extensivos primavera-estivales para grano en regiones templadas.

Focalizando en las épocas de siembra estudiadas en cada región y a diferencia de lo documentado previamente en maíz, en que la fecha tardía superó a la temprana en prácticamente todos los escenarios (Mercau y Otegui 2014; Otegui et al. 2021), en las simulaciones de esta tesis la siembra temprana aventajó a la tardía en una proporción importante de años (Fig. 5.5). Esta aparente discrepancia se explica esencialmente por la condición hídrica evaluada, que fue exclusivamente en secano para los trabajos previos y con aplicación de riegos complementarios en la presente tesis. Estos últimos beneficiarían proporcionalmente más a las siembras tempranas que a las tardías en la RPH, acercando los resultados a una condición potencial en la cual las primeras generalmente aventajan a las segundas (Otegui et al. 1996). A su vez, en la RSC se utilizó como fecha tardía principios de diciembre, que si bien reduce ampliamente la probabilidad de heladas tardías

temprano en el ciclo no permitiría alcanzar una recarga alta del perfil como la que muchas veces se logra para siembras más tardías de diciembre. En contrapartida, estas últimas tienen el problema concomitante de un aumento en la probabilidad de heladas tempranas que interrumpen anticipadamente el llenado del grano (Otegui et al. 2023).

Independientemente de la región y del manejo, las dos principales especies sembradas en las tres regiones evaluadas en esta tesis (maíz y soja) exploraron un rango amplio de RG, al igual que los cultivos de ambientes semiáridos con mejor adaptación frente a sequías y muy altas temperaturas, como el maní (Devries et al. 1989; Chakraborty et al. 2018) y el sorgo (Farré y Faci 2006; Singh et al. 2015). Estos resultados coinciden con las desviaciones de los rendimientos medios de las últimas dos décadas en Argentina en torno a su tendencia incremental (D.E. 10, 13, 8 y 21 % para maíz, soja, sorgo y maní, respectivamente; SAGyP 2023). La expectativa de rendimiento y el riesgo de producción de los cultivos se ven fuertemente modificados por la capacidad de retención de agua de los suelos y la recarga inicial de los mismos (Sadras y Calviño 2001; Archontoulis et al. 2020). En la RSC, donde la limitante hídrica es más frecuente, todas las especies mostraron un mejor desempeño cuanto mayor fue la capacidad de retener agua del suelo y el contenido de agua a la siembra (Helms et al. 1997; Nielsen et al. 2009; Lu et al. 2017). La comparación de las especies mesofíticas más sembradas con las especies alternativas de ambientes semiáridos permitió analizar la posibilidad de diversificar la producción agrícola como alternativa para reducir el riesgo asociado a ella. Al comparar ambas legumbres en tres tipos de suelos y niveles de humedad, el maní marcó una clara ventaja sobre la soja en los ambientes de baja productividad (Fig. 5.10 B, D y F). Una comparación similar entre estas mismas legumbres en una región semiárida del sur de Asia destacó el mismo comportamiento, con el maní alcanzando un rendimiento superior al de la soja en ambientes de secano con sequía impuesta, respuesta atribuida a una mayor duración

del ciclo y consecuentemente plasticidad para capturar recursos (Pandey et al. 1984). La menor tasa de extracción de agua de maní respecto de soja (Dardanelli et al. 2004) podrían explicar la ventaja del primero en los ambientes con rendimientos esperados más bajos explorados en esta tesis. Esto último le permitiría al maní administrar mejor el agua que a la soja en regiones con sequías periódicas, dado que la mayor tasa de extracción de soja generaría un elevado consumo de agua previo al periodo crítico, penalizando fuertemente su rendimiento (Dardanelli et al. 2004; Grassini et al. 2020). Si bien hubo una alta correlación entre ambas especies para las campañas analizadas al considerar el tipo de suelo evaluado en la tesis y una recarga inicial alta, conocer anticipadamente la clasificación de la campaña según la fase del fenómeno *ENOS* constituiría una herramienta útil para decidir la mejor opción entre ambas legumbres (Podestá et al. 1999; de la Casa et al. 2021). Los ambientes de bajos rendimientos para soja respecto a maní se asociaron a fases *La Niña* del mencionado fenómeno, tendencia que se invirtió para la fase *El Niño* (i.e. rendimientos esperados más altos para soja que para maní, Fig. 5.11D). Adicionalmente, en el caso de soja sería posible retrasar la siembra para disminuir la inestabilidad interanual del rendimiento, una estrategia que en maní requeriría la incorporación de germoplasma de ciclo más corto para escapar de las heladas tempranas (Rachaputi et al. 2021; Casali et al. 2022). En caso de no modificarse la fecha de siembra en maní ante un pronóstico de fase seca del *ENOS*, la alternativa de una soja tardía lo aventajaría en prácticamente todos los años pues reduce el riesgo ambiental asociado a la ubicación de la etapa crítica (Awal y Ikeda 2003; Haro et al. 2008).

En cuanto a los cereales, a diferencia de lo que ocurrió entre las legumbres, el sorgo no superó al maíz en prácticamente ningún escenario evaluado (Figs. 5.10 A, C y E). Estudios previos han destacado la superioridad de maíz en ambientes potenciales (Mu-

chow, 1989a), tendencia que se esperaba fuese inversa cuando ambos cultivos son sometidos a deficiencias hídricas muy severas características de ambientes semiáridos como los explorados en esta tesis (Muchow, 1989b). La literatura científica ha destacado el cultivo de sorgo sobre el de maíz bajo distintos escenarios de restricción hídrica, explicando esta respuesta por una mayor generación de biomasa y eficiencia en el uso del agua (Farré y Faci 2006; Zegada-Lizarazu et al. 2012). Sin embargo, a partir de las estimaciones de esta tesis, sustentadas en simulaciones utilizando los datos climáticos de 50 campañas y partiendo de una alta recarga de un tipo de suelo agrícola característico de la zona, no se comprobó la supuesta superioridad de sorgo aún en los años donde los rendimientos esperados eran bajos (e.g. campañas correspondientes a fase *La Niña*). La superioridad de maíz respecto a sorgo fue similar y sostenida independientemente de la fase del *ENOS* considerada (Fig. 5.11C). Por un lado, la asimetría en el grado de inversión en mejoramiento entre ambas especies (maíz >> sorgo) habría estrechado la ventaja que décadas atrás tenía el sorgo sobre el maíz en ambientes propensos a la sequía (Mason y Eskridge 2008; Parra et al. 2020, 2022). Por otro lado, retrasar la siembra del sorgo implica el cambio de híbrido por uno de ciclo más corto, reduciendo el rendimiento potencial pero también aumentando el riesgo de ubicar la etapa crítica en el período de alta demanda atmosférica y mayor riesgo de golpe de calor, cambio que en maíz no sería necesario. Adicionalmente, en sorgo no es posible adelantar la siembra en igual grado que en maíz, dado que su mayor temperatura base respecto a este último promovería en esas condiciones un menor logro de plantas y una emergencia más desuniforme, generando problemas en la implantación y el desempeño posterior del cultivo (Debaeke et al. 2006).

La posibilidad de variar la fecha de siembra, especialmente en maíz pero también en soja, es una estrategia de adaptación a la oferta de agua que permite cambiar fuertemente el resultado final de un cultivo. En ambas especies, la siembra tardía resultó una

estrategia útil para lograr aumentar los pisos de rendimiento en la RSC (Fig. 5.11 A y B). En el caso de maíz la siembra tardía fue claramente superior a la temprana e intermedia, mientras que en soja dicha fecha de siembra tuvo ventajas en ambientes de menor rendimiento (Marek et al. 2020). En disidencia con análisis previos, según los cuales el retraso de la fecha de siembra de la soja siempre se asoció con menores rendimientos (Hu y Wiatrak 2012; Rowntree et al. 2013), en esta tesis el rendimiento promedio de la fecha temprana nunca superó al de las otras dos, si bien alcanzó los rendimientos más altos en algunos años. Esta aparente inconsistencia entre estudios estaría señalando diferencias relativas importantes en el factor limitante del rendimiento. Así, en la RSC los efectos muy negativos de deficiencias hídricas severas a las que frecuentemente se exponen los cultivos de siembra temprana serían superiores a los efectos negativos de un cierto atraso en la fecha de siembra documentados para otros ambientes más húmedos. En cuanto a maíz, el RG de la siembra tardía casi siempre superó al de la siembra temprana para condiciones de secano, generando además menos incertidumbre y mayor estabilidad de rendimientos entre campañas (Gambin et al. 2016; Maddonni 2012; Mercau y Otegui 2014; Rotili et al. 2019). Tanto soja como maíz evidenciaron una mayor variabilidad interanual en el RG en secano con el adelantamiento de la fecha de siembra, coincidente con lo documentado para maíz en las mismas regiones de estudio (Otegui et al. 2021) y para soja en la RPH (Podestá et al. 2009). La importancia de determinar la fecha de siembra más conveniente adquiere una relevancia más significativa en el caso de la soja en comparación con el maíz, dado que no existiría un predominio claro de una fecha sobre otras en todos los escenarios. Por ejemplo, en años con pronósticos de rendimientos elevados sería mayor la penalización por atrasar la fecha de siembra en soja que en maíz, como suele ocurrir en regiones húmedas (Bastidas et al. 2008; Grassini et al. 2015).

Finalmente, al considerar las fases del *ENOS*, en maíz la siembra tardía en la RSC superó claramente a la temprana en los ambientes con rendimientos esperados menores a 12192 kg ha^{-1} , rango en el cual no hubo un predominio de campañas *La Niña* diferente al registrado por encima de ese umbral (Fig. 5.11A). Además de la oferta hídrica, otros factores ambientales que reducen los rendimientos logrados en la región (e.g. probabilidad de heladas, temperaturas supraóptimas) promueven estas respuestas (Long et al. 2005; Rattalino Edreira y Otegui 2012), aunque algunos aspectos aún no se encuentran perfectamente abarcados por los MSAA (Gabaldón-Leal et al. 2016). En cuanto a la soja, hubo una clara ventaja de la siembra tardía en los años con rendimientos esperados bajos, en los cuales para este cultivo sí hubo un predominio de fases *La Niña* (Fig. 5.11B). En este caso, conocer anticipadamente la clasificación climática de la campaña tendría un papel clave con probables beneficios económicos adaptando el manejo a la fase *ENOS* (Bert et al. 2007). Los hallazgos de esta investigación revelan que tanto el rendimiento promedio de la soja como el de maíz presentaron una ventaja al optar por la siembra tardía en comparación con la temprana, siendo esa ventaja más pronunciada en soja que en maíz según el pronóstico climático de la campaña. En este último, además de los beneficios productivos de retrasar la fecha de siembra, hay beneficios económicos relacionados con estrategias más defensivas en cuanto a requerimientos de insumos y elección de densidades (Maltese et al. 2019, 2020). La implementación de una estrategia adaptativa por parte de una empresa agrícola en la RSC contribuirá a reducir el riesgo asociado. En este contexto, la toma de decisiones referidas al cambio de la especie se presenta como un proceso que involucra consideraciones más complejas y, según el análisis del presente capítulo, carece de ventajas claras. Sin embargo, la modificación de la fecha de siembra en maíz y soja surge como una alternativa más factible y de alto impacto.

