



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN LUIS

FACULTAD DE INGENIERIA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

**ANÁLISIS ECOFISIOLÓGICO COMPARATIVO ENTRE MAÍZ
Y SORGO EN LA REGIÓN SEMIÁRIDA CENTRAL: EFECTO
DEL CAMBIO EN LA FECHA DE SIEMBRA SOBRE EL
RENDIMIENTO**

AUTOR

LUJAN, FEDERICO ALEJANDRO

DIRECTOR

RIGLOS, MIGUEL MAXIMILIANO

INGENIERIA AGRONOMICA

Villa Mercedes, San Luis

2024

AGRADECIMIENTOS

A Dios por la oportunidad.

A mi querida familia por bancarme y estar siempre presente.

A mis compañeros/amigos por todo el aguante.

A la Facultad de ingeniería y ciencias agropecuarias que me permitió desarrollar mis estudios.

Al ing. Maximiliano Riglos por su constante disposición, acompañamiento y compromiso durante todo el trabajo.

A la EEA INTA San Luis por darme la posibilidad de realizar la pasantía en su establecimiento.

RESUMEN

El incremento productivo de la Argentina de las últimas décadas respondió principalmente al aumento en la superficie cultivada de soja y maíz desde la Región Pampeana Húmeda hacia la Región Semiárida Central (RSC). En la RSC, tanto modificaciones de la fecha de siembra, como la sustitución de especies por otras más adaptadas a condiciones de sequías y temperaturas supraóptimas, como sorgo, podrían convertirse en alternativas viables para aumentar la producción. El objetivo de esta tesis fue comparar ecofisiológicamente el rendimiento de maíz y sorgo en diferentes fechas de siembra en la RSC. Se realizó un experimento a campo en Villa Mercedes durante la campaña 2018/2019 donde se evaluaron ambos cereales en fechas de siembra contrastantes (FS1:fines de octubre; FS2:principios de diciembre). Los resultados señalan que el rendimiento en grano (RG) de maíz superó al de sorgo ($301 > 257.9 \text{ gm}^{-2}$; $P \leq 0.10$). Sin embargo, la biomasa total (BT) de sorgo fue superior a la de maíz ($922.33 > 686.94 \text{ g m}^{-2}$; $P \leq 0.01$) y se explicó por el índice de cosecha, siendo un 40% inferior en sorgo respecto a maíz ($0.44 > 0.28$; $P \leq 0.01$). Además de las diferencias entre especies, el cambio de la FS generó variaciones en el RG explicadas principalmente por el peso de los granos (PG; $P \leq 0.10$), siendo significativas para el número de los granos (NG) solo en el sorgo ($P \leq 0.10$). Finalmente, en cuanto a la generación de BT, el sorgo superó al maíz en términos de EUA. Mientras que, en lo referido a la EUR, el maíz duplicó al sorgo al retrasar la fecha de siembra. Las relaciones establecidas en esta tesis constituyen un punto de partida para el desarrollo de futuras investigaciones en regiones menos exploradas, como la RSC. Profundizar en el análisis de los factores que determinan el rendimiento bajo un manejo contrastante resulta clave para optimizar el manejo de cada especie.

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO 1 | 1 |
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1. Objeto de estudio y problemática..... | 1 |
| 1.2. Hipótesis de trabajo..... | 2 |
| 1.3. Caracterización edafo-climática de la zona..... | 3 |
| 1.4. Revisión de antecedentes bibliográficos..... | 3 |
| 1.5. Objetivos..... | 6 |
| 1.5.1. Objetivo general..... | 6 |
| 1.5.2. Objetivos específicos..... | 6 |
| CAPÍTULO 2..... | 7 |
| MATERIALES Y MÉTODOS..... | 7 |
| 2.1. Condiciones experimentales y material vegetal utilizado..... | 7 |
| 2.2. Diseño experimental..... | 7 |
| 2.3. Mediciones realizadas..... | 8 |
| 2.4. Análisis de datos..... | 9 |
| CAPÍTULO 3..... | 10 |
| RESULTADOS..... | 10 |
| 3.1. Caracterización climática durante la estación de crecimiento..... | 10 |
| 3.2. Contenido de agua en el suelo durante la estación de crecimiento..... | 11 |
| 3.3. Componentes ecofisiológicos y numéricos del rendimiento..... | 12 |
| 3.3.1. Rendimiento en grano y sus determinantes ecofisiológicos..... | 12 |
| 3.3.2. Componentes numéricos del rendimiento: Número y peso de los granos..... | 14 |
| 3.4. Captura y uso del agua y de la radiación..... | 15 |
| 3.4.1. Captura y uso del agua para la generación de la biomasa aérea..... | 15 |
| 3.4.2. Captura y uso de la radiación para la generación de biomasa aérea... | 17 |
| CAPÍTULO 4..... | 19 |
| DISCUSIÓN..... | 19 |

| | |
|-------------------|----|
| CONCLUSIÓN..... | 21 |
| CAPÍTULO 5..... | 23 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 23 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1: Evolución de rendimiento en grano de maíz y sorgo para la provincia de San Luis desde la Campaña 1969/1970 hasta la Campaña 2022/2023..... | 2 |
| Figura 2.1: Plano de ensayo a campo correspondiente a la campaña agrícola 2018/2019, EEA San Luis..... | 7 |
| Figura 3.1: Precipitaciones (Pp), Evapotranspiración potencial (ETp) y Radiación solar incidente (R inc) como promedio mensual para el período septiembre-mayo de la campaña 2018/2019..... | 10 |
| Figura 3.2. Temperaturas máximas, medias y mínimas diarias (en rojo, verde y azul, respectivamente) para el período septiembre-mayo de la campaña 2018/2019..... | 10 |
| Figura 3.3: Evolución del contenido hídrico en el suelo (mm) hasta 2 m de profundidad a lo largo del ciclo para ambas fechas de siembra en la campaña 2018/19. En la parte media de cada figura se representa el contenido de humedad del suelo para cada cultivo (maíz: anaranjado y sorgo: verde) y fecha de siembra (FS1: líneas continuas y FS2: líneas punteadas). En líneas horizontales continuas se indican los valores de lámina correspondientes a capacidad de campo (azul), 50% agua útil (celeste) y punto de marchitez permanente (rojo)..... | 12 |
| Figura. 3.4: Rendimiento en grano (g m^{-2}) de maíz y sorgo según la fecha de siembra (azul y anaranjado para la FS1 y 2, respectivamente), durante la campaña 2018/2019 en EEA INTA San Luis..... | 13 |
| Figura. 3.5: Rendimiento en grano en función de la biomasa aérea total (g m^{-2}) de maíz (círculos) y sorgo (cuadrados) según la fecha de siembra (símbolos llenos y vacíos para la FS1 y 2, respectivamente), durante la campaña 2018/2019 en EEA INTA San Luis. Las líneas discontinuas corresponden a los valores de índice de cosecha de 0.2, 0.3, 0.4 y 0.5. Las líneas verticales y horizontales continuas corresponden al desvío estándar..... | 14 |
| Figura 3.6: Número y peso de los granos de maíz (izq.) y sorgo (der.). En símbolos llenos y vacíos se representa la FS1 y 2, respectivamente. Cada una de las líneas continuas representan una isolínea de rendimiento (200, 400, 600, 800 y 1000 g m^{-2}). Las líneas verticales y horizontales continuas corresponden al desvío estándar..... | 15 |
| Figura 3.7: Eficiencia en el uso del agua (EUA) de maíz (círculos) y sorgo (cuadrados) como la pendiente generada de la relación entre la Biomasa Aérea Total y la Evapotranspiración de los cultivos (ETc) en dos fechas de siembra contrastantes (FS1: símbolos llenos y FS2: símbolos vacíos). Las líneas verticales y horizontales continuas corresponden al desvío estándar..... | 17 |
| Figura 3.8: Eficiencia en el uso de la radiación (EUR) de maíz (círculos) y sorgo (cuadrados) como la pendiente generada de la relación entre la Biomasa Aérea Total y la Evapotranspiración de cultivos (ETc) en dos fechas de siembra contrastantes (FS1: símbolos llenos y FS2: símbolos vacíos). Las líneas verticales y horizontales continuas | |

corresponden al desvío estándar.....18

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 3.1: Resultados de ANOVA correspondientes al rendimiento en grano (RG) y sus determinantes a lo largo del ciclo..... | 12 |
| Tabla 3.2: Resultados de ANOVA correspondientes a los componentes numéricos del rendimiento para maíz..... | 14 |
| Tabla 3.3: Resultados de ANOVA correspondientes a los componentes numéricos del rendimiento para sorgo..... | 15 |
| Tabla 3.4: Resultados de ANOVA correspondiente a la Evapotranspiración del cultivo (ETc) y en la eficiencia en el uso del agua (EUA)..... | 16 |

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Objeto de estudio y problemática

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 dado que su producción se triplicó (35.6 a 95.8 M Tn) entre las cosechas de la campaña 1970/1971 y 2022/2023 (SAGyP, 2024). Este cambio fue producto de aumentos en los rendimientos de los principales cultivos y de la expansión del área agrícola (Viglizzo y Jobbágy, 2010). La mayor parte de esta expansión agrícola en Argentina en el último medio siglo fue a expensas de superficie ocupada por pasturas perennes y el reemplazo de pastizales y bosques en áreas consideradas marginales (Viglizzo y Jobbágy, 2010). Una de esas áreas, la Región Semiárida Central (RSC), registró un aumento superior al de las regiones Húmedas y Sub-Húmedas. Esta reciente expansión permite especular que en los sistemas de producción más difundidos existen aún oportunidades para ajustar los mismos a los desafíos agroclimáticos complejos que caracterizan a la RSC.