5.5 Conclusiones

Este capítulo llevó a cabo por un lado una evaluación exhaustiva de la capacidad de los modelos para predecir los resultados experimentales, seguido de un análisis detallado de su representatividad con respecto a los ambientes de cada región. Por otro lado, evaluó estrategias en soja, maíz, maní y sorgo en la RSC utilizando MSAA para analizar la variabilidad anual de los rendimientos. Una menor capacidad de retención de humedad de los suelos y una baja recarga inicial redujeron los rendimientos y aumentaron el riesgo asociado en los cuatro cultivos. El retraso de la fecha de siembra en soja y maíz redujo el riesgo independientemente de los dos aspectos hídricos antes mencionados. El cultivo de maní como alternativa de soja reduciría el riego en escenarios más secos asociados a *La Niña*, aunque menos comparado con una siembra tardía de soja. El cultivo de sorgo prácticamente no superó a maíz. Para reducir el riesgo en maíz y soja, la mejor estrategia fue combinar fechas de siembra respecto a la elección de especies de ambientes semiárido. El fenómeno climático *ENOS* tuvo un papel destacado como herramienta a la hora de decidir entre fechas de siembra de maíz y especialmente de soja. El estudio comparativo de la Ecofisiología y este estudio apoyado en modelos de simulación incorporando la variabilidad climática y ambiental, revela oportunidades claras para optimizar estrategias de producción en regiones semiáridas de Argentina, que contribuyan a sostener la mejora de los rendimientos a nivel nacional.

CAPÍTULO 6

DISCUSIÓN GENERAL

6.1. Introducción

Existe un consenso general de que la mejora de la producción mundial de granos necesaria para cubrir su demanda a futuro deberá sustentarse en aumentar el RG (Fischer y Edmeades 2010; Ray et al. 2013). Sin embargo, en Argentina el rendimiento promedio nacional de maíz y soja se ha mantenido prácticamente invariable durante las últimas dos décadas, entre los quinquenios 2001-2006 y 2017-2022 (ca. 6456 y 7133 kg ha⁻¹ para maíz, ca. 2610 y 2827 para soja; SAGyP 2023), con incrementos en la producción anual de maíz y soja para dicho período de 20.1 a 46.7 M Tn y de 35 a 45.7 M Tn, respectivamente. Este incremento productivo respondió al aumento en la superficie cultivada de maíz y soja, motivado por la expansión de la frontera agrícola hacia áreas consideradas marginales o frágiles, como la RSC (Viglizzo y Jobbágy 2010). En dicha región, las especies más adaptadas a los ambientes semiáridos, como sorgo y maní, podrían convertirse en una alternativa productiva viable considerando su respuesta frente a sequías y temperaturas supraóptimas (Devries et al. 1989; Muchow 1989a), como también por su inserción en las cadenas de valor de la RSC. En este contexto, el estudio de los procesos fisiológicos asociados a la generación del RG de las principales especies estivales y de sus alternativas es central para identificar rasgos de interés que les confieran ventajas de unas sobre otras y, al mismo tiempo, evaluar su comportamiento a través de un gradiente edafoclimático en la región central, que integre a las regiones sub-húmeda y pampeana húmeda. Además de la elección de la especie, cambios en las prácticas de manejo, como lo es la elección de la fecha de siembra, pueden cobrar aún más importancia en la RSC respecto a las otras dos (Otegui et al. 2021). Sin embargo, al momento de iniciar esta tesis, en la RSC pocos trabajos habían estudiado en alguno de estos cultivos el impacto de las prácticas de manejo (e.g. fecha de siembra en maíz; Mendez et al. 2018) y ninguno lo

había hecho en simultaneo para más de un cultivo con similar manejo agrícola (i.e., control de plagas y enfermedades, fecha de siembra), menos aún a lo largo del gradiente antes detallado. Las diferencias en atributos propios de cada especie (e.g., grupo fotosintético, variabilidad en el índice de cosecha y la eficiencia en el uso de los recursos) podrían explicar diferencias en cuanto a su tolerancia/sensibilidad a los estreses abióticos expuestos en cada región. El análisis ecofisiológico se complementó con uno probabilístico que comparó el impacto de la variabilidad climática en la RSC sobre el rendimiento de las cuatro especies, utilizando para ello modelos de simulación de cultivos. Bajo este contexto, el objetivo principal de esta tesis fue: *“comparar ecofisiológicamente la determinación del rendimiento de cuatro cultivos de verano (Maíz, Soja, Sorgo y Maní) en una transecta edafoclimática, ubicada a similar latitud desde la región Pampeana Húmeda a la Región Semiárida Central, y en esta última, donde constituyen las principales alternativas agrícolas, comparar la distribución esperable de sus rendimientos bajo la variabilidad interanual del clima y la variabilidad de suelos en la región”*. De esta forma, se buscó comprender las posibles similitudes y diferencias entre estas especies primavero-estivales, que comparten importancia productiva y económica local y nacional.

El siguiente capítulo de discusión general estará dividido en 2 subsecciones. En la primera se contrastarán las hipótesis planteadas en el capítulo de Introducción General, mientras que la segunda parte tratará sobre las posibles perspectivas futuras a realizar para profundizar sobre los resultados aportados por esta tesis.

6.2. Contraste de hipótesis

Hipótesis 1: El RG potencial en secano de las cuatro especies evaluadas responderá al índice de aridez ambiental (oferta de agua/demanda atmosférica) discriminando a los cultivos mesofíticos (maíz y soja) de aquellos de ambientes semiáridos (sorgo y maní).

En base a los resultados obtenidos en los experimentos, se rechaza la hipótesis propuesta. Si bien todos los cultivos respondieron al IA, las diferencias entre especies no fueron significativas. La tendencia indicó que la especie cuyo RG resultó más sensible al mismo fue el maní, seguida por maíz y soja, con similar comportamiento, y finalmente el sorgo con menor sensibilidad (Capítulo 3, Fig. 3.4A). Mientras el RG de todas las especies estuvo fuertemente determinado por la producción de biomasa, el índice de cosecha fue particularmente importante en maní (Cuadro Suplementario S2). Las reducciones pronunciadas del IC en esta especie se explicaron por condiciones de deficiencias hídricas en un momento crítico como el enclavado, volviendo a este cultivo aún más sensible al déficit hídrico que el *a priori* considerado más vulnerable (i.e. el maíz). La razón de este resultado fue la total incapacidad para fijar granos del maní en algunas condiciones particulares, tendencia que ya había sido documentada en experimentos manipulativos de la condición del horizonte superficial (Haro et al., 2008) pero no había alcanzado la magnitud del presente estudio en condiciones naturales. El NG nulo tuvo la consecuente disminución del IC, que en esta tesis también alcanzó su mínima expresión con un IC=0 (Capítulo 3, Fig. 3.4A).

Por lo que se refiere a los componentes numéricos del RG, se pudo verificar un comportamiento mucho más diverso del PG que del NG respecto al RG (Capítulo 3, Fig. 3.4A), ratificando los conocimientos existentes al respecto (Andrade y Sadras 2000; Satorre et al. 2003). Si bien existieron diferencias entre las cuatro especies en la ubicación de la etapa crítica para la definición del NG, pudo generalizarse que el RG siempre estuvo asociado a este componente, el cual a su vez estuvo fuertemente asociado con el crecimiento del cultivo en la correspondiente etapa crítica (Capítulo 3, Figs. 3.6 A y B). En cuanto al PG, su relación con el RG fue muy estrecha para soja y maíz, pero no para maní

y sorgo, con un efecto positivo de la TCC durante el llenado sobre el PG de los primeros, pero no de los segundos (Capítulo 3, Figs. 3.8 A y B). A diferencia de las demás especies, en el caso del maní el PG tendió a mayores valores relativos en los ambientes de mayor aridez y menor oferta hídrica (Capítulo 3, Figs. 3.8 C y D). Este efecto negativo se explicaría no sólo por pudrición (principalmente cuando hay más arcilla como en la RPH, que no favorece un drenaje rápido de los excesos hídricos), sino también por una mayor disminución de la temperatura en otoño en los suelos húmedos, con consecuencias negativas sobre el llenado del grano por menor actividad de esos destinos.

En cuanto a la captura de recursos (i.e. RFAint y ETc) empleados para dar lugar al RG y la producción de biomasa, los valores medios de radiación fotosintéticamente activa interceptada durante la ventana reproductiva señalaron, en promedio, a la soja como la especie con menor capacidad para capturar radiación y al sorgo como la especie con mayor capacidad. Estas diferencias en RFAint no se manifestaron en igual sentido en el caso de las gramíneas para la ETc del cultivo durante igual período, en que el maíz tuvo un consumo superior al del sorgo. En el caso de las legumbres, el consumo hídrico del maní fue superior al de la soja (Capítulo 3, Cuadro 3.1).

A su vez, los resultados obtenidos indicaron que la generación de biomasa, principal determinante fisiológico del RG, tuvo mayor respuesta al incremento de la EUR y EUA que a las variaciones en captura de luz y agua en todas las especies a lo largo del ciclo (Capítulo 4, Fig. 4.2). En línea con estudios previos, estos resultados confirman el avance en la productividad de genotipos modernos de las cuatro especies a partir de mejoras en la eficiencia en el uso de los recursos respecto a la captura de los mismos (Haro et al. 2017 en maní; Curin et al. 2020 en maíz; de Felipe et al. 2020 en soja; Demarco et al. 2022 en sorgo). Adicionalmente, en esta tesis la generación de biomasa en la etapa

reproductiva respondió a ambas eficiencias tanto para los cereales como para las legumbres (Cuadro Suplementario S8).

Hipótesis 2: La ocurrencia de temperaturas supraóptimas durante el período crítico para la determinación del NG afectará a este componente y consecuentemente al RG.

Esta hipótesis no se pudo poner a prueba. Si bien la tendencia fue en el sentido esperado (i.e. hubo una correlación negativa entre el NG y las temperaturas supraóptimas durante el periodo crítico en todas las especies), la correlación entre ambas variables nunca fue estadísticamente significativa (Cuadro Suplementario S3). Por un lado, en los ambientes donde se registraron temperaturas supraóptimas durante la etapa crítica (RSH y RSC), éstas interactuaron con otros factores ambientales de efecto negativo para el NG, como la sequía (sintetizada en el IA) y el DPV. Por otro lado, en condiciones de campo en que estas interacciones son comunes, las temperaturas supraóptimas no tendrían el mismo peso en la determinación del NG que otras variables (e.g. IA, DPV), con las cuales este componente mostró asociaciones significativas más allá de los posibles efectos confundidos entre ellas. En función de estas consideraciones, una cuantificación apropiada del impacto relativo de cada una de las variables *a priori* consideradas negativas para la determinación del NG (IA, OH, DPV, $hs > 35$) no sería posible sin la inclusión de una condición hídrica no limitante en cada uno de los ambientes evaluados (Cicchino et al. 2010; Rattalino Edreira et al. 2011b; 2012), lo cual no estaba dentro de las posibilidades de ejecución de esta tesis.

Hipótesis 3: La EUA se modificará según el gradiente de DPV explorado, siendo la respuesta distinta entre las especies.

En base a los resultados obtenidos de los experimentos, se acepta la hipótesis propuesta. Para los cereales y soja se verificó que la EUA se asoció positivamente con la oferta hídrica y negativamente con el DPV, excepto en maní (Capítulo 4, Fig. 4.4). En esta última, la EUA respondió sólo a la RFA (Cuadro Suplementario S6). Cuando un cultivo se encuentra transpirando activamente, la temperatura del follaje es menor a la del aire y dependiente del DPV. Caídas en la disponibilidad de agua en el suelo que reducen el flujo transpiratorio provocan aumentos en la temperatura foliar (Dardanelli et al. 2003). La temperatura foliar puede incluso superar a la del aire, siendo esta diferencia máxima cuando se produce un cierre estomático pronunciado. En este estudio, los ambientes con alto DPV (RSC y RSH) coincidieron con una oferta hídrica en muchos casos altamente reducida, que en conjunto no permitieron expresar los beneficios sobre la EUA del control estomático parcial que se observa ante el aumento del DPV sin restricciones hídricas (Fletcher et al. 2007; Gholipour et al. 2013) o en respuesta a una restricción hídrica moderada (Liu et al. 2005). Este control se traduce en una mayor restricción a la pérdida de agua que a la fijación de carbono con el consecuente aumento de la EUA, tendencias que no se verificaron en esta tesis. Al mismo tiempo, para las tres regiones se verificó un mayor DPV en épocas de siembra temprana respecto a tardías.

Durante la etapa vegetativa, la EUA respondió al DPV en todas las especies excepto en maní, similar a lo acontecido a lo largo del ciclo (Capítulo 4, Fig. 4.7). Este resultado coincidió con estudios previos (Choudhary et al. 2020) que señalaban, para maíz y sorgo, disminuciones de la EUA ante aumentos del DPV y una mayor variación relativa de la EUA en maíz que en sorgo al pasar de DPV moderado a alto. En cuanto a las legumbres, en la presente tesis la soja tuvo un comportamiento intermedio entre los descriptos para maíz y sorgo mientras que en el caso del maní no se registró una tendencia clara.

Existen evidencias de cambios en la tasa de transpiración frente al aumento del DPV en cultivos de soja con buena provisión hídrica (Sadok y Sinclair 2009), como también de los posibles beneficios de este tipo de respuesta (*slow wilting*) para ambientes proclives a sequía (Sinclair et al. 2010) y que serían atribuibles a la mejora en la EUA que traería aparejada (Ye et al. 2020).

En cuanto a la etapa reproductiva, se verificó que la EUA no se asoció a las principales variables ambientales con la excepción de soja al DPV. Sin embargo, la EUA sí se asoció estrechamente a la EUR que sí tuvo relación con algunas de dichas variables, sugiriendo un efecto de la EUA sobre la biomasa mediado por la EUR (Capítulo 4, Fig. 4.10). La EUR respondió al DPV durante la etapa reproductiva en las 4 especies. Esta respuesta ya había sido documentada para maíz y sorgo (Stockle y Kiniry 1990), como también para otras gramíneas (Abbate et al. 2004; Kemanian et al. 2004), pero no existían referencias equivalentes para legumbres. Antecedentes previos evidenciaron que una relación fuente-destino alta durante el llenado del grano puede reducir la EUR en maíz (Rajcan y Tollenaar 1999; Borrás et al. 2004; Gambín y Borrás 2007) debido a un retro-control de la actividad fotosintética. Esta condición, que podría tener lugar como consecuencia de una pobre fijación de granos en ambientes con baja oferta hídrica durante el período crítico, como los que caracterizaron a las regiones sub-húmeda y semiárida (i.e. baja OH y alto DPV) respecto a la pampeana húmeda (i.e. alta OH y bajo DPV), podría ser la causa subyacente a las tendencias observadas en la EUR. Si bien algunas especies (e.g. soja y sorgo) serían más capaces que otras (e.g. maíz) de promover un aumento más sustancial del peso individual del grano en respuesta a las mejoras en la relación fuente-destino postfloración (Borrás et al. 2004; Gambín y Borrás 2007), en ningún caso dicho

aumento compensaría las disminuciones en el número de granos y los efectos mencionados de retrocontrol que se tradujeron en la disminución observada de la EUR en respuesta al aumento del DPV postfloración (Capítulo 4, Fig. 4.9B).

Hipótesis 4: La distribución esperable del RG potencial en secano de maíz y soja en la RSC experimentará diferencias con la variación de la recarga inicial de los perfiles, su capacidad de almacenar agua y el cambio de fecha de siembra.

En base a los resultados obtenidos por modelización, factibles a partir del ajuste de los modelos a los resultados experimentales de la tesis, se acepta la hipótesis propuesta. Entre escenarios (i.e. humedad al inicio de la estación de crecimiento \times serie de suelo \times fecha de siembra) se apreciaron diferencias entre soja y maíz en la variabilidad interanual del RG potencial en secano utilizando los datos de una serie climática histórica de 50 años (Capítulo 5, Figs. 5.8 y 5.9).

En soja, en los suelos con mayor capacidad de retener agua (i.e. CR y GR) se generaron grandes diferencias de rendimiento según la fecha de siembra (Capítulo 5, Fig. 5.9), mientras que sobre el suelo con baja capacidad de retención (i.e. BE) las diferencias entre fechas de siembra fueron mucho menores. Independientemente de esta capacidad y de la recarga inicial (mS, mH o Hu), en más del 50% de los años las siembras del 25 de noviembre superaron en rendimiento a las del 5 de noviembre y estas últimas a las del 20 de octubre. Así, en la peor condición de recarga inicial (mS) los rendimientos superaron un valor de 3000 kg ha⁻¹ en un 20, 40 y 45% de los años para BE, CR y GR sembrando tardíamente el 25 de noviembre. Sin embargo, la probabilidad de obtener rendimientos por encima de los 3000 kg ha⁻¹ (en BE) y de los 4000 kg ha⁻¹ (en CR y GR), fue superior

en las fechas del 20 de octubre y 5 de noviembre. El comportamiento fue similar para recargas moderada (mH) y completa (Hu), el atraso en la fecha de siembra se tradujo en un mayor RG en una mayor proporción de años.

En maíz, al igual que en soja, los suelos con mayor retención (i.e. CR y GR) resaltaron las diferencias que hubo entre fechas de siembra, mientras que en el suelo más arenoso (i.e. BE) las diferencias fueron menores (Capítulo 5, Fig. 5.8). En la fecha de siembra tardía del 5 de diciembre los pisos de rendimientos fueron más altos, en especial respecto de la más temprana del 10 de octubre, y si bien la más tardía tendría techos de rendimiento más bajos que las otras, las diferencias fueron mucho menores en ese ambiente edáfico. En la medida que la recarga fue mayor, en los tres suelos las diferencias entre fechas de siembra se redujeron. Particularmente para las siembras tempranas en los suelos menos arenosos, una buena disponibilidad inicial de agua redujo fuertemente el riesgo de déficit hídrico asociado a las mismas.

Hipótesis 5: La distribución esperable del RG potencial en secano en la RSC experimentará diferencias entre soja y maní, y entre maíz y sorgo ante la variación de la recarga inicial de los perfiles y su capacidad de almacenar agua, con un RG más alto y riesgo menor en maní y sorgo cuando la limitación hídrica es mayor pero no cuando la limitación hídrica disminuye.

En base a los resultados obtenidos por modelización se acepta parcialmente la hipótesis propuesta. En la fecha de siembra más probable para el maní en la RSC (principios de noviembre) y considerando todos los escenarios hídricos (Capítulo 5, Fig. 5.10B, D y F), el rendimiento del cultivo superó al de soja sembrada el 5 de noviembre cuando

el rendimiento esperado fue inferior a los 3000 kg ha⁻¹. La tendencia se invirtió en los escenarios que superan dicho valor. Sin embargo, en los suelos con texturas más gruesas, las diferencias de RG esperable en los tres escenarios de recarga fueron muy reducidas. En las series con menor porcentaje de texturas gruesas y por lo tanto con mayor capacidad de retención, la ventaja de maní respecto a soja cuando el RG esperado fue inferior a 3000 kg ha⁻¹ resultó importante para la condición inicial de perfiles húmedos y moderadamente húmedos, pero se redujo con el perfil moderadamente seco.

En cuanto a la comparación entre cereales, el maíz superó ampliamente los rendimientos del cultivo de sorgo (sembrado en su fecha más habitual de mediados de noviembre) en todos los escenarios simulados (Capítulo 5, Figs. 5.10A, C y E). Las diferencias entre sorgo y maíz no se redujeron al empeorar la condición hídrica. El sorgo, al igual que el maíz, mostró una clara respuesta a una mejor condición hídrica inicial, excepto en la serie más arenosa. En este último caso, ambas especies no mostraron diferencias asociadas a la escasa variación en recarga que ese suelo permite.

6.3 Implicancias agronómicas de la tesis para futuras investigaciones y consideraciones para el manejo de estos cultivos

Análisis de la interacción entre estrés hídrico y térmico con foco en la RSC.

Como perspectiva futura, resulta importante profundizar en el estudio de la interacción entre los estreses hídrico y térmico en las 4 especies, en búsqueda de mejorar su tolerancia a episodios de ocurrencia de los mismos, tanto en forma individual como combinada. En cuanto a las horas con temperaturas supraóptimas ($h_s > 35$) asociadas al estrés térmico, en este estudio no tuvieron el mismo peso relativo sobre el rendimiento y sus componentes que otras variables ambientales como el IA, DPV y la OH. Probablemente

la interacción de las temperaturas supraóptimas con la oferta hídrica permitiría discriminar distintas respuestas fisiológicas entre las cuatro especies. Por ejemplo, la sensibilidad de los rendimientos de maíz al estrés por sequía asociado con alto DPV se acentuó cuando coincidió con temperaturas supraóptimas (Lobell et al. 2013, 2014). Similares resultados se alcanzaron en soja cuando interactuaron ambos estreses, que redujeron tanto el NG como el PG (Ergo et al. 2018; Veas et al. 2022), y en sorgo, para el cual se cuantificó para distintas localidades la probabilidad según la etapa (i.e. prefloración, postfloración, ciclo total) de ocurrencia de ambos estreses (Carcedo y Gambin 2019). Curiosamente, en maní se ha documentado una rápida inducción de proteínas de golpe de calor (HSPs; del inglés *heat shock proteins*) ante un evento de temperaturas supraóptimas (Chakraborty et al. 2018) que podría favorecer su comportamiento al interactuar con sequías. Respuestas de este tipo se han documentado para diversas especies (Vierling 1991; Feder y Hofmann 1999).

La variabilidad genotípica, además de la específica, probablemente también constituya una fuente de variación destacada frente a ambos estreses. Si bien no se indagó en esta tesis, será clave profundizar en las estrategias de tolerancia genotípica como también de *escape* (i.e. genotipos de distinta duración que permita adecuar el ciclo a los cambios temporales de disponibilidad hídrica). Al considerar la primera estrategia, se ha documentado variabilidad genotípica para las cuatro especies frente a distintos estreses abióticos (e.g. sequía en maíz Grzesiak 2001, en maní Hamidou et al. 2012, en soja Devi et al. 2014, en sorgo Geetika et al. 2019; DPV en soja Fletcher et al. 2007, en maní Devi et al. 2010, en sorgo Gholipoor et al. 2010, en maíz Yang et al. 2012). Incluso se han descrito rasgos de interés para hacer frente a algunos de estos estreses (e.g. *slow wilting* en soja Devi et al. 2015; *stay green* en sorgo Jordan et al. 2012). En cuanto a la estrategia de

escape, para el maíz la oferta de ciclo para la zona templada de Argentina entre las empresas líderes es muy acotada respecto a mercados como el estadounidense (Lacasa et al., 2020). Por un lado, predominan aquí genotipos de un rango de madurez relativa estrecho (MR 119-122) según los catálogos disponibles actualmente. Por otro lado, los híbridos de menor MR que se ofertan (MR<115) no han sido desarrollados por programas locales de mejora y se trata por el momento de germoplasma recomendado para los ambientes de período libre de heladas corto por mayor latitud (e.g. SE y SO de la provincia Buenos Aires) y no por aridez con alta frecuencia de temperatura supraóptima como la RSC. De modo similar para el cultivo de soja, en la región Pampeana se han explorado los efectos de modificar la duración de diferentes sub-etapas del ciclo sin modificar sustancialmente el ciclo total mediante cambios en la sensibilidad al fotoperíodo como una forma de incrementar el rendimiento potencial del cultivo (Kantolic et al., 2007). Sin embargo, también en este cultivo es comparativamente muy diferente la oferta de variedades pertenecientes a distintos de grupos de madurez (GM), siendo casi inexistentes los GM cortos (GM<III) en el mercado local pues se estima estarían destinados a una superficie que aún no justifica un plan de mejoramiento para producirlos. El uso de los modelos de simulación contribuiría a evaluar el comportamiento frente a sequías y temperaturas supraóptimas al combinar genotipos (ciclo, hábito de crecimiento, patrón de enraizamiento), especies (maíz, soja, sorgo y maní) y ambientes (Carretero et al., 2014; Sinclair et al., 2010).