La siembra demorada de maíz es una de las estrategias de manejo más difundidas en la RSC. Demorar la siembra favorece una mejor recarga del perfil y reduce la demanda ambiental en etapas críticas para la generación del rendimiento en grano (Maddonni, 2012), sin embargo, los resultados esperables de cambios en la época de siembra de esta especie 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 sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench). Este cultivo tiene inserción en las cadenas de valor de la RSC asociado a los muy desarrollados sistemas ganaderos de cría y engorde a corral como alternativa al grano o silo de planta entera de maíz. Para ambas especies se ha registrado un aumento sostenido del rendimiento en la provincia de San Luis donde se sitúa el ensayo experimental (Fig. 1.1). Debido a la elevada adopción de ambas especies en la RSC, una comparación robusta entre ambos cereales hace necesaria una evaluación eco-fisiológica simultánea a campo, tanto en siembras tempranas como tardías.

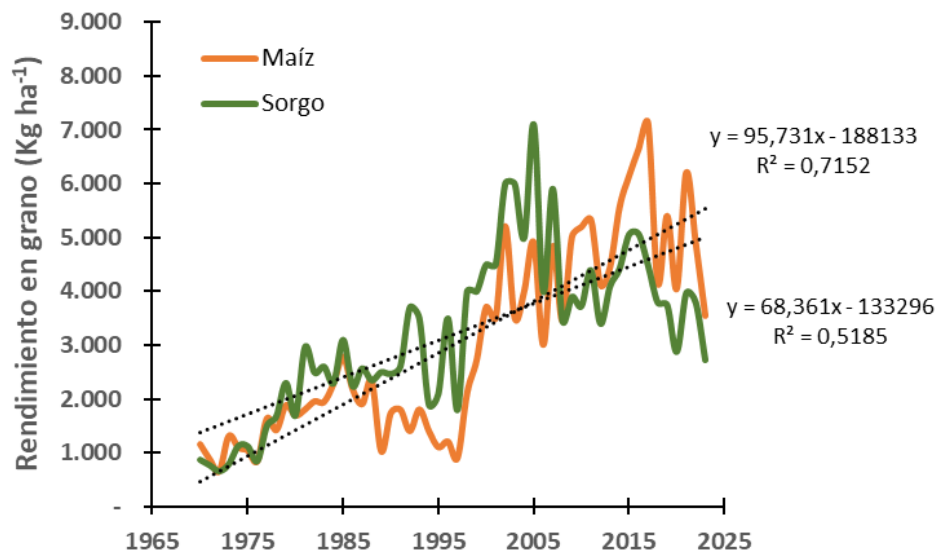


Figura 1.1: Evolución de rendimiento en grano de maíz y sorgo para la provincia de San Luis desde la Campaña 1969/1970 hasta la Campaña 2022/2023 (fuente: SAGyP, 2024).

Ambos cultivos presentan diferencias ecofisiológicas marcadas que se maximizan en ambientes marginales como los de la RSC. Estudios previos que compararon ambas especies, reconocieron características contrastantes entre ambos cereales. Por un lado, se estableció que la exploración del perfil de suelo en profundidad de sorgo era mayor que la de maíz (Farré y Faci, 2006), por otro lado, 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 sorgo (0.073 día⁻¹) son sensiblemente menores a las de maíz (0.088 día⁻¹). Esta característica atenúa la caída del rendimiento en ambientes con condiciones hídricas limitantes, al permitir mantener reservas hídricas para la etapa crítica de definición del rendimiento. Llamativamente, el sorgo tiene, a diferencia del maíz, una capacidad elevada para adecuar el desarrollo (i.e., plasticidad fenotípica por latencia) cuando experimenta condiciones hídricas muy restrictivas, tendiendo a eludir la simultaneidad de estas condiciones con el periodo de definición del número de granos.

Debido a estas asimetrías, una comparación robusta de ambas especies hace necesaria una evaluación ecofisiológica simultánea a campo, tanto en siembras tempranas como tardías en la RSC.

1.2. HIPÓTESIS DE TRABAJO

En relación con lo anteriormente expresado, el trabajo se basa en la siguiente hipótesis:

La asimetría en el grado de inversión en mejoramiento genético entre ambas especies (maíz > sorgo) habría estrechado la ventaja que décadas atrás tenía el sorgo sobre el maíz en ambientes propensos a la sequía.

1.3. CARACTERIZACIÓN EDAFO-CLIMÁTICA DE LA ZONA

La provincia de San Luis, ubicada en la región Semiárida Central presenta un régimen de precipitación anual que varía desde los 700 mm en el Este hasta 250 mm en el Oeste (Sáenz, 2009). El Departamento General Pedernera, ubicado en el Centro Oeste de la provincia y donde se llevó a cabo el ensayo experimental, presenta un régimen con precipitaciones de tipo monzónico, concentrándose principalmente durante los meses estivales. El promedio histórico anual de precipitaciones registrado desde 1903 hasta 1989 fue de 587 mm con una tendencia creciente de 1.77 mm por año concentrándose dicho incremento durante las estaciones de primavera-verano (Echeverría y Kay, 1990). Un trabajo más reciente destaca un incremento de 100 mm para la región de Villa Mercedes y alrededores para el periodo comprendido entre 1977-2006 respecto al periodo previo comprendido entre 1947-1976 (Forte Lay et al, 2008).

En cuanto al período libre de heladas (PLH), el período medio histórico comprendido entre 1968 y 1996 fue de 189 días, siendo la fecha media de primera helada el 22 de abril \pm 20 días y la fecha media de última helada el 15 de octubre \pm 17 días, registrando la temperatura a 1.5 metros de altura, en abrigo meteorológico (Orta y Federighi, 1997). Según datos más actuales, proporcionados por la Universidad Nacional de San Luis, el período libre de heladas abarca 156 días (Orta y Rojas, 2012).

Finalmente, en cuanto a las características edáficas de la región, como característica general podemos decir que los suelos tienen poco contenido de materia orgánica (alrededor de 0.86% en los horizontes superficiales), con un desarrollo incipiente de horizontes genéticos, perfil tipo A-AC-C. Dichos suelos se destacan por ser porosos y bien drenados, de textura limosa gruesa, con poca retención de humedad y susceptibles a erosión eólica (Peña Zubiate y d'Hiriart, 2000). Focalizando en el suelo sobre el que se realizó el ensayo, el mismo corresponde a la serie Cramer y se clasifica como Ustipsament típico con textura arenosa-franca. A su vez, se indica que el ensayo se ubicó en partes relativamente planas y homogéneas del paisaje.

1.4. REVISIÓN DE ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

El maíz y el sorgo son dos de los cultivos estivales más relevantes en lo que refiere a la seguridad alimentaria de muchos países desarrollados y en vías de desarrollo (Yang 2018). A nivel mundial, el maíz y el sorgo ocupan el primer y el quinto lugar en cuanto a producción anual, respectivamente (FAO, 2024). En el caso de maíz, la producción global en 2022 fue de aproximadamente 1163 millones de toneladas (MT), la cual se obtuvo en una superficie cosechada de 203 millones de hectáreas (FAO, 2024). Los principales países productores de este cereal son Estados Unidos (348.7 MT) y China (277.2 MT), que concentran el 56% de la producción mundial. En dicho año, Brasil y Argentina fueron los países de mayor producción en América del Sur con 109.4 MT y 59 MT, ubicándose como tercer y cuarto productor, respectivamente (FAO, 2024). En cuanto a la producción

global de sorgo en 2022 fue de 57.5 MT (un 4.9 % respecto a la producción mundial de maíz), que se obtuvo en una superficie cosechada de 40.7 millones de hectáreas (FAO, 2024). Los principales países productores de este cereal a diferencia de maíz corresponden a países del centro y norte de África como lo son Nigeria (6.8 MT) y Sudán (5.2 MT) que concentran el 21 % de la producción mundial. En cuanto a los países con mayor producción en América del Sur, también sobresalen Brasil y Argentina con producciones de 2.9 MT y 2.8 MT, respectivamente ocupando los puestos 8vo y 9no como productores mundiales.

Focalizándonos en Argentina, durante las últimas dos décadas la producción de maíz se incrementó de 16.7 MT a 56.7 MT, como resultado de un aumento en el área sembrada (3.1 a 7.2 millones de has) y del incremento de los rendimientos (5.4 a 7.8 Tn ha⁻¹, Otegui et. al., 2021). Dicho incremento de la superficie (i.e. 4.1 millones de has) no se registró en el cultivo de sorgo, el cual en dicho periodo redujo la producción de 3.3 a 1.6 MT, al igual que la superficie (0.71 a 0.34 millones de has, SAGyP, 2024) mientras que los rendimientos prácticamente se mantuvieron inalterables (4.64 T a 4.67 T, respectivamente). En resumen, el incremento productivo registrado en maíz y el decrecimiento en sorgo se concentró en regiones consideradas marginales o periféricas como la Región Semiárida Central (RSC).

En la RSC, actualmente ambas especies compiten por asignación de área cultivada. Mejorar nuestra comprensión de la determinación del rendimiento en grano de maíz y sorgo en dicha región es relevante para ajustar estrategias de manejo en ambos cereales. Uno de los debates más significativos en regiones marginales, es el referido a las ventajas y desventajas del sorgo respecto a maíz (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, 1989a). En cambio, el rendimiento de sorgo fue mayor que el del maíz en situaciones de escasez de agua muy severas propias de ambientes semiáridos (Muchow, 1989b). Se ha destacado el cultivo de sorgo sobre el del maíz bajo distintos escenarios de restricción hídrica, explicado por una mayor generación de biomasa, profundización radical y eficiencia en el uso del agua (Farré y Faci, 2006). Sin embargo, las diferencias provocadas por el mejoramiento genético, hacen cuestionables las ventajas del sorgo respecto al maíz en ambientes propensos a la sequía (Mason y Eskridge, 2008; Parra et al. 2020, 2022). Un estudio realizado en EEUU reveló que el rendimiento en grano de maíz superó al del sorgo en un 30% tanto en condiciones de sequía como de riego (Mason y Eskridge, 2008). Además, este análisis señaló que los incrementos en el rendimiento en grano de maíz a lo largo de los años estuvieron asociados a un aumento tanto en el número (NG) como en el peso individual del grano (PG), mientras que en el caso del sorgo no se observó una correlación significativa entre el rendimiento en grano y sus componentes en función del año de liberación (op. cit). Recientemente, un nuevo estudio en EEUU destacó que el sorgo superó en RG al maíz

en condiciones de agua limitada sólo para genotipos antiguos (previos a 1970) y que los genotipos modernos de maíz tienen un dominio sostenido sobre el sorgo atribuido a un mayor progreso genético tanto en biomasa como en el IC (Rotundo, 2024).

Además de la decisión de la especie en la RSC, la elección de la fecha de siembra (FS) es una de las prácticas de manejo agronómico que mayor impacto tienen en la expresión del rendimiento. La fecha de siembra determina las condiciones ambientales a las que las plantas estarán expuestas durante su ciclo de crecimiento (Connor et al., 2011). En las regiones templadas, el atraso en la siembra generalmente expone a los cultivos de verano a niveles de radiación, temperatura y fotoperiodos más altos en las etapas vegetativas y más bajos en el llenado de los granos. Consecuentemente esta estrategia es acompañada por el desplazamiento del período crítico (PC: período en el que se define el NG) y el llenado de los granos hacia ambientes con menor oferta radiactiva, pero también con menor riesgo de déficit hídrico y golpe de calor. El menor riesgo de déficit hídrico de las siembras demoradas se debe a que favorecen una mejor recarga del perfil a la siembra y reduce la demanda ambiental en etapas críticas (Maddonni, 2012; Mercau y Otegui, 2014; Gambin et al., 2016), sin embargo, los resultados esperables de cambios en la época de siembra de estas dos especies no han sido sistémicamente evaluados en la RSC. Por otro lado, en la medida que nos desplazamos a longitudes más altas (e.g. Villa Mercedes) se acorta el período libre de heladas (PLH) y consecuentemente la ventana en la cual es posible realizar el cultivo.

La elección de diferentes fechas de siembra determina el ambiente en el cual un determinado genotipo expresará su potencial de rendimiento cuando no existen restricciones bióticas ni abióticas. En esos casos, el recurso que define el RG es la radiación fotosintéticamente activa (RFA). La producción de biomasa, y por ende el RG, dependerán de la oferta de radiación del ambiente, la eficiencia de interceptación de dicho recurso 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). En condiciones óptimas de crecimiento, la EUR depende fuertemente del tipo de metabolismo fotosintético (en las especies C4 como maíz y sorgo es superior a las C3) y se asocia negativamente con el costo de síntesis de la biomasa producida, según el orden lípidos > proteínas > hidratos de carbono (Loomis y Connor, 1992). Dentro de las especies C4, el maíz tiene valores en el rango de 1.5 a 1.7 g Mj⁻¹, y el sorgo, presenta valores más bajos en el rango de 1.2 a 1.4 g Mj⁻¹. El incremento en la interceptación de RFA y el consecuente aumento en la producción de biomasa se asocian a su vez a un mayor consumo hídrico y de nitrógeno (Andrade et al., 1996).

Bajo condiciones de secano, con un correcto manejo sanitario y nutricional, exploramos el RG potencial limitado por agua (Passioura, 1996). Al considerar dicho recurso, el consumo de agua o evapotranspiración del cultivo (ETc) y la eficiencia en el uso del agua (EUA) determinan la producción de biomasa y el RG. Diferencias entre especies o genotipos dentro de una especie en la capacidad de extracción de agua en

profundidad también afectan la ETc (Dardanelli et al., 1997, 2004). En este sentido, la velocidad de profundización radical es variable entre especies (mayor en latifoliadas como soja y girasol, respecto a gramíneas como maíz y sorgo). Esto es en parte atribuible al enraizamiento contrastante entre sistemas pivotantes y en cabellera, pero la duración del ciclo también explica una parte importante de la distinta capacidad de los cultivos para extraer agua en profundidad, que aumenta a mayor duración (Dardanelli et al., 1997, 2004). Las diferencias entre especies pueden estar asociadas a otros atributos como la arquitectura radical, que varía fuertemente con el ángulo de las raíces (Hammer et al., 2009), o la capacidad de ajuste osmótico (Chimenti et al., 2006). Por otra parte, las características propias de cada perfil de suelo afectan la capacidad de extracción de agua en profundidad. Dardanelli et al. (2004) encontraron que, en el cultivo de soja, la presencia de discontinuidades texturales (i.e., presencia de horizonte Bt en argiudoles) redujo los niveles de extracción de agua por debajo de dicho horizonte en comparación a cultivares de soja creciendo en perfiles sin Bt. Estas respuestas aún no han sido caracterizadas para el cultivo de maíz y sorgo en la región de estudio.

OBJETIVOS

Objetivo General

Comparar ecofisiológicamente la determinación del rendimiento de maíz y sorgo en fechas de siembra contrastantes para la Región Semiárida Central.

Objetivos Específicos

Evaluar el efecto del cambio en la fecha de siembra de maíz y sorgo sobre el rendimiento en grano y sus determinantes ecofisiológicos y numéricos.

Evaluar la eficiencia en el uso de la radiación y del agua en la generación de biomasa para ambas especies y fechas de siembra.

CAPÍTULO 2

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Condiciones experimentales y material vegetal utilizado

Se realizó un experimento a campo en Villa Mercedes (VM, 33° 66' S, 65° 40' O) durante la campaña (2018/2019). En dicho experimento se evaluaron dos cereales estivales, uno de los más difundidos en Argentina (i.e. maíz) y una alternativa (i.e. sorgo) considerada de mejor adaptación a ambientes semiáridos. Simultáneamente, para cada especie se establecieron dos fechas de siembra (FS), temprana (FS1: segunda quincena de Octubre) y tardía (FS2: primera quincena de diciembre). Para maíz y sorgo se utilizaron genotipos comerciales de ciclo adecuado y difundido en la zona circundante a la EEA San Luis (DK 72-10 VT3P y VDH 314, respectivamente). Los genotipos fueron seleccionados por su amplia adaptabilidad y estabilidad ambiental en la región de estudio. Se utilizó un único arreglo espacial (densidad \times espaciamiento entre hileras) para cada especie (5.7 plantas m^{-2} y 16 plantas m^{-2} en maíz y sorgo, respectivamente) en hileras distanciadas a 0.52 m. Estas densidades fueron seleccionadas considerando las recomendadas por los criaderos para cada genotipo. Ambos cereales fueron fertilizados con nitrógeno (N) para evitar limitaciones de este nutriente (200 kg de $N\ ha^{-1}$). Paralelamente se fertilizó con fósforo (30 kg de $P\ ha^{-1}$) a la siembra. Los ensayos fueron conducidos en secano. 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 ambos cultivos.

2.2. Diseño experimental

En cada sitio se utilizó un diseño en parcelas divididas, con la fecha de siembra en la parcela principal y las especies en las subparcelas, con un mínimo de tres repeticiones completamente aleatorizadas. Las parcelas fueron de 10 surcos, distanciados a 52 cm entre hileras. La longitud de las parcelas fue de 11 mts (Fig. 2.1).