La integración de los resultados producto de la utilización de los modelos de simulación junto a modificadores robustos por temperaturas supraóptimas permitirá generar predicciones sobre el comportamiento de los cultivos frente a la variabilidad climática. Paralelamente, generaría herramientas cuantitativas para el diseño de sistemas de producción adaptativos en la RSC.

Estudios del impacto del Cambio Climático sobre las 4 especies a lo largo de la transecta longitudinal de la región templada central.

Haciendo énfasis en el primer punto sobre las implicancias para futuras investigaciones, sería de interés utilizar el ensamble de modelos de simulación de aplicación agronómica (MSAA) para cuantificar la distribución esperable de rendimientos de los cuatro cultivos en las tres macro-regiones (húmeda, sub-húmeda y semiárida) bajo la variabilidad climática prevista (i.e. escenarios futuros). Existen hasta el momento escasos trabajos que pongan el foco en el efecto del cambio climático sobre un conjunto de especies que integren cereales y legumbres en nuestro país (Rolla et al. 2018) y menos aún que consideren la interacción de los estreses hídrico y térmico (Collins y Chenu 2021).

Considerando proyecciones tanto para un futuro cercano (2015-2039) como lejano (2075-2099) para Argentina y utilizando MSAA (Jones et al. 2003), se esperarían incrementos considerables en los rendimientos de soja y moderados en los de maíz bajo dos escenarios de emisión de CO₂ (baja en el RCP4.5 y alta en el RCP8.5; IPCC, 2014). Estas respuestas se atribuyeron principalmente a aumentos de las precipitaciones en el periodo diciembre-febrero (Rolla et al. 2018). Analizando el sorgo en base a MSAA, Msongaleli et al. (2014) sugirieron que su rendimiento se incrementaría un 14% para el escenario RCP4.5 en la región de África oriental. Sin embargo, Faye et al. (2022) sugirieron una reducción del rendimiento para genotipos de sorgo de distinto ciclo en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, aunque más pronunciada y con mayor variabilidad para los cultivares de ciclo corto. Similar tendencia a la de este último estudio ocurrió en maní para estos escenarios climáticos, tanto para Alabama, EEUU, como para China (principal productor mundial). En el primer caso (Ruane et al. 2014) se estimó una reducción del rendimiento del 10%, mientras que en el segundo (Xu et al. 2017) se cuantificó además

una mayor pérdida esperable en secano (4.5% para RCP 4.5 y 30% para RCP 8.5) que en riego (2.6 y 11.5%, respectivamente).

Tanto las inconsistencias (sorgo) como la variabilidad (maní) en las proyecciones indicarían un alto grado de incertidumbre, descartando una respuesta universal y poniendo énfasis en la incidencia de la región de interés y el escenario de emisión de CO₂ considerado. Tampoco el metabolismo fotosintético (C3 o C4) parecería contribuir a beneficiar claramente a una especie u otra, ya que un aumento excesivo de la temperatura neutraliza los posibles efectos positivos del aumento de la concentración de CO₂ (Eyni-Nargeseh et al., 2020). De hecho, hasta el momento no se encontraron trabajos que describan el efecto de la interacción entre el estrés hídrico y térmico sobre el rendimiento en grano de las 4 especies, pero de cara al futuro podría pensarse en la posibilidad de estudiar el impacto de ambos en el rendimiento y la posibilidad de modificar la estrategia de producción a través de ambientes diversos o analizar las causas subyacentes a la variabilidad observada (Collins y Chenu 2021).

Bibliografía

- Abbate PE, Dardanelli JL, Cantarero MG (2004) Climatic and water availability effects on water-use efficiency in wheat. *Crop Sci* 44:474–483. <https://doi.org/10.2135/cropsci2004.0474>
- Allen L, Boote K, Hammond L (1976) Peanut stomatal diffusion resistance affected by soil water and solar radiation. *Proc Soil Crop Sci Soc Florida*
- Andrade FH (1995) Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. *F Crop Res* 41:1–12. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(94\)00107-N](https://doi.org/10.1016/0378-4290(94)00107-N)
- Andrade FH, Echarte L, Rizzalli R (2002) Kernel number prediction in maize under nitrogen or water stress. *Crop Sci*. <https://doi.org/10.2135/cropsci2002.1173>
- Andrade FH, Uhart SA, Cirilo A (1993) Temperature affects radiation use efficiency in maize. *F Crop Res* 32:17–25. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(93\)90018-I](https://doi.org/10.1016/0378-4290(93)90018-I)
- Andrade FH, Vega C, Uhart S (1999) Kernel number determination in maize. *Crop Sci* 39:453–459. <https://doi.org/10.2135/cropsci1999.0011183X0039000200026x>
- Andrade JF, Sadras VO (2000) Bases para el manejo del maiz, el girasol y la soja
- Andriani J, Andrade F, Suero E (1991) Water deficits during reproductive growth of soybeans. I. Their effects on dry matter accumulation, seed yield and its components Water deficits during reproductive growth of soybeans. I. Their effects on dry matter accumulation, seed yield and its compon
- Andriani JM, Magnano L, Sanmarti N (2016) Modelo “cuanti-cualitativo” de escurrimiento superficial del agua en suelos agrícolas de la región Pampeana Argentina. *Cienc del Suelo* 34:293–301
- Aramburu Merlos F, Monzon JP, Mercau JL (2015) Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *F Crop Res* 184:145–154. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.10.001>
- Archontoulis S V., Castellano MJ, Licht MA (2020) Predicting crop yields and soil-plant nitrogen dynamics in the US Corn Belt. *Crop Sci* 60:721–738. <https://doi.org/10.1002/csc2.20039>
- Awal MA, Ikeda T (2003) Effect of elevated soil temperature on radiation-use efficiency in peanut stands. *Agric For Meteorol* 118:63–74. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(03\)00070-4](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(03)00070-4)
- Bagnall DJ, King RW (1991) Response of peanut (*Arachis hypogaea*) to temperature, photoperiod and irradiance 1. Effect on flowering. *F Crop Res* 26:263–277. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(91\)90004-F](https://doi.org/10.1016/0378-4290(91)90004-F)
- Baigorri H, Ciampitti I, Garcia F (2009) Manejo del cultivo de soja. IPNI (International Plant Nutr Institute)
- Barnabás B, Jäger K, Fehér A (2008) The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals. *Plant, Cell Environ* 31:11–38.

<https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2007.01727.x>

- Bastidas AM, Setiyono TD, Dobermann A (2008) Soybean sowing date: The vegetative, reproductive, and agronomic impacts. *Crop Sci* 48:727–740.
<https://doi.org/10.2135/CROPSCI2006.05.0292>
- BCCBA (2019) Bolsa de Cereales de Cordoba. Sitio web <http://www.bccba.com.ar/>
- BCR (2015) Norma de calidad para la comercialización de granos
- Bert F, Letson D, Podestá G (2009) The Economic Value of. *conicet* 19:491–506.
<https://doi.org/10.1002/nml>
- Bert F, Podestá G, Satorre E, Messina C (2007) Use of climate information in soybean farming on the Argentinean pampas. *Clim Res* 33:123–134.
<https://doi.org/10.3354/cr033123>
- Bingham IJ, Blake J, Foulkes MJ, Spink J (2007) Is barley yield in the UK sink limited?: I. Post-anthesis radiation interception, radiation-use efficiency and source–sink balance. *F Crop Res* 101:198–211.
<https://doi.org/10.1016/J.FCR.2006.11.005>
- Bisang R (2003) Apertura económica, innovación y estructura productiva: la aplicación de biotecnología en la producción agrícola pampeana argentina. JSTOR
- Blessing CH, Mariette A, Kaloki P, Bramley H (2018) Profligate and conservative: Water use strategies in grain legumes. *J Exp Bot* 69:349–369.
<https://doi.org/10.1093/jxb/erx415>
- Blum A (2009) Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. *F Crop Res* 112:119–123. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.03.009>
- Blum A, Golan G, Mayer J, Sinmena B (1997) The effect of dwarfing genes on sorghum grain filling from remobilized stem reserves, under stress. *F Crop Res* 52:43–54. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(96\)03462-4](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(96)03462-4)
- Board JE (1987) Yield Components Related to Seed Yield in Determinate Soybean1. *Crop Sci* 27:1296–1297.
<https://doi.org/10.2135/CROPSCI1987.0011183X002700060041X>
- Boote KJ (1982) Growth Stages of Peanut (*Arachis hypogaea* L.) 1 . *Peanut Sci* 9:35–40. <https://doi.org/10.3146/i0095-3679-9-1-11>
- Borrás L, Slafer GA, Otegui ME (2004) Seed dry weight response to source–sink manipulations in wheat, maize and soybean: a quantitative reappraisal. *F Crop Res* 86:131–146. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2003.08.002>
- Boyer JS (1970) Leaf Enlargement and Metabolic Rates in Corn, Soybean, and Sunflower at Various Leaf Water Potentials. *Plant Physiol* 46:233–235.
<https://doi.org/10.1104/pp.46.2.233>
- Burgos JJ (1963) Las heladas en Argentina. INTA Colección Científica 388 pág. Buenos Aires

- Cabrera VE, Fraisse CW, Letson D (2006) Impact of climate information on reducing farm risk by optimizing crop insurance strategy. *Trans ASABE* 49:1223–1233. <https://doi.org/10.13031/2013.21722>
- Calviño P., Sadras V., Andrade F. (2003) Quantification of environmental and management effects on the yield of late-sown soybean. *F Crop Res* 83:67–77. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(03\)00062-5](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(03)00062-5)
- CAM (2019) Camara Argentina del Maní. Sitio web <Http://www.camaradelmani.org.ar/espanol/>
- Carcedo AJP, Gambin BL (2019) Sorghum drought and heat stress patterns across the Argentinean temperate central region. *F Crop Res* 241:107552. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.06.009>
- Cárcova J, Otegui ME (2001) Ear temperature and pollination timing effects on maize kernel set. *Crop Sci* 41:1809–1815. <https://doi.org/10.2135/cropsci2001.1809>
- Carrasco N, Zamora M, Melin A (2011) Manual de sorgo. Proyecto Regional Desarrollo de una Agricultura Sustentable en los Territorios del CERBAS
- Carrera CS, Solís SM, Ferrucci MS (2021) Leaf structure and ultrastructure changes induced by heat stress and drought during seed filling in field-grown soybean and their relationship with grain yield. *An Acad Bras Cienc* 93:. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202120191388>
- Casali L, Herrera JM, Rubio G (2022) Resilient soybean and maize production under a varying climate in the semi-arid and sub-humid Chaco. *Eur J Agron* 135:126463. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126463>
- Cattani P, Bragachini M, Peiretti J (2008) Forrajes conservados de alta calidad y aspectos relacionados al manejo nutricional. *Man técnico PRECOP II* no 6
- Chakraborty K, Bishi SK, Singh AL (2018) Rapid induction of small heat shock proteins improves physiological adaptation to high temperature stress in peanut. *J Agron Crop Sci* 204:285–297. <https://doi.org/10.1111/jac.12260>
- Chapman SC, Cooper M, Butler DG, Henzell RG (2000a) Genotype by environment interactions affecting grain sorghum. I. Characteristics that confound interpretation of hybrid yield. *Aust J Agric Res* 51:197–207. <https://doi.org/10.1071/AR99020>
- Chapman SC, Cooper M, Hammer GL, Butler DG (2000b) Genotype by environment interactions affecting grain sorghum. II. Frequencies of different seasonal patterns of drought stress are related to location effects on hybrid yields. *Aust J Agric Res* 51:209–221. <https://doi.org/10.1071/AR99021>
- Chapman SC, Hammer GL, Butler DG, Cooper M (2000c) Genotype by environment interactions affecting grain sorghum. III. Temporal sequences and spatial patterns in the target population of environments. *Aust J Agric Res* 51:223–233. <https://doi.org/10.1071/AR99022>
- Choudhary S, Guha A, Kholova J (2020) Maize, sorghum, and pearl millet have highly contrasting species strategies to adapt to water stress and climate change-like conditions. *Plant Sci* 295:110297. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.110297>