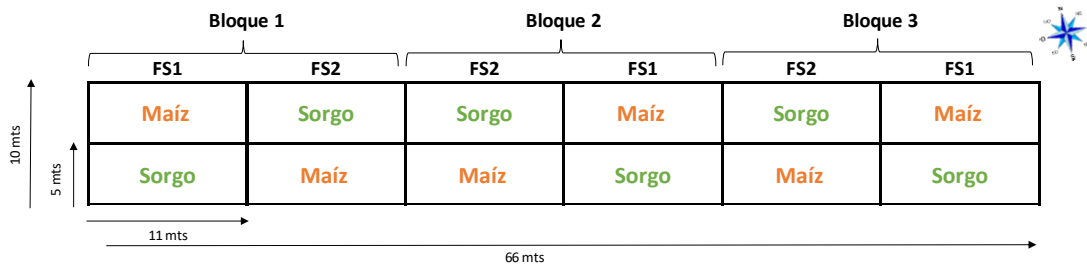


Figura 2.1: Plano de ensayo a campo correspondiente a la campaña agrícola 2018/2019, EEA San Luis.

2.3 Mediciones realizadas

En cada parcela se evaluó la fenología siguiendo las escalas de Ritchie y Hanway (1982) para maíz y de Vanderlip (1993) para sorgo. 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.

Paralelamente, a lo largo del ciclo de los cultivos se efectuaron las siguientes mediciones:

Intercepción de la radiación: se midió semanal a quincenalmente con ceptómetro lineal en días totalmente despejados entre las 11:00 y 14:00 horas, e incluyó una medición por encima del canopy de cada parcela (RFAinc) y el promedio de tres mediciones por debajo de las hojas verdes más bajas de cada parcela (RFAabajo), con el sensor centrado diagonalmente a través de una fila central (Gallo y Daughtry, 1986). Los datos se utilizaron para el cálculo de la $fRFAint$ como en la ecuación 2.1 (Ec.2.1).

$$fRFAint = 1 - RFAabajo/RFAinc \quad (2.1)$$

Los valores diarios de $fRFAint$ se obtuvieron por interpolación lineal y la $RFAint$ diaria (en $Mj m^{-2} día^{-1}$) fue estimada como el producto entre $fRFAint$ y la $RFAinc$. La cantidad total de $RFAint$ durante cada etapa evaluada se estimó como en la Ec.2.2.

$$RFAint = \sum_{inicio\ etapa}^{fin\ etapa} fRFAint \times RFAinc \quad (2.2)$$

Contenido hídrico en el suelo (CHS): Las mediciones de CHS se realizaron cada 20 días gravimétricamente. La evapotranspiración del cultivo (ETc , mm) se calculó como la diferencia entre el contenido hídrico del perfil de suelo hasta 2 m entre mediciones sucesivas de CHS, sumada a las lluvias registradas entre dichos eventos. Los valores se fueron acumulando a lo largo del ciclo.

$$ETc = \sum_{inicio\ etapa}^{fin\ etapa} (\Delta\ agua\ almacenada + lluvias) \quad (2.3)$$

La variación del almacenamiento de agua del suelo (Δ agua almacenada) se obtuvo como la diferencia en el contenido de agua del suelo entre mediciones sucesivas.

Producción de biomasa aérea total del cultivo (BT , en $g m^{-2}$): a través de muestreos destructivos para determinar su evolución en forma acumulada.

Rendimiento en grano (RG , en $g m^{-2}$) y sus componentes, número de granos por m^2 (NG) y peso individual de granos (PG , en mg). Se cosechó el número de plantas presentes en al menos $1 m^2$ de la zona central de cada parcela.

A partir de las mediciones detalladas, se estimó:

Índice de cosecha (IC) como el cociente entre el RG y la BT a madurez fisiológica.

La eficiencia en el uso de la radiación para producir BT (EUR) como el cociente entre BT

y RFAint.

La eficiencia en el uso del agua evapotranspirada para producir BT (EUA) como el cociente entre BT y ETc.

2.4 Análisis de datos

Los datos se procesaron para evaluar los efectos de los tratamientos (Especie y Fecha de siembra) y sus interacciones (Especie x Fecha de siembra) mediante la aplicación del análisis de varianza (ANOVA). Los resultados fueron analizados a través del paquete estadístico InfoStat (Di Renzo et al, 2017).

CAPÍTULO 3

RESULTADOS

3.1. Caracterización climática durante la estación de crecimiento

La campaña analizada correspondió a la fase *El Niño* del fenómeno *El Niño Oscilación del Sur (ENOS)*, aunque la intensidad de la fase fue baja durante los meses de noviembre a marzo. Las precipitaciones desde comienzo de septiembre hasta fin de mayo fueron de 543.5 mm, y fue acompañada por valores de evapotranspiración potencial (ETp) de 1197.7 mm para ese período. Paralelamente, como promedio estacional, la radiación incidente (R inc) y la temperatura media (Tmed) fueron de $19.9 \text{ Mj m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ y 19.1°C (Fig. 3.1 y 3.2).

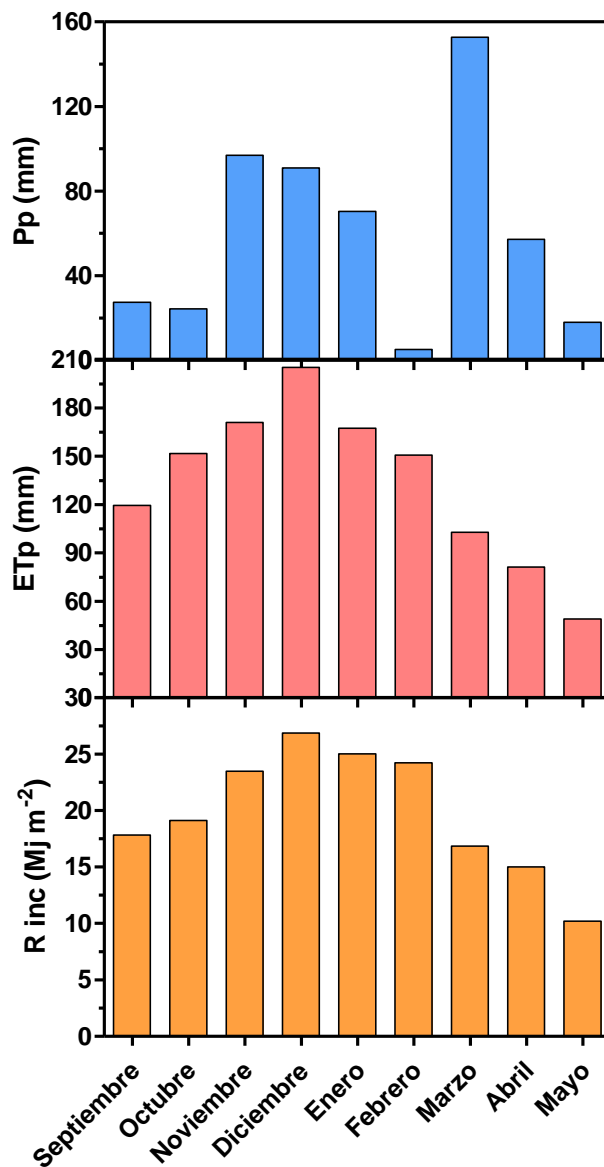


Figura 3.1. Precipitaciones (Pp), Evapotranspiración potencial (ETp) y Radiación solar incidente (R inc) como promedio mensual para el período septiembre-mayo de la campaña 2018/2019.

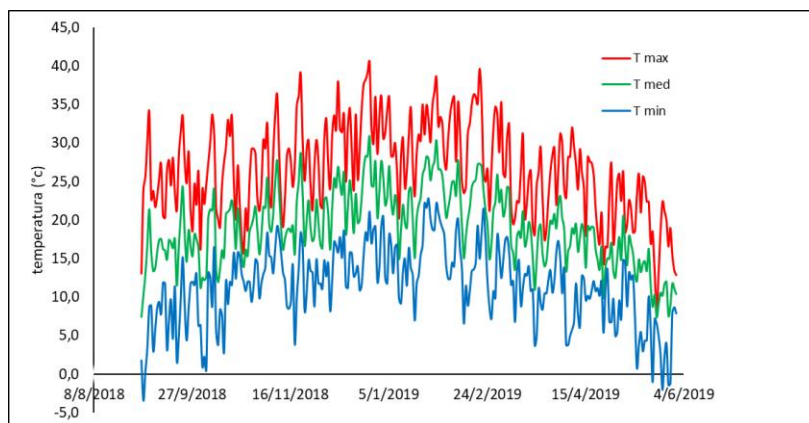


Figura 3.2. Temperaturas máximas, medias y mínimas diarias (en rojo, verde y azul, respectivamente) para el período septiembre-mayo de la campaña 2018/2019.