- Cicchino M, Rattalino Edreira JI, Uribelarrea M, Otegui ME (2010) Heat stress in field-grown maize: Response of physiological determinants of grain yield. *Crop Sci* 50:1438–1448. <https://doi.org/10.2135/cropsci2009.10.0574>
- Collino DJ, Dardanelli JL, Sereno R, Racca RW (2000) Physiological responses of Argentine peanut varieties to water stress. Water uptake and water use efficiency. *F Crop Res* 68:133–142. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(00\)00115-5](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(00)00115-5)
- Collins B, Chenu K (2021) Improving productivity of Australian wheat by adapting sowing date and genotype phenology to future climate. *Clim Risk Manag* 32:100300. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100300>
- Connor DJ, Loomis RS., Cassman KG (2011) *Crop ecology: Productivity and management in agricultural systems*
- Connor DJ, Sadras VO (1992) Physiology of yield expression in sunflower. *F Crop Res* 30:333–389. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(92\)90006-U](https://doi.org/10.1016/0378-4290(92)90006-U)
- Craufurd PQ, Peacock JM (1993) Effect of heat and drought stress on sorghum (*Sorghum bicolor*). II. Grain yield. *Exp Agric* 29:77–86. <https://doi.org/10.1017/S0014479700020421>
- Curin F, Severini AD, González FG, Otegui ME (2020) Water and radiation use efficiencies in maize: Breeding effects on single-cross Argentine hybrids released between 1980 and 2012. *F Crop Res* 246:107683. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107683>
- D'Andrea KE, Otegui ME, Cirilo AG (2008) Kernel number determination differs among maize hybrids in response to nitrogen. *F Crop Res* 105:228–239. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.10.007>
- Dardanelli J., Bachmeier O, Sereno R, Gil R (1997) Rooting depth and soil water extraction patterns of different crops in a silty loam haplustoll. *F Crop Res* 54:29–38. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(97\)00017-8](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00017-8)
- Dardanelli J (1998) Eficiencia en el uso del agua según sistemas de labranzas. In: *Siembra directa*. pp 107–115
- Dardanelli JL, Abbate PE, Cantarero MG, Suero. EE (1998) Eficiencia del uso del agua de trigo (cv. ProINTA Oasis), en diferentes ambientes de la Región Pampeana. *Actas del IV Congr. Nac. Trigo y II Simp. Nac. Cereal. Siembra Otoño-invernal* 2–9
- Dardanelli JL, Collino DJ, Otegui ME, Sadras VO (2003) Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de los cultivos de grano. In: *Producción de granos Bases funcionales para su manejo*
- Dardanelli JL, Ritchie JT, Calmon M (2004) An empirical model for root water uptake. *F Crop Res* 87:59–71. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2003.09.008>
- de Felipe M, Borrás L, Truong SK (2020) Physiological processes associated with soybean genetic progress in Argentina. *Agrosystems, Geosci Environ* 3:e20041. <https://doi.org/10.1002/AGG2.20041>

- de la Casa AC, Ovando GG (2016) Variation of reference evapotranspiration in the central region of Argentina between 1941 and 2010. *J Hydrol Reg Stud* 5:66–79. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.11.009>
- de la Casa AC, Ovando GG, Díaz GJ (2021) ENSO influence on corn and soybean yields as a base of an early warning system for agriculture in Córdoba, Argentina. *Eur J Agron* 129:126340. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126340>
- Debaeke P, Nolot J-M, Raffaillac D (2006) A rule-based method for the development of crop management systems applied to grain sorghum in south-western France. *Agric Syst* 90:180–201. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2006.01.001>
- Demarco PA, Mayor L, Messina C (2022) Retrospective study in U.S. commercial sorghum breeding: III. Nitrogen internal efficiency. *Crop Sci*. <https://doi.org/10.1002/csc2.20763>
- Devi JM, Sinclair TR, Chen P, Carter TE (2014) Evaluation of elite southern maturity soybean breeding lines for drought-tolerant traits. *Agron J* 106:1947–1954. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0242>
- Devi MJ, Sinclair TR, Taliencio E (2015) Comparisons of the effects of elevated vapor pressure deficit on gene expression in leaves among two fast-wilting and a slow-wilting soybean. *PLoS One* 10:. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0139134>
- Devi MJ, Sinclair TR, Vadez V (2010) Genotypic variation in peanut for transpiration response to vapor pressure deficit. *Crop Sci* 50:191–196. <https://doi.org/10.2135/cropsci2009.04.0220>
- Devries JD, Bennett JM, Albrecht SL, Boote KJ (1989) Water Relations , Nitrogenase Activity and Root Development of Three Grain Legumes in Response to Soil Water Deficits. *F Crop Res* 21:215–226
- Di Rienzo JA, Casanoves F, Balzarini MG (2011) InfoStat
- Echarte L, Andrade FH, Sadras VO, Abbate P (2006) Kernel weight and its response to source manipulations during grain filling in Argentinean maize hybrids released in different decades. *F Crop Res* 96:307–312. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.07.013>
- Echarte L, Tollenaar M (2006) Kernel Set in Maize Hybrids and Their Inbred Lines Exposed to Stress. *Crop Sci* 46:870–878. <https://doi.org/10.2135/cropsci2005.0204>
- Edreira JIR, Mayer LI, Otegui ME (2014) Heat stress in temperate and tropical maize hybrids: Kernel growth, water relations and assimilate availability for grain filling. *F Crop Res* 166:162–172. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.06.018>
- Egli DB (2011) Time and the productivity of agronomic crops and cropping systems. *Agron J* 103:743–750. <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0508>
- Enrico JM, Kantolic A, Bodrero ML (2010) Cuantificación del efecto de las defoliaciones tardías sobre los parámetros de crecimiento de semillas de soja [Glycine max. Merr.[L.]].
- Ergo V V., Lascano R, Vega CRC (2018) Heat and water stressed field-grown soybean:

- A multivariate study on the relationship between physiological-biochemical traits and yield. *Environ Exp Bot* 148:1–11.
<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.12.023>
- Evans LT (1993) *Crop Evolution, Adaptation and Yield*
- FAO (2019) Food and agriculture organization of the United Nations. Statics Division. FAOSTAT
- Farré I, Faci JM (2006) Comparative response of maize (*Zea mays* L.) and sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) to deficit irrigation in a Mediterranean environment. *Agric Water Manag* 83:135–143. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.11.001>
- Faye A, Camara I, Diop M (2022) Millet and sorghum yield simulations under climate change scenarios in Senegal. *Reg Environ Chang* 22:86.
<https://doi.org/10.1007/s10113-022-01940-0>
- Feder ME, Hofmann GE (1999) Heat-shock proteins, molecular chaperones, and the stress response: Evolutionary and Ecological Physiology. *Annu Rev Physiol* 61:243–282. <https://doi.org/10.1146/annurev.physiol.61.1.243>
- Fehr W, Caviness C (1977) Stages of soybean development. *Spec Rep*
- Fischer KS, Palmer FE (1984) *Tropical maize, The physio*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, England
- Fischer RAT, Edmeades GO (2010) Breeding and Cereal Yield Progress. *Crop Sci* 50:S-85-S-98. <https://doi.org/10.2135/cropsci2009.10.0564>
- Fletcher AL, Sinclair TR, Allen LH (2007) Transpiration responses to vapor pressure deficit in well watered “slow-wilting” and commercial soybean. *Environ Exp Bot* 61:145–151. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.05.004>
- Gabaldón-Leal C, Webber H, Otegui ME (2016) Modelling the impact of heat stress on maize yield formation. *F Crop Res* 198:. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.08.013>
- Gallo KP, Daughtry CST (1986) Techniques for Measuring Intercepted and Absorbed Photosynthetically Active Radiation in Corn Canopies¹. *Agron J* 78:752–756.
<https://doi.org/10.2134/agronj1986.00021962007800040039x>
- Gambín BL, Borrás L (2007) Plasticity of sorghum kernel weight to increased assimilate availability. *F Crop Res* 100:272–284.
<https://doi.org/10.1016/J.FCR.2006.08.002>
- Gambín BL, Borrás L, Otegui ME (2006) Source–sink relations and kernel weight differences in maize temperate hybrids. *F Crop Res* 95:316–326.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.04.002>
- Gambin BL, Coyos T, Di Mauro G (2016) Exploring genotype, management, and environmental variables influencing grain yield of late-sown maize in central Argentina. *Agric Syst* 146:11–19. <https://doi.org/10.1002/sml.1>
- Geetika G, Van Oosterom EJ, George-Jaeggli B (2019) Genotypic variation in whole-plant transpiration efficiency in sorghum only partly aligns with variation in

- stomatal conductance. *Funct Plant Biol* 46:1072–1089.
<https://doi.org/10.1071/FP18177>
- Gholipoor M, Choudhary S, Sinclair TR (2013) Transpiration response of maize hybrids to atmospheric vapour pressure deficit. *J Agron Crop Sci* 199:155–160.
<https://doi.org/10.1111/jac.12010>
- Gholipoor M, Prasad PVV, Mutava RN, Sinclair TR (2010) Genetic variability of transpiration response to vapor pressure deficit among sorghum genotypes. *F Crop Res* 119:85–90. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.06.018>
- Gholipoor M, Sinclair TR, Prasad PVV (2012) Genotypic variation within sorghum for transpiration response to drying soil. *Plant Soil* 357:35–40.
<https://doi.org/10.1007/s11104-012-1140-8>
- Gilbert ME, Holbrook NM, Zwieniecki MA (2011) Field confirmation of genetic variation in soybean transpiration response to vapor pressure deficit and photosynthetic compensation. *F Crop Res* 124:85–92.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.06.011>
- Giménez L (2017) La interacción de la fecha de siembra y el GM en soja con riego
- Giménez R, Mercau JL, Houspanossian J, Jobbágy EG (2015) Balancing agricultural and hydrologic risk in farming systems of the Chaco plains. *J Arid Environ* 123:81–92. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2014.09.004>
- Gosse G, Varlet-Grancher C, Bonhomme R (1986) Maximum dry matter production and solar radiation intercepted by a canopy. *Agron* 6:47–56
- Grassini P, Cafaro La Menza N, Rattalino Edreira JI (2021) Soybean. In: *Crop Physiology Case Histories for Major Crops*. Elsevier, pp 282–319
- Grassini P, Hall AJ, Mercau JL (2009) Benchmarking sunflower water productivity in semiarid environments. *F Crop Res* 110:251–262.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.09.006>
- Grassini P, Torrión JA, Yang HS (2015) Soybean yield gaps and water productivity in the western U.S. Corn Belt. *F Crop Res* 179:150–163.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.04.015>
- Gregory PJ (2006) *Plant Roots, Growth, Activity and Interaction With Soils*. Blackwell
- Grimm AM, Pal JS, Giorgi F (2007) Connection between Spring Conditions and Peak Summer Monsoon Rainfall in South America: Role of Soil Moisture, Surface Temperature, and Topography in Eastern Brazil. *J Clim* 20:5929–5945.
<https://doi.org/10.1175/2007JCLI1684.1>
- Grzesiak S (2001) Genotypic variation between maize (*Zea mays* L.) single cross hybrids in response to drought stress. *Acta Physiol Plant* 23:443–456.
<https://doi.org/10.1007/s11738-001-0055-4>
- Guerra LC, Hoogenboom G, Banterng P (2008) Determination of cultivar coefficients for the csm-cropro-peanut model using variety trial data. *51:1471–1481*