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

La dinámica de agua en el suelo varió entre las dos especies y fechas de siembra y estuvo influenciada por el régimen hídrico (Fig. 3.3). La disponibilidad de agua inicial en el suelo fue inferior al 50% para ambas fechas de siembra y especies, y sólo superó al 50% de agua útil durante el período crítico para la FS1 de sorgo. En el caso de maíz, el CHS fue inferior al de sorgo para similar fecha de siembra. Si bien se esperaba que el retraso en la fecha de siembra permitiera una mayor recarga en el perfil del suelo, la diferencia a favor de la FS2 prácticamente fue inexistente dado que se trató de una campaña climáticamente atípica. Hacia el final del ciclo (i.e. fines de febrero), se registró un descenso del CHS en todos los tratamientos evaluados, acercándose a su punto de marchitez permanente (punto de humedad mínima en el suelo en el cual una planta no puede continuar extrayendo agua) dado por las escasas precipitaciones ocurridas durante dicho mes. Luego hubo recargas en el mes de marzo que se tradujeron en un incremento en CHS en ambas especies y FS.

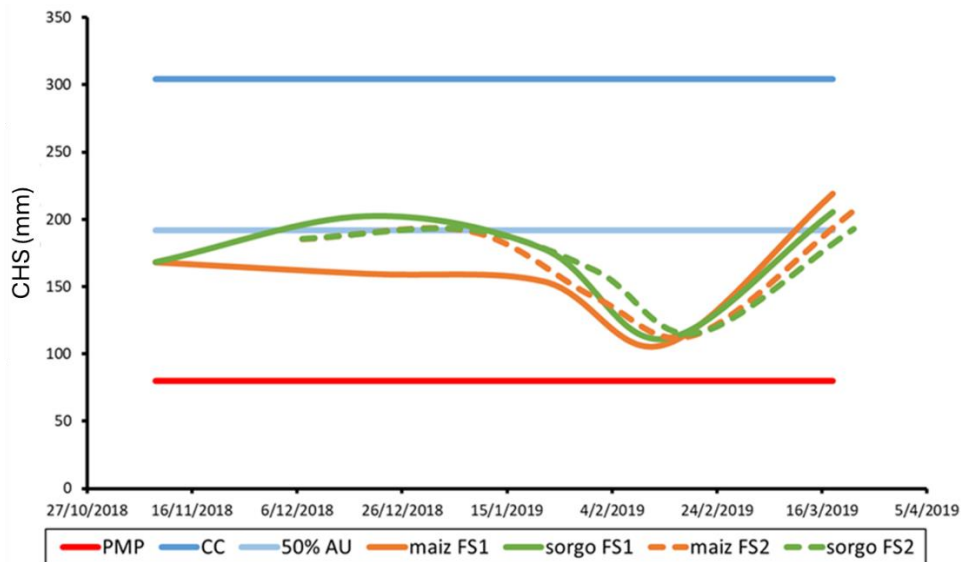


Figura 3.3: Evolución del contenido hídrico en el suelo (mm) hasta 2 m de profundidad a lo largo del ciclo para ambas fechas de siembra en la campaña 2018/19. En la parte media de cada figura se representa el contenido de humedad del suelo para cada cultivo (maíz: anaranjado y sorgo: verde) y fecha de siembra (FS1: líneas continuas y FS2: líneas punteadas). En líneas horizontales continuas se indican los valores de lámina correspondientes a capacidad de campo (azul), 50% agua útil (celeste) y punto de marchitez permanente (rojo).

3.3. COMPONENTES ECOFISIOLÓGICOS Y NUMÉRICOS DEL RENDIMIENTO

3.3.1 Rendimiento en grano y sus determinantes ecofisiológicos

Los ambientes explorados mediante la evaluación de fechas de siembra contrastantes generaron variabilidad en las condiciones de crecimiento que se manifestaron en el rendimiento en grano (RG) y sus determinantes fisiológicos. El rendimiento de maíz superó al de sorgo ($301 > 257.9 \text{ g m}^{-2}$; $P \leq 0.10$; Tabla. 3.1). Al evaluar el comportamiento de cada especie en función a la fecha de siembra se apreciaron respuestas contrastantes (Esp \times FS, $P \leq 0.10$). Por un lado, en el caso de maíz, el retraso de la FS tuvo un efecto positivo sobre el RG ($323.9 > 278.1 \text{ g m}^{-2}$ para la FS2 y FS1, respectivamente), mientras que en sorgo la respuesta fue opuesta ($269.7 > 246 \text{ g m}^{-2}$ para la FS1 y FS2, respectivamente, Fig. 3.4).

Tabla 3.1. Resultados de ANOVA correspondientes al rendimiento en grano (RG) y sus determinantes a lo largo del ciclo.

| Factor de variación | Tratamiento | Variable | | |
|---------------------|-------------|-------------------------|-------------------------|------|
| | | RG (g m ⁻²) | BT (g m ⁻²) | IC |
| Esp | Maíz | 301,0 | 686,9 | 0,44 |
| | Sorgo | 257,9 | 922,3 | 0,28 |
| FS | 1 | 273,9 | 794,9 | 0,36 |
| | 2 | 285,0 | 814,3 | 0,36 |
| Esp x FS | Maíz 1 | 278,1 | 653,2 | 0,42 |
| | Maíz 2 | 323,9 | 720,7 | 0,45 |
| | Sorgo 1 | 269,7 | 936,7 | 0,29 |
| | Sorgo 2 | 246,0 | 908,0 | 0,27 |
| prueba F | Anova | | | |
| | Esp | * | *** | *** |
| | FS | ns | ns | ns |
| | Esp x FS | * | ns | ns |

*, **, *** indican significativo para $P \leq 0.10$, 0.05 y 0.01 , respectivamente y ns indica no significativo.

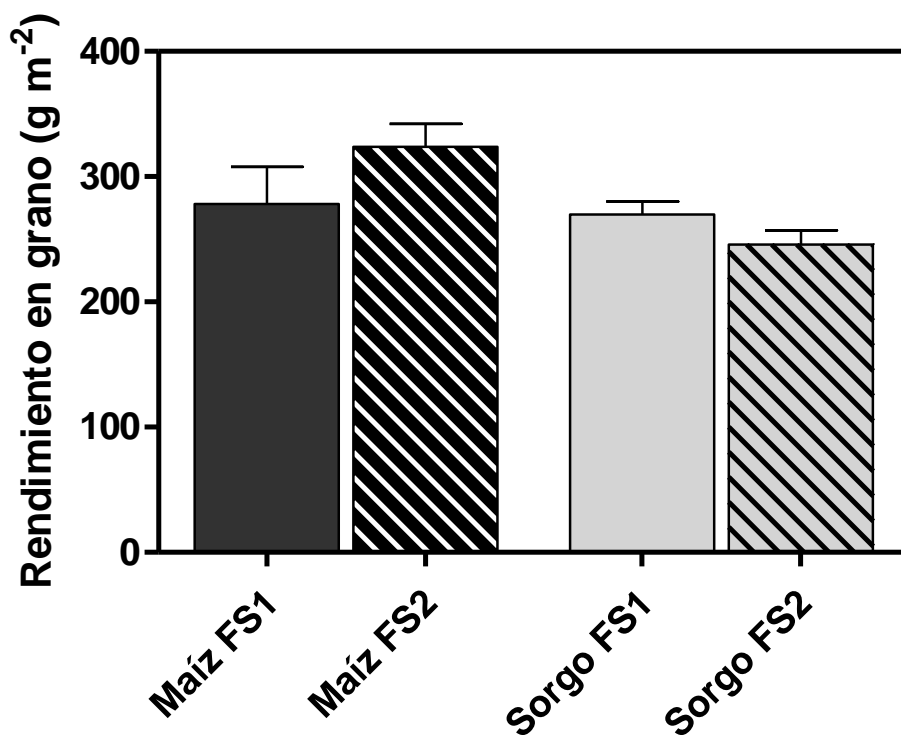


Figura. 3.4: Rendimiento en grano (g m⁻²) de maíz (negro) y sorgo (gris) según la fecha de siembra (las barras sólidas y con barrado en diagonal indican la FS1 y FS2, respectivamente), durante la campaña 2018/2019 en EEA INTA San Luis.

Para ambos cereales las variaciones del RG se explicaron por las variaciones registradas en la BT y también en el IC ($P \leq 0.01$; Tabla. 3.1). La producción de BT no se correspondió con el RG para ambas especies. En este sentido, la BT de sorgo fue superior a la BT de maíz ($922.33 > 686.94$ g m⁻² para sorgo y maíz, respectivamente). Las diferentes tendencias en RG respecto a la BT acumulada durante el ciclo se explicaron a través del índice de cosecha (IC), siendo cerca de un 40% inferior en sorgo respecto a maíz

($0.44 > 0.28$ para maíz y sorgo, respectivamente). En cuanto a la interacción de las especies y las fechas de siembra, no se registró un efecto significativo de ambas variables (i.e. BT e IC) a la hora de explicar las variaciones de RG, sin embargo, se observó una tendencia en el IC ($P=0.11$), denotando la mayor partición de BT hacia las estructuras reproductivas de maíz respecto a sorgo para ambas FS (Fig. 3.5).