- Hall AJ, Vilella F, Trapani N, Chimenti C (1982) The effects of water stress and genotype on the dynamics of pollen-shedding and silking in maize. *F Crop Res* 5:349–363. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(82\)90036-3](https://doi.org/10.1016/0378-4290(82)90036-3)
- Hamidou F, Ratnakumar P, Halilou O (2012) Selection of intermittent drought tolerant lines across years and locations in the reference collection of groundnut (*Arachis hypogaea* L.). *F Crop Res* 126:189–199. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2011.10.009>
- Hammer GL, Nicholls N, Mitchell C (2000) A General Systems Approach to Applying Seasonal Climate Forecast. *Appl Seas Agric Nat Ecosyst* 51-65.
- Haro RJ, Baldessari J, Otegui ME (2017) Genetic improvement of peanut in Argentina between 1948 and 2004: Light interception, biomass production and radiation use efficiency. *F Crop Res* 204:222–228. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.01.021>
- Haro RJ, Dardanelli JL, Collino DJ, Otegui ME (2010) Water deficit and impaired pegging effects on peanut seed yield: Links with water and photosynthetically active radiation use efficiencies. *Crop Pasture Sci* 61:343–352. <https://doi.org/10.1071/CP09234>
- Haro RJ, Dardanelli JL, Otegui ME, Collino DJ (2008) Seed yield determination of peanut crops under water deficit: Soil strength effects on pod set, the source-sink ratio and radiation use efficiency. *F Crop Res* 109:24–33. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.06.006>
- Haro RJ, Mantese A, Otegui ME (2011) Peg viability and pod set in peanut: Response to impaired pegging and water deficit. *Flora Morphol Distrib Funct Ecol Plants* 206:865–871. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2011.05.003>
- Haro RJ, Otegui ME, Collino DJ, Dardanelli JL (2007) Environmental effects on seed yield determination of irrigated peanut crops: Links with radiation use efficiency and crop growth rate. *F Crop Res* 103:.. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.06.004>
- Hatfield J., Boote KJ, Fay P (2008) The Effects of Climate Change on Agriculture, Land Resources. *Water Resour Biodivers United States*
- Hatfield JL, Boote KJ, Kimball BA (2011) Production, Climate impacts on agriculture: implications for crop. *Agron J* 103:351–370
- Hatfield JL, Prueger JH (2015) Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather Clim Extrem* 10:4–10. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.001>
- Hatfield JL, Sauer TJ, Prueger JH (2001) Managing soils to achieve greater water use efficiency: A review. *Agron J* 93:271–280. <https://doi.org/10.2134/agronj2001.932271x>
- Heinrich GM, Francis CA, Eastin JD (1983) Stability of Grain Sorghum Yield Components Across Diverse Environments 1. *Crop Sci* 23:209–212. <https://doi.org/10.2135/cropsci1983.0011183x002300020004x>
- Helms TC, Deckard EL, Gregoire PA (1997) Corn, Sunflower, and Soybean Emergence Influenced by Soil Temperature and Soil Water Content. *Agron J* 89:59–63.

<https://doi.org/10.2134/agronj1997.00021962008900010009x>

- Hernández Córdova N, Soto Carreño F (2012) Influence of three planting dates on growth and yield of cereal species grown in tropical conditions. Part I. Maize (*Zea mays* L.). *Cultiv Trop* 33:44–49
- Heyne E, Brunson A (1940) Genetic studies of heat and drought tolerance in maize. *J Am Soc*
- Holmes MG (1996) Light Penetration into the Canopy of Terrestrial Ecosystems. In: Jennings R.C., Zucchelli G., Ghatti F. CG (ed) *Light as an Energy Source and Information Carrier in Plant Physiology*. Springer US, Boston, MA, pp 219–229
- Holzworth DP, Snow V, Janssen S (2015) Agricultural production systems modelling and software: Current status and future prospects. *Environ Model Softw* 72:276–286. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.12.013>
- Hoogenboom G, Porter CH, Boote KJ (2019) The DSSAT crop modeling ecosystem. 173–216. <https://doi.org/10.1201/9780429266591-7>
- Hu M, Wiatrak P (2012) Effect of planting date on soybean growth, yield, and grain quality: Review. *Agron J* 104:785–790. <https://doi.org/10.2134/agronj2011.0382>
- Iizumi T, Luo J-J, Challinor AJ (2014) Impacts of El Niño Southern Oscillation on the global yields of major crops. *Nat Commun* 5:3712. <https://doi.org/10.1038/ncomms4712>
- Isoda A, Misa A., Nojima H, Takasaki Y (1996) Effects of Leaf Movement on Radiation Interception in Field Grown Leguminous Crops: IV. Relation to leaf temperature and transpiration among peanut cultivars. *Japanese J Crop Sci* 65(4):700-706.
- Ittersum M van, Rabbinge R (1997) Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *F Crop*
- Jones JW, Hoogenboom G, Porter CH (2003) The DSSAT cropping system model
- Jones JW, Tsuji GY, Hoogenboom G (1998) Decision support system for agrotechnology transfer: DSSAT v3. 157–177. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3624-4_8
- Jordan DR, Hunt CH, Cruickshank AW (2012) The relationship between the stay-green trait and grain yield in elite sorghum hybrids grown in a range of environments. *Crop Sci* 52:1153–1161. <https://doi.org/10.2135/cropsci2011.06.0326>
- Kantolic AG, Slafer GA (2001) Photoperiod sensitivity after flowering and seed number determination in indeterminate soybean cultivars. *F Crop Res* 72:109–118. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(01\)00168-X](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(01)00168-X)
- Kemalian AR, Stöckle CO, Huggins DR (2005) Transpiration-use efficiency of barley. *Agric For Meteorol* 130:1–11. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2005.01.003>
- Kemalian AR, Stöckle CO, Huggins DR (2004) Variability of Barley Radiation-Use

- Efficiency. *Crop Sci* 44:1662–1672. <https://doi.org/10.2135/cropsci2004.1662>
- Kiniry JR, Landivar JA, Witt M (1998) Radiation-use efficiency response to vapor pressure deficit for maize and sorghum. *F Crop Res* 56:265–270. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(97\)00092-0](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00092-0)
- Kiniry JR, Simpson CE, Schubert AM, Reed JD (2005) Peanut leaf area index, light interception, radiation use efficiency, and harvest index at three sites in Texas. *F Crop Res* 91:297–306. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.07.021>
- Kobayashi K, Salam MU (2000) Comparing simulated and measured values using mean squared deviation and its components. *Agron J* 92:345–352. <https://doi.org/10.2134/agronj2000.922345x>
- Lawn RJ (1982) Response of four grain legumes to water stress in south-eastern Queensland. I. Physiological response mechanisms. *Aust J Agric Res* 33:481–496. <https://doi.org/10.1071/AR9820481>
- Lee E, Tollenaar M (2007) Physiological basis of successful breeding strategies for maize grain yield. *Crop Sci*
- Liang X, Hoogenboom G, Voulgaraki S (2021) Deriving genetic coefficients from variety trials to determine sorghum hybrid performance using the CSM–CERES–Sorghum model. *Agron J* 113:2591–2606. <https://doi.org/10.1002/agj2.20644>
- Lin BB (2011) Resilience in Agriculture through Crop Diversification: Adaptive Management for Environmental Change. *Bioscience* 61:183–193. <https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.3.4>
- Liu F, Andersen MN, Jacobsen SE, Jensen CR (2005) Stomatal control and water use efficiency of soybean (*Glycine max* L. Merr.) during progressive soil drying. *Environ Exp Bot* 54:33–40. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2004.05.002>
- Lizaso JJ, Ruiz-Ramos M, Rodríguez L (2017) Modeling the response of maize phenology, kernel set, and yield components to heat stress and heat shock with CSM-IXIM. *F Crop Res* 214:239–254. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.09.019>
- Lobell DB, Hammer GL, McLean G (2013) The critical role of extreme heat for maize production in the United States. *Nat Clim Chang* 3:497–501. <https://doi.org/10.1038/nclimate1832>
- Lobell DB, Roberts MJ, Schlenker W (2014) Greater sensitivity to drought accompanies maize yield increase in the U.S. Midwest. *Science* (80-) 344:516–519. <https://doi.org/10.1126/science.1251423>
- Logan SH, Boyland PB (1983) Calculating Heat Units via a Sine Function. *J Am Soc Hortic Sci* 108:977–980. <https://doi.org/10.21273/jashs.108.6.977>
- Long M, Fernández E, Barnatán IE (2005) Caracterización de las heladas en la Región Pampeana y su variabilidad en los últimos 10 años
- Loomis R, Connor D (1992) Productivity and management in agricultural systems. *Crop Ecol Cambridge Univ*

- Lu H, Xue J, Guo D (2017) Efficacy of planting date adjustment as a cultivation strategy to cope with drought stress and increase rainfed maize yield and water-use efficiency. *Agric Water Manag* 179:227–235. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.09.001>
- Maddonna GA (2012) Analysis of the climatic constraints to maize production in the current agricultural region of Argentina—a probabilistic approach. *Theor Appl Climatol*. <https://doi.org/10.1007/s00704-011-0478-9>
- Magrin GO, Grondona MO, Travasso MI (1998) Impacto del Fenómeno “El Niño” sobre la Producción de Cultivos en la Región Pampeana. *Inst Nac Tencologia Agropecu Inst Clima y Agua, Castelar, Argentina*
- Magrin GO, Travasso MI, Rodríguez GR (2005) Changes in climate and crop production during the 20th century in Argentina. *Clim Change* 72:229–249. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-5374-9>
- Maltese NE, Maddonna GA, Melchiori RJM (2020) Crop nitrogen status of early- and late-sown maize at different plant densities. *F Crop Res* 258:107965. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107965>
- Maltese NE, Melchiori RJM, Maddonna GA (2019) Nitrogen economy of early and late-sown maize crops. *F Crop Res* 231:40–50. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.11.007>
- Marek GW, Chen Y, Marek TH (2020) Assessing planting date effects on seasonal water use of full- and short-season maize using SWAT in the southern Ogallala Aquifer region. *Irrig Sci* 38:77–87. <https://doi.org/10.1007/s00271-019-00653-3>
- Mason SC, Eskridge K (2008) Yield Increase Has Been More Rapid for Maize than for Grain Sorghum. *Crop Sci*. <https://doi.org/10.2135/cropsci2007.09.0529>
- Matthews RB, Harris D, Rao RCN (1988a) The physiological basis for yield differences between four genotypes of groundnut (*Arachis Hypogaea*) in response to Drought. I. Dry matter production and water use. *Exp Agric* 24:191–202. <https://doi.org/10.1017/S0014479700015945>
- Matthews RB, Harris D, Williams JH, Rao RCN (1988b) The Physiological Basis for Yield Differences between Four Genotypes of Groundnut (*Arachis hypogaea*) in Response to Drought. II. Solar Radiation Interception and Leaf Movement. *Exp Agric* 24:203–213. <https://doi.org/10.1017/S0014479700015957>
- Mayer LI, Rattalino Edreira JI, Maddonna GA (2014) Oil Yield Components of Maize Crops Exposed to Heat Stress during Early and Late Grain-Filling Stages. *Crop Sci* 54:2236–2250. <https://doi.org/10.2135/cropsci2013.11.0795>
- Mendez MJ, Bongianino S, Casagrande G, Vergara G (2018) Impact of ENSO (El Niño Southern Oscillation) and sowing date on soil water storage evolution in corn. *Semiárida Rev la Fac Agron UNLPam* 28:11–22. [https://doi.org/10.19137/semiarida.2018\(01\).1122](https://doi.org/10.19137/semiarida.2018(01).1122)
- Mendez MJ, Casagrande G, Vergara G (2016) Efecto del ENOS (El Niño Oscilación del Sur) sobre el agua almacenada en el suelo en siembras de primavera temprana de maíz en La Pampa. In: Vergara GT (ed) XVI Reunión Argentina y VIII Reunión