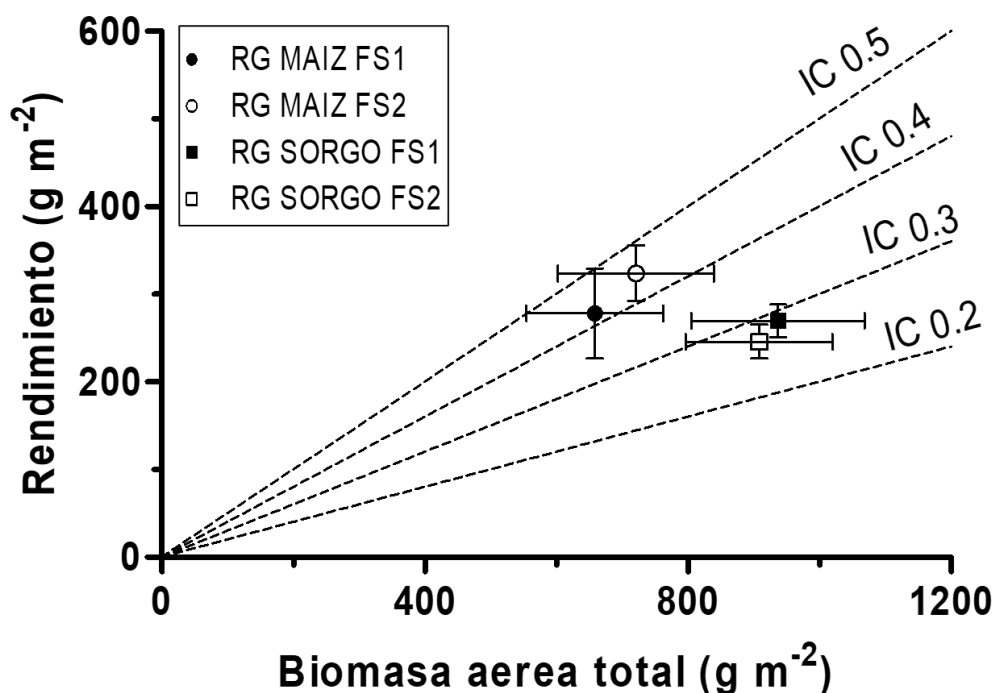


Figura. 3.5: Rendimiento en grano en función de la biomasa aérea total (g m^{-2}) de maíz (círculos) y sorgo (cuadrados) según la fecha de siembra (símbolos llenos y vacíos para la FS1 y 2, respectivamente), durante la campaña 2018/2019 en EEA INTA San Luis. Las líneas discontinuas corresponden a los valores de índice de cosecha de 0.2, 0.3, 0.4 y 0.5. Las líneas verticales y horizontales continuas corresponden al desvío estándar.

3.3.2 Componentes numéricos del rendimiento: Número y peso de los granos

Para ambos cereales, las variaciones del RG al modificar la FS se explicaron por las diferencias registradas en el PG ($P \leq 0.10$). Sin embargo, para el NG, estas variaciones solo fueron significativas en el sorgo ($P \leq 0.10$; Tabla 3.2 y 3.3). En este sentido, en el caso de maíz llamativamente se registró un mayor PG con el retraso en la FS, mientras que en el sorgo la respuesta al atraso en la FS fue la inversa. En cuanto al NG, en sorgo la FS2 superó a la FS1 mientras que en maíz se dio el caso opuesto (Fig. 3.6).

Tabla 3.2. Resultados de ANOVA correspondientes a los componentes numéricos del rendimiento para maíz.

| Factor de variación | Tratamiento | Maíz | |
|---------------------|-------------|--------------------------|------------------------------|
| | | NG (ng m ⁻²) | PG (mg grano ⁻¹) |
| FS | 1 | 1387 | 200,6 |
| | 2 | 1431 | 226,0 |
| prueba F | Anova | | |
| | FS | ns | * |

*, **, *** indican significativo para P ≤ 0.10, 0.05 y 0.01, respectivamente y ns indica no significativo.

Tabla 3.3. Resultados de ANOVA correspondientes a los componentes numéricos del rendimiento para sorgo.

| Factor de variación | Tratamiento | Sorgo | |
|---------------------|-------------|--------------------------|------------------------------|
| | | NG (ng m ⁻²) | PG (mg grano ⁻¹) |
| FS | 1 | 19095 | 14,1 |
| | 2 | 21620 | 11,4 |
| prueba F | Anova | | |
| | FS | * | *** |

*, **, *** indican significativo para P ≤ 0.10, 0.05 y 0.01, respectivamente y ns indica no significativo.

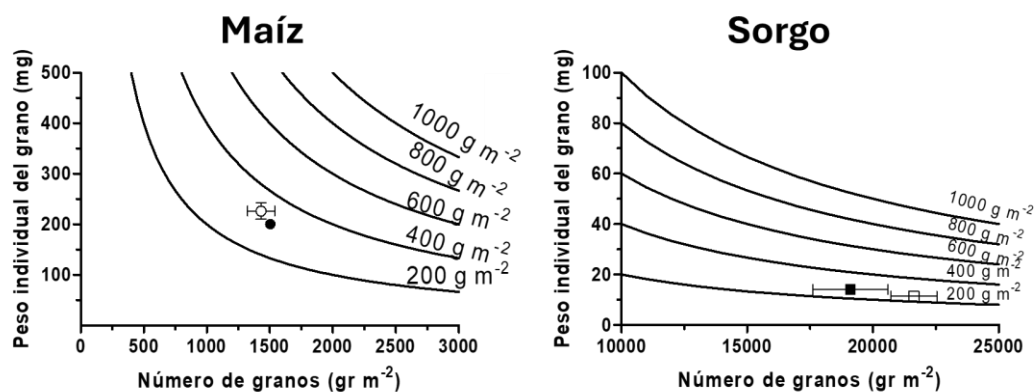


Figura 3.6: Número y peso de los granos de maíz (izq.) y sorgo (der.). En símbolos llenos y vacíos se representa la FS1 y 2, respectivamente. Cada una de las líneas continuas representan una isolínea de rendimiento (200, 400, 600, 800 y 1000 g m⁻²). Las líneas verticales y horizontales continuas corresponden al desvío estándar.

3.4. CAPTURA Y USO DEL AGUA Y DE LA RADIACIÓN

3.4.1. Captura y uso del agua para la generación de la biomasa aérea

La evapotranspiración de ambos cereales no manifestó diferencia significas, si bien la ETc del cultivo de maíz fue superior a la de sorgo (417.57 > 403.77 mm m⁻²; Tabla

3.4). Al examinar el comportamiento de ambas especies en función a la fecha de siembra (promedio de ambas especies) se observaron respuestas marcadas (FS, $P \leq 0.10$). Para el caso del maíz el retraso de la fecha de siembra se tradujo en una menor ETc ($432.50 > 402.64 \text{ mm m}^{-2}$ para la FS1 y FS2 respectivamente), a su vez en el sorgo tuvo el mismo efecto ($418.71 > 388.83 \text{ mm m}^{-2}$ para la FS1 y FS2, respectivamente, Fig. 3.7). Sin embargo, dichas diferencias no fueron estadísticamente significativas.

Por otro lado, la eficiencia en el uso del agua (EUA) del sorgo superó ampliamente a la de maíz ($2.28 > 1.65 \text{ g mm}^{-1} \text{ m}^{-2}$; $P \leq 0.10$; Tabla 3.4). En este caso, la respuesta fue significativa (Esp. $P \leq 0.01$; Fig. 3.7).

Tabla 3.4: Resultados de ANOVA correspondiente a la Evapotranspiración del cultivo (ETc) y en la eficiencia en el uso del agua (EUA).

| Factor de variación | Tratamiento | Variable | | | |
|---------------------|--------------|-------------------------------|---|----------------------------|---|
| | | RFAint (MJ m^{-2}) | EUR ($\text{g MJ}^{-1} \text{ m}^{-2}$) | ETc (mm m^{-2}) | EUA ($\text{g mm}^{-1} \text{ m}^{-2}$) |
| Esp | Maíz | 391,32 | 1,95 | 417,57 | 1,65 |
| | Sorgo | 599,01 | 1,60 | 403,77 | 2,28 |
| FS | 1 | 576,45 | 1,41 | 425,61 | 1,87 |
| | 2 | 413,89 | 2,14 | 395,74 | 2,06 |
| Esp x FS | Maíz 1 | 499,74 | 1,30 | 432,50 | 1,51 |
| | Maíz 2 | 282,91 | 2,59 | 402,64 | 1,79 |
| | Sorgo 1 | 653,16 | 1,51 | 418,71 | 2,24 |
| | Sorgo 2 | 544,87 | 1,68 | 388,83 | 2,33 |
| prueba F | Anova | | | | |
| | Esp | *** | ns | ns | *** |
| | FS | ** | ** | * | ns |
| | Esp x FS | ns | * | ns | ns |

*, **, *** indican significativo para $P \leq 0.10$, 0.05 y 0.01 , respectivamente y ns indica no significativo.