Latinoamericana de Agrometeorología. Asociación Argentina de Agrometeorología, Puerto Madryn, Argentina, pp 15–16

- Mercau J, Otegui M (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. *Syst Model to Optim Use*
- Mercau JL, Dardanelli JL, Collino DJ (2007) Predicting on-farm soybean yields in the pampas using CROPGRO-soybean. *F Crop Res* 100:200–209. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.07.006>
- Messina CD, Jones JW, Boote KJ, Vallejos CE (2006) A gene-based model to simulate soybean development and yield responses to environment. *Crop Sci* 46:456–466.
- Minagri (2019) Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca
- Moffat AS (2002) Finding new ways to protect drought-stricken plants. *Plant Genet*
- Msongaleli B, Rwehumbiza F, Tumbo SD, Kihupi N (2014) Sorghum Yield Response to Changing Climatic Conditions in Semi-Arid Central Tanzania: Evaluating Crop Simulation Model Applicability. *Agric Sci* 05:822–833. <https://doi.org/10.4236/as.2014.510087>
- Muchow RC (1985a) Phenology, seed yield and water use of grain legumes grown under different soil water regimes in a semi-arid tropical environment. *F Crop Res* 11:81–97. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(85\)90093-0](https://doi.org/10.1016/0378-4290(85)90093-0)
- Muchow RC (1989a) Comparative productivity of maize, sorghum and pearl millet in a semi-arid tropical environment I. Yield potential. *F Crop Res* 20:191–205. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(89\)90079-8](https://doi.org/10.1016/0378-4290(89)90079-8)
- Muchow RC (1989b) Comparative productivity of maize, sorghum and pearl millet in a semi-arid tropical environment II. Effect of water deficits. *F Crop Res* 20:207–219. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(89\)90080-4](https://doi.org/10.1016/0378-4290(89)90080-4)
- Muchow RC (1985b) Canopy development in grain legumes grown under different soil water regimes in a semi-arid tropical environment. *F Crop Res* 11:99–109. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(85\)90094-2](https://doi.org/10.1016/0378-4290(85)90094-2)
- Muchow RC (1985c) An analysis of the effects of water deficits on grain legumes grown in a semi-arid tropical environment in terms of radiation interception and its efficiency of use. *F Crop Res* 11:309–323. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(85\)90111-X](https://doi.org/10.1016/0378-4290(85)90111-X)
- Muchow RC, Carberry PS (1990) Phenology and leaf-area development in a tropical grain sorghum. *F Crop Res* 23:221–237. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(90\)90056-H](https://doi.org/10.1016/0378-4290(90)90056-H)
- Muchow RC, Robertson MJ, Pengelly BC (1993) Accumulation and partitioning of biomass and nitrogen by soybean, mungbean and cowpea under contrasting environmental conditions. *F Crop Res* 33:13–36. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(93\)90092-2](https://doi.org/10.1016/0378-4290(93)90092-2)
- Nielsen DC, Vigil MF, Benjamin JG (2009) The variable response of dryland corn yield

- to soil water content at planting. *Agric Water Manag* 96:330–336.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.08.011>
- Nobel P, Jordan P (1983) Transpiration Stream of Desert Species: Resistances and Capacitances for a C3, a C4, and a CAM Plant. *J Exp Bot*
- Ong CK, Simmonds LP, Matthews RB (1987) Responses to Saturation Deficit in a Stand of Groundnut (*Arachis hypogaea* L.). 2. Growth and Development. *Ann Bot* 59:121–128. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a087293>
- Otegui M, Ruiz RA, Petruzzi D (1996) Modeling hybrid and sowing date effects on potential grain yield of maize in a humid temperate region. *F Crop Res* 47:167–174. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(96\)00031-7](https://doi.org/10.1016/0378-4290(96)00031-7)
- Otegui ME, Andrade FH, Cirilo AG, Mercu JL (2023) Fecha de siembra. In: Maizar (ed) *Ecofisiología y manejo del cultivo de maíz*. p 486
- Otegui ME, Andrade FH, Suero EE (1995a) Growth, water use, and kernel abortion of maize subjected to drought at silking. *F Crop Res* 40:87–94
- Otegui ME, Nicolini MG, Ruiz RA, Dodds P (1995b) Sowing Date Effects on Grain Yield Components for Different Maize Genotypes. *Agron J* 87:29–33.
<https://doi.org/10.2134/agronj1995.00021962008700010006x>
- Otegui ME, Riglos M, Mercu JL (2021) Genetically modified maize hybrids and delayed sowing reduced drought effects across a rainfall gradient in temperate Argentina. *J Exp Bot* 1–9. <https://doi.org/10.1093/jxb/erab139>
- Ovando G, Haro R (2020) Empleo de DSSAT-PNUTGRO en la región central de Argentina: evaluaciones de fechas de siembra con información histórica y escenarios de cambio climático. *South Am Sci* ISSN 2675-7222 1:e2074.
<https://doi.org/10.17648/sas.v1i2.74>
- Pale S, Mason SC, Galusha TD (2003) Planting time for early-season pearl millet and grain sorghum in Nebraska. *Agron J* 95:1047–1053.
<https://doi.org/10.2134/agronj2003.1047>
- Pandey RK, Herrera WAT, Pendleton JW (1984a) Drought Response of Grain Legumes Under Irrigation Gradient: I. Yield and Yield Components 1. *Agron J* 76:549–553.
<https://doi.org/10.2134/agronj1984.00021962007600040009x>
- Pandey RK, Herrera WAT, Villegas AN, Pendleton JW (1984b) Drought Response of Grain Legumes Under Irrigation Gradient: III. Plant Growth 1. *Agron J* 76:557–560. <https://doi.org/10.2134/agronj1984.00021962007600040011x>
- Parra G, Borrás L, Gambin BL (2020) Maize long-term genetic progress explains current dominance over sorghum in Argentina. *Eur J Agron* 119:.
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126122>
- Parra G, Gambin BL, Borrás L (2022) Crop attributes explaining current grain yield dominance of maize over sorghum. *F Crop Res* 275:.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108346>
- Paruelo JM, Guerschman JP, Verón SR (2005) Expansión agrícola y cambios en el uso

del suelo. *Cienc Hoy* 15:14–23

- Passioura J (2006) Increasing crop productivity when water is scarce—from breeding to field management. *Agric Water Manag* 80:176–196.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.012>
- Passioura JB (1996) Drought and drought tolerance. *Plant Growth Regul* 20:79–83.
<https://doi.org/10.1007/BF00024003>
- Paz JO, Fraisse CW, Hatch LU (2007) Development of an ENSO-based irrigation decision support tool for peanut production in the southeastern US. *Comput Electron Agric* 55:28–35. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2006.11.003>
- Pengue W, Morello J (2007) Procesos de transformación en las áreas de borde agropecuario: Una agricultura sostenible
- Podestá G, Bert F, Rajagopalan B (2009) Decadal climate variability in the Argentine Pampas: regional impacts of plausible climate scenarios on agricultural systems. *int-res.com*. <https://doi.org/10.3354/cr00807>
- Podestá G, Letson D, Messina C (2002) Use of ENSO-related climate information in agricultural decision making in Argentina: A pilot experience. *Agric Syst* 74:371–392. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(02\)00046-X](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(02)00046-X)
- Podestá GP, Messina CD, Grondona MO, Magrin GO (1999) Associations between grain crop yields in Central-Eastern Argentina and El Niño-Southern oscillation. *J Appl Meteorol* 38:1488–1498. <https://doi.org/10.1175/1520->
- Prasad P, Staggenborg S (2009) Growth and production of sorghum and millets. *soils, plant growth Crop Prod II*
- Prasad PVV, Djanaguiraman M (2011) High night temperature decreases leaf photosynthesis and pollen function in grain sorghum. *Funct Plant Biol* 38:993–1003. <https://doi.org/10.1071/FP11035>
- Prasad PVV, Pisipati SR, Mutava RN, Tuinstra MR (2008) Sensitivity of grain sorghum to high temperature stress during reproductive development. *Crop Sci* 48:1911–1917. <https://doi.org/10.2135/cropsci2008.01.0036>
- Puangbut D, Jogloy S, Vorasoot N (2009) Association of root dry weight and transpiration efficiency of peanut genotypes under early season drought. *Agric Water Manag* 96:1460–1466. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2009.04.018>
- Rachaputi R, Chauhan YS, Wright GC (2021) Peanut. *Crop Physiol Case Hist Major Crop* 360–382. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819194-1.00011-6>
- Rajcan I, Tollenaar M (1999) Source:sink ratio and leaf senescence in maize: *F Crop Res* 60:255–265. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(98\)00143-9](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(98)00143-9)
- Rao RCN, Singh S, Sivakumar MVK (1985) Effect of Water Deficit at Different Growth Phases of Peanut. I. Yield Responses 1. *Agron J* 77:782–786.
<https://doi.org/10.2134/agronj1985.00021962007700050026x>
- Ratliff LF, Ritchie JT, Cassel DK (1983) Field-Measured Limits of Soil Water

- Availability as Related to Laboratory-Measured Properties. *Soil Sci Soc Am J* 47:770–775. <https://doi.org/10.2136/sssaj1983.03615995004700040032x>
- Rattalino Edreira JI, Budakli Carpici E, Sammarro D, Otegui ME (2011a) Heat stress effects around flowering on kernel set of temperate and tropical maize hybrids. *F Crop Res* 123:62–73. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.04.015>
- Rattalino Edreira JI, Maddonni GA, Otegui ME (2011b) Golpe de calor y productividad en maíz: El ambiente y la genética. *Rev técnica los Prod en siembra directa* 1–7
- Rattalino Edreira JI, Otegui ME (2012) Heat stress in temperate and tropical maize hybrids: Differences in crop growth, biomass partitioning and reserves use. *F Crop Res* 130:87–98. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.02.009>
- Ray DK, Mueller ND, West PC, Foley JA (2013) Yield Trends Are Insufficient to Double Global Crop Production by 2050. *PLoS One* 8:e66428. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0066428>
- Remussi C, Pascale AJ (1977) La Soja. Cultivo, Mejoramiento, Comercialización y Usos. In: *Enciclopedia Argentina De Agricultura y Jardinería*. Acme, Buenos Aires, Argentina. p 104 pp.
- Reynolds M, Dreccer F, Trethowan R (2006) Drought-adaptive traits derived from wheat wild relatives and landraces. *J Exp Bot*
- Ries LL, Purcell LC, Carter TE (2012) Physiological Traits Contributing to Differential Canopy Wilting in Soybean under Drought. *Crop Sci* 52:272–281. <https://doi.org/10.2135/cropsci2011.05.0278>
- Ritchie JT, Alagarswamy G (2003) Model concepts to express genetic differences in maize yield components. *Agron J* 95:4–9. <https://doi.org/10.2134/agronj2003.0004>
- Ritchie S, Hanway J (1982) How a corn plant develops. Iowa State University of Science and Technology. Ext Serv Rep Iowa
- Rizhsky L, Liang H, Mittler R (2002) The Combined Effect of Drought Stress and Heat Shock on Gene Expression in Tobacco 1. *Plant Physiol*. <https://doi.org/10.1104/pp.006858>
- Robertson MJ, Fukai S, Ludlow MM, Hammer GL (1993) Water extraction by grain sorghum in a sub-humid environment. II. Extraction in relation to root growth. *F Crop Res* 33:99–112. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(93\)90096-6](https://doi.org/10.1016/0378-4290(93)90096-6)
- Rolla AL, Nuñez MN, Guevara ER (2018) Climate impacts on crop yields in Central Argentina. Adaptation strategies. *Agric Syst* 160:44–59. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.08.007>
- Rooney WL, Aydin S (1999) Genetic control of a photoperiod-sensitive response in *Sorghum bicolor* (L.) Moench. *Crop Sci* 39:397–400. <https://doi.org/10.2135/cropsci1999.0011183X0039000200016x>
- Rotili DH, Giorno A, Tognetti PM, Maddonni GÁ (2019) Expansion of maize production in a semi-arid region of Argentina: Climatic and edaphic constraints and their implications on crop management. *Agric Water Manag* 226:105761.