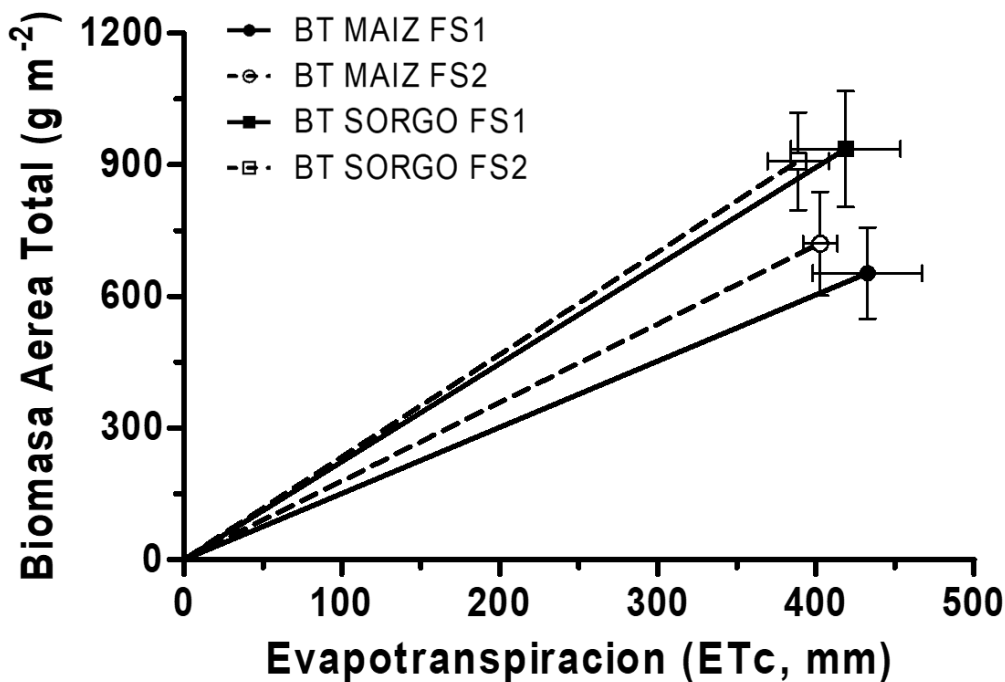


Figura 3.7: Eficiencia en el uso del agua (EUA) de maíz (círculos) y sorgo (cuadrados) como la pendiente generada de la relación entre la Biomasa Aérea Total y la Evapotranspiración de los cultivos (ETc) en dos fechas de siembra contrastantes (FS1: símbolos llenos y FS2: símbolos vacíos). Las líneas verticales y horizontales continuas corresponden al desvío estándar.

3.4.2 Captura y uso de la radiación para la generación de biomasa aérea

La radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAint, $Mj\ m^{-2}$) entre los cultivos evaluados, destacó al sorgo sobre el maíz ($599.01 > 391.32\ MJ\ m^{-2}$). Al evaluar el comportamiento de los cultivos, se detectaron diferencias significativas entre las especies y fechas de siembra (Esp, $P \leq 0.01$ y FS, $P \leq 0.05$; Tabla 3.4).

En el maíz, se observó que, ante un atraso en la fecha de siembra, la RFAint se redujo ($499.74 > 282.91\ MJ\ m^{-2}$, para la FS1 y FS2 respectivamente; Fig. 3.8). En el caso del sorgo se observó el mismo efecto ($653.16 > 544.87\ MJ\ m^{-2}$, para la FS1 y FS2 respectivamente).

Por otra parte, no se detectaron diferencias en la eficiencia en el uso de la radiación (EUR) al comparar ambas especies. Sin embargo, se detectaron diferencias significativas entre ambas FS ($P \leq 0.10$) y en la interacción entra la especie con la FS ($P \leq 0.05$, Tabla 3.4). La EUR fue superior para la FS2 respecto a la FS1 independientemente de la especie mientras que en el caso de la interacción entre ambos factores (Esp x FS), el incremento de la EUR al retrasar la FS se duplicó (de 1.3 a $2.59\ g\ MJ^{-1}\ m^{-2}$) en maíz, distinto de sorgo que aumentó levemente (de 1.51 a $1.68\ g\ MJ^{-1}\ m^{-2}$).

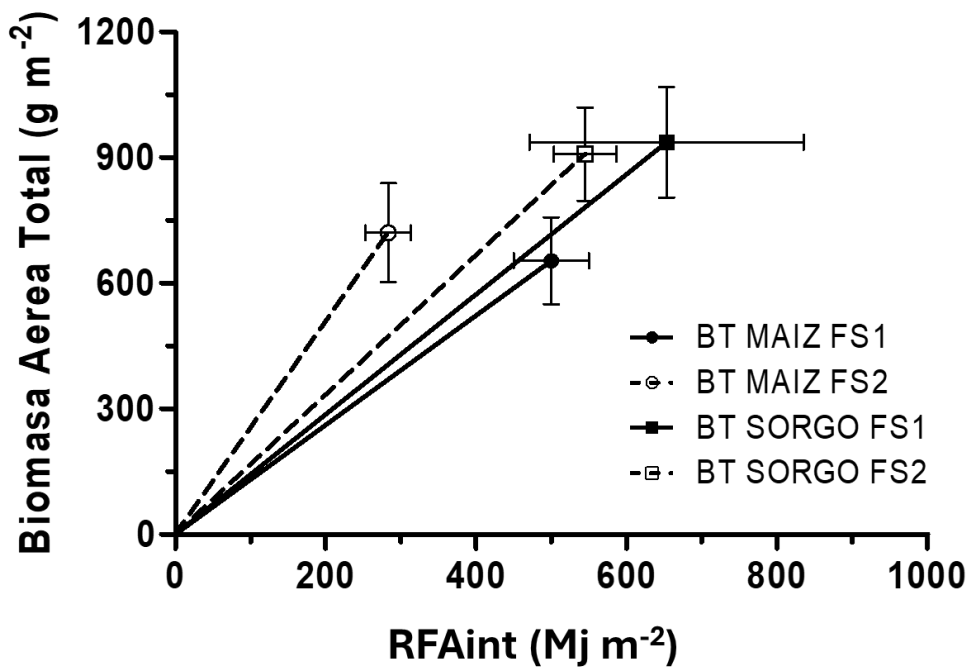


Figura 3.8: Eficiencia en el uso de la radiación (EUR) de maíz (círculos) y sorgo (cuadrados) como la pendiente generada de la relación entre la Biomasa Aérea Total y la radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAint) en dos fechas de siembra contrastantes (FS1: símbolos llenos y FS2: símbolos vacíos). Las líneas verticales y horizontales continuas corresponden al desvío estándar.

CAPÍTULO 4

DISCUSIÓN

En este trabajo se cuantificó la respuesta del RG a sus determinantes ecofisiológicos (BT e IC) y numéricos (NG y PG) de dos especies primavera-estivales (maíz y sorgo) cuando fueron expuestas a variaciones de 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 ambiente tropical árido de Australia (Muchow, 1989a, b) o por déficit hídrico impuesto mediante tratamientos con riego variable (Farré y Faci, 2006), en este estudio se evaluó un ambiente templado de la región semiárida central de Argentina. Las especies de interés se cultivaron en forma simultánea y la variabilidad ambiental se generó por la combinación de dos épocas de siembra contrastantes (temprana y tardía).

A la hora de evaluar la respuesta del RG a la variabilidad ambiental, se destacó el maíz por sobre el sorgo en los ambientes generados en esta tesis. Tras revisar la evidencia científica disponible hasta la fecha, se han encontrado datos coincidentes (i.e. RG Maíz > RG Sorgo) en un rango amplio de condiciones ambientales (Parra et al., 2020; Rotundo et al., 2024). Incluso, la diferencia de RG favorable a maíz respecto de sorgo se maximizó en los ambientes con un balance hídrico más positivo y niveles de N más altos denotando la mayor respuesta de maíz a dichos recursos cuando son limitantes. Esto último, nos indica que incluso ante campañas con una oferta hídrica elevada en la región de estudio, las diferencias interespecíficas sean aún superiores. La principal explicación de esta respuesta diferencial entre especies radica en la hipótesis de trabajo, es decir, el mejoramiento genético ha sido más eficaz en el maíz que en el sorgo. En este sentido, la ganancia genética de rendimiento en grano de maíz en EEUU (estimadas a partir de ensayos en los que se cultivaron genotipos con diferentes años de lanzamiento), son de alrededor de $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, o el $0,8 \text{ \% año}^{-1}$ respecto del rendimiento del híbrido más moderno (Fischer et al., 2014). En Argentina, las ganancias genéticas de rendimiento reportadas oscilan entre 113 y $170 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, o entre $0,85$ y $1,74 \text{ \%}$ (Luque et al., 2006; Borrás y Vitantonio-Mazzini, 2018). En cuanto al sorgo, un estudio reciente en los EEUU indicó un aumento del rendimiento genético del sorgo de $8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, o $0,08 \text{ \% año}^{-1}$ del rendimiento del genotipo más reciente, desde 1960 a 2010. En Argentina, el aumento del rendimiento genético del sorgo fue de $8,7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, o $0,09 \text{ \% año}^{-1}$, para el período 1984-2014 (Gizzi y Gambin, 2016). Estas diferencias significativas entre el maíz y el sorgo en cuanto a ganancia genética de rendimiento y, también en tecnologías de manejo, afectaron marcadamente el área de cada cultivo dado que ambas especies compiten por asignación de área.