<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105761>

- Rowntree SC, Suhre JJ, Weidenbenner NH (2013) Genetic Gain \times Management Interactions in Soybean: I. Planting Date. *Crop Sci* 53:1128–1138.
<https://doi.org/10.2135/cropsci2012.03.0157>
- Ruane AC, Mcdermid S, Rosenzweig C (2014) Carbon-temperature-water change analysis for peanut production under climate change: A prototype for the AgMIP coordinated climate-crop modeling project (C3MP). *Glob Chang Biol* 20:394–407.
<https://doi.org/10.1111/gcb.12412>
- Sadok W, Sinclair TR (2009) Genetic variability of transpiration response to vapor pressure deficit among soybean cultivars. *Crop Sci* 49:955–960.
<https://doi.org/10.2135/cropsci2008.09.0560>
- Sadras V, Echarte L, Andrade FH (2000) Profiles of Leaf Senescence During Reproductive Growth of Sunflower and Maize. *Ann Bot* 85:187–195.
<https://doi.org/10.1006/anbo.1999.1013>
- Sadras VO, Calviño PA (2001) Quantification of Grain Yield Response to Soil Depth in Soybean, Maize, Sunflower, and Wheat. *Agron J* 93:577–583.
<https://doi.org/10.2134/AGRONJ2001.933577X>
- Sadras VO, Hall AJ, Trapani N, Vilella F (1989) Dynamics of rooting and root-length: leaf-area relationships as affected by plant population in sunflower crops. *F Crop Res* 22:45–57. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(89\)90088-9](https://doi.org/10.1016/0378-4290(89)90088-9)
- Sadras VO, Lawson C (2013) Nitrogen and water-use efficiency of Australian wheat varieties released between 1958 and 2007. *Eur J Agron* 46:34–41.
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.11.008>
- Sadras VO, Milroy SP (1996) Soil-water thresholds for the responses of leaf expansion and gas exchange: A review. *F. Crop. Res.* 47:253–266
- SAGyP (2023) Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca.
<https://www.argentina.gob.ar/agricultura-ganaderia-y-pesca>
- Salekdeh G, Reynolds M, Bennett J, Boyer J (2009) Conceptual framework for drought phenotyping during molecular breeding. *Trends Plant Sci*
- Santachiara G, Borrás L, Rotundo J (2017) Physiological Processes Leading to Similar Yield in Contrasting Soybean Maturity Groups. *Crop Ecol Physiol*.
<https://doi.org/10.2134/agronj2016.04.0198>
- Satorre EH, Benech Arnold RL, De La Fuente EB (2003) Producción de granos, bases funcionales para su manejo.
- Schittenhelm S, Schroetter S (2014) Comparison of Drought Tolerance of Maize, Sweet Sorghum and Sorghum-Sudangrass Hybrids. *J Agron Crop Sci* 200:46–53.
<https://doi.org/10.1111/JAC.12039>
- Sermons S, Seversike T, Sinclair T (2012) Temperature influences the ability of tall fescue to control transpiration in response to atmospheric vapour pressure deficit. *Funct Plant Biol* 979–986

- Seversike TM, Sermons SM, Sinclair TR (2013) Temperature interactions with transpiration response to vapor pressure deficit among cultivated and wild soybean genotypes. *Physiol Plant* 148:62–73. <https://doi.org/10.1111/J.1399-3054.2012.01693.X>
- Shah NH, Paulsen GM (2003) Interaction of drought and high temperature on photosynthesis and grain-filling of wheat. *Plant Soil* 257:219–226. <https://doi.org/10.1023/A:1026237816578>
- Simmonds LP, Ong CK (1987) Responses to Saturation Deficit in a Stand of Groundnut (*Arachis hypogaea* L.) 1. Water Use. *Ann Bot* 59:113–119. <https://doi.org/10.1093/OXFORDJOURNALS.AOB.A087292>
- Sinclair TR, Bennett JM, Muchow RC (1990) Relative Sensitivity of Grain Yield and Biomass Accumulation to Drought in Field-Grown Maize. *Crop Sci* 30:690–693. <https://doi.org/10.2135/cropsci1990.0011183X003000030043x>
- Sinclair TR, Messina CD, Beatty A, Samples M (2010) Assessment across the United States of the Benefits of Altered Soybean Drought Traits. *Agron J* 102:475. <https://doi.org/10.2134/agronj2009.0195>
- Sinclair TR, Muchow RC (1999) Radiation Use Efficiency. *Adv Agron* 65:215–265. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60914-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60914-1)
- Sinclair TR, Muchow RC, Ludlow MM (1987) Field and model analysis of the effect of water deficits on carbon and nitrogen accumulation by soybean, cowpea and black gram. *F Crop Res* 17:121–140. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(87\)90087-6](https://doi.org/10.1016/0378-4290(87)90087-6)
- Singh P, Nedumaran S, Traore PCS (2014) Quantifying potential benefits of drought and heat tolerance in rainy season sorghum for adapting to climate change. *Agric For Meteorol* 185:37–48. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.10.012>
- Singh V, Nguyen CT, van Oosterom EJ (2015) Sorghum genotypes differ in high temperature responses for seed set. *F Crop Res* 171:32–40. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.11.003>
- Sivamurugan AP, Sabarinathan B, Pazhanivelan S (2021) The Pharma Innovation Journal 2021; 10(1): 715-718 Calibration and validation of CERES-sorghum module of DSSAT model for rabi sorghum under rainfed condition. <https://doi.org/10.22271/tpi.2021.v10.i1j.5613>
- Stockle CO, Kiniry JR (1990) Variability in crop radiation-use efficiency associated with vapor-pressure deficit. *F Crop Res* 25:171–181. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(90\)90001-R](https://doi.org/10.1016/0378-4290(90)90001-R)
- Suriharn B, Patanothai A, Pannangpetch K (2007) Determination of cultivar coefficients of peanut lines for breeding applications of the CSM-CROPGRO-peanut model. *Crop Sci* 47:607–621. <https://doi.org/10.2135/cropsci2006.01.0050>
- Tardieu F, Simonneau T (1998) Variability among species of stomatal control under fluctuating soil water status and evaporative demand: modelling isohydric and anisohydric behaviours. *J Exp Bot* 49:419–432. https://doi.org/10.1093/jxb/49.Special_Issue.419

- Tari I, Laskay G, Takács Z, Poór P (2013) Response of Sorghum to Abiotic Stresses: A Review. *J Agron Crop Sci* 199:264–274. <https://doi.org/10.1111/JAC.12017>
- Teare ID, Kanemasu ET, Powers WL, Jacobs HS (1973) Water-Use Efficiency and Its Relation to Crop Canopy Area, Stomatal Regulation, and Root Distribution 1. *Agron J* 65:207–211. <https://doi.org/10.2134/agronj1973.00021962006500020007x>
- Trenberth KE (2019) El Niño Southern Oscillation (ENSO). In: *Encyclopedia of Ocean Sciences*. Elsevier, pp 420–432
- Uhart SA, Andrade FH (1995) Nitrogen deficiency in maize: I. Effects on crop growth, development, dry matter partitioning, and kernel set. *Crop Sci*. <https://doi.org/10.2135/cropsci1995.0011183X003500050020x>
- Vanderlip R (1993) How a sorghum plant develops
- Vara Prasad P V., Craufurd PQ, Kakani VG (2001) Influence of high temperature during pre- and post-anthesis stages of floral development on fruit-set and pollen germination in peanut. *Funct Plant Biol* 28:233. <https://doi.org/10.1071/PP00127>
- Vara Prasad P V., Craufurd PQ, Summerfield RJ, Wheeler TR (2000) Effects of short episodes of heat stress on flower production and fruit-set of groundnut (*Arachis hypogaea* L.). *J Exp Bot* 51:777–784. <https://doi.org/10.1093/jxb/51.345.777>
- Veas REA, Ergo V V., Vega CRC (2022) Soybean seed growth dynamics exposed to heat and water stress during the filling period under field conditions. *J Agron Crop Sci* 208:472–485. <https://doi.org/10.1111/jac.12523>
- Vega CRC, Andrade FH, Sadras VO (2001) Seed number as a function of growth. A comparative study of soybean, sunflower and maize. *Crop Sci* 41:748–754. <https://doi.org/10.2135/cropsci2001.413748x>
- Vierling E (1991) The Roles of Heat Shock Proteins in Plants. *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol* 42:579–620. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.42.060191.003051>
- Viglizzo E (2007) Desafíos y oportunidades de la expansión agrícola en Argentina
- Viglizzo E, Jobbágy E (2010) Expansión de la frontera agropecuaria en Argentina y su impacto ecológico-ambiental
- Wallach D (2006) Evaluating crop models. *Work with Dyn Crop Model* 11–53
- Watson J, Zheng B, Chapman S, Chenu K (2017) Projected impact of future climate on water-stress patterns across the Australian wheatbelt. *J Exp Bot* 68:5907–5921. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx368>
- Xu H, Tian Z, Fan D (2017) Impacts of climate change on peanut yield in China simulated by CMIP5 multi-model ensemble projections. In: Gao W, Chang N-B, Wang J (eds) *Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability XIV*. SPIE, p 30
- Yang Z, Sinclair TR, Zhu M (2012) Temperature effect on transpiration response of maize plants to vapour pressure deficit. *Environ Exp Bot* 78:157–162.

<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2011.12.034>

Ye H, Song L, Schapaugh WT (2020) The importance of slow canopy wilting in drought tolerance in soybean. *J Exp Bot* 71:642–652.

<https://doi.org/10.1093/JXB/ERZ150>

Zegada-Lizarazu W, Zatta A, Monti A (2012) Water uptake efficiency and above- and belowground biomass development of sweet sorghum and maize under different water regimes. *Plant Soil* 351:47–60. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0928-2>

Zhou J, Zhou J, Ye H (2020) Classification of soybean leaf wilting due to drought stress using UAV-based imagery. *Comput Electron Agric* 175:105576.

<https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2020.105576>