En Argentina, desde 1998, la introducción de híbridos genéticamente modificados

(adopción del rasgo Bt; Flores y Parodi, 2011) permitió la expansión del maíz a nuevas áreas y el retrasó de la fecha de siembra (Gambin et al., 2016). Esto ha contribuido paralelamente a la reducción de la superficie cultivada con sorgo. La siembra demorada de maíz es la estrategia de cultivo de verano más difundida en la región de estudio. Al demorar la siembra se favorece una mejor recarga del perfil y se reduce la demanda ambiental en etapas críticas (Maddonni, 2012; Mercou y Otegui, 2014; Gambin et al., 2016). En este sentido, en esta tesis los planteos demorados de maíz generaron un RG superior a aquellos planteos tempranos. Si bien estos mismos principios se cumplen en sorgo, a diferencia de maíz, retrasar la siembra 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 en el desempeño posterior del cultivo (Debaeke et al., 2006).

La diferencia de RG se relacionó directamente con diferencias en la BT y en el IC. Es decir, el efecto del ambiente sobre la acumulación de biomasa y el índice de cosecha varió entre los dos cereales. El maíz se destacó por su capacidad de transformar eficientemente la biomasa producida en rendimiento, lo que lo convierte en una opción eficiente en términos de productividad por unidad de biomasa. En contraste, el sorgo generó notablemente más biomasa que el maíz, pero tuvo una menor eficiencia en la conversión de dicha biomasa en rendimiento. Esta característica del sorgo implica que, a pesar de su capacidad para producir grandes cantidades de biomasa, el rendimiento en grano por unidad de biomasa es menor en comparación con el maíz tanto en ambientes sin limitantes hídricas (Muchow, 1989a) como con limitaciones hídricas (Muchow, 1989b). Estas diferencias son cruciales para la selección de cultivos en función de objetivos específicos, como la maximización del rendimiento económico o la optimización de la eficiencia de uso de recursos.

Durante momentos específicos del ciclo de cultivo, como la floración, la variabilidad ambiental puede influir significativamente en el número de granos fijados, especialmente bajo condiciones de déficit hídrico. En el contexto particular de esta investigación, se observó una diferencia entre el maíz ($NG_{FS1} \approx NG_{FS2}$) y el sorgo ($NG_{FS1} < NG_{FS2}$). Esta discrepancia fue exacerbada por una sequía severa en febrero, la cual afectó negativamente la diferenciación de granos en la segunda fecha de siembra (FS2) del maíz en comparación con la primera fecha (FS1), mientras que el sorgo tuvo un aumento en el número de granos en la FS2. Es probable que la menor extracción de agua por parte del sorgo, en comparación con el maíz, haya contribuido a esta diferencia al mantener una mayor disponibilidad de agua durante períodos sin precipitaciones. Además del número de granos (NG), el rendimiento también está determinado por el peso del grano (PG).

Tanto el maíz como el sorgo mostraron comportamientos diferentes en este aspecto. El maíz, cuando tiene un exceso de fuente (es decir, más asimilados disponibles por grano), no incrementa significativamente su PG debido a una baja eficiencia de removilización, mientras que el sorgo sí lo hace (Borrás et al., 2004). La discrepancia en el PG entre la FS1 y la FS2 del sorgo sugiere que la siembra temprana podría haber proporcionado más asimilados, en contraste con la siembra tardía que tuvo menos asimilados disponibles por grano fijado (Gambín et al., 2006). Tanto el número como el peso de los granos están estrechamente ligados a la disponibilidad de recursos ambientales, especialmente radiación y agua, cuando no hay limitaciones de nutrientes.

En cuanto a la radiación fotosintéticamente activa interceptada, se observaron diferencias significativas entre el sorgo y el maíz, siendo notablemente superior en el sorgo. Esta disparidad se explica principalmente por la mayor duración del ciclo del sorgo en comparación con el maíz, lo que facilita una mayor captura de recursos ambientales. Además, el germoplasma del sorgo exhibe un alto número de macollos, una característica no deseable en el maíz, lo que contribuye a una mayor cobertura foliar. Estos factores probablemente sean los principales determinantes de las discrepancias observadas. Sin embargo, al evaluar la captura de agua, no se detectaron diferencias significativas entre ambas especies (Farré y Faci, 2006). Es posible que el sorgo tenga una menor pérdida de contenido de agua por megajoule de radiación interceptada respecto a maíz.

En cuanto al uso de los recursos, si bien no se registraron diferencias en la ETc, la EUA fue inferior en maíz que en sorgo, similar a estudios previos lo cual señala la mayor BT de sorgo respecto a maíz (Farré y Faci, 2006). De manera similar, Singh y Singh (1995) encontraron una EUA más alta en el sorgo que en el maíz para una amplia gama de tratamientos de riego deficitario. Sin embargo, se ha encontrado un rango muy extendido de valores de EUA tanto para el maíz como para el sorgo en diferentes estudios (Tolk y Howell, 2003; Kang et al., 2003; Karam et al., 2005).

Finalmente, el grado de inversión asimétrico en programas de mejoramiento entre los cultivos podría reflejarse en la eficiencia en el uso de la radiación, donde el maíz ha demostrado superar significativamente al sorgo en esta tesis. La diferencia al retrasar la fecha de siembra, resultó en un incremento de la EUR en ambos cereales, aunque este aumento fue más notable en el maíz que en el sorgo. Esta observación concuerda con la literatura que sugiere una mayor EUR de maíz respecto a sorgo (Sinclair y Muchow, 1999). Sin embargo, es importante destacar que este estudio no profundizó en la conductancia estomática de ambos cultivos, un factor que podría influir en la EUA y, por ende, en la EUR.

CONCLUSIÓN

Hemos sido capaces de extraer una serie de conclusiones a partir de los resultados de este estudio. En primer lugar, considerando la hipótesis de trabajo propuesta, se

demostró que, al utilizar materiales modernos de ambas especies, el maíz tuvo un rendimiento superior al sorgo en ambientes marginales, principalmente debido a una mayor partición de biomasa hacia las estructuras reproductivas. Paralelamente, al comparar ambas fechas de siembra, se observó que en el maíz hubo una disminución del PG al retrasar la época de siembra, sin que se detectaran diferencias significativas en el NG. En el caso del sorgo, al retrasar la fecha de siembra, se incrementó el NG, pero se redujo el PG. En cuanto a la generación de BT, el cultivo de sorgo superó ampliamente al maíz en términos de EUA. Mientras que, en lo referido a la EUR, se duplicó en el maíz al retrasar la fecha de siembra y solo aumentó levemente en el sorgo, lo que denota una notable respuesta del maíz en siembras tardías respecto al sorgo.

Las relaciones establecidas en este estudio constituyen un punto de partida para el desarrollo de futuras investigaciones en regiones menos exploradas, como la RSC. En este sentido, mejorar nuestra capacidad de predicción de la generación del RG de los cultivos bajo un manejo contrastante es esencial para incrementar nuestra comprensión de los factores que determinan el rendimiento y, de este modo, optimizar el manejo de cada especie en la región.

CAPÍTULO 5

BIBLIOGRAFÍA

Andrade FH, Cirilo AG, Uhart SA, Otegui ME (1996) Ecofisiología del cultivo de maíz. Editorial La Barrosa. Dekalb Press. CERBAS-EEA INTA Balcarce. FCA-UNMP. 292 pp

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>

Borrás L, Vitantonio-Mazzini LN (2018) Maize reproductive development and kernel set under limited plant growth environments. *J Exp Bot* 69:3235–3243. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx452>

Chimenti CA, Marcantonio M, Hall AJ (2006) Divergent selection for osmotic adjustment results in improved drought tolerance in maize (*Zea mays* L.) in both early growth and flowering phases. *F Crop Res* 95:305–315. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.04.003>

Connor DJ, Loomis RS, Cassman KG (2011) Crop ecology: Productivity and management in agricultural systems

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 JL, Ritchie JT, Calmon M, et al (2004) An empirical model for root water uptake. *F Crop Res* 87:59–71. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2003.09.008>

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.agsy.2006.01.001>

Di Rienzo JA, Casanoves F, Balzarini MG, et al (2017) InfoStat Versión. URL. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

Echeverría J, Kall G (1990) Las lluvias en Villa Mercedes (SL)

FAO (2024) 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>

Fischer RA, Byerlee D, Edmeades GO (2014) Crop yields and global food security: will yield increase continue to feed the world? Australian Centre for International

Agricultural Research, Canberra. Res Canberra

Flores F, Parodi B (2011) Maíces Bt: manejo de la resistencia de los insectos blanco y nuevos eventos disponibles. EEA Marcos Juárez INTA

Forte Lay J, Scarpati O, Capriolo A (2008) Precipitation variability and soil water content in Pampean Flatlands (Argentina). *Geofísica Internacional*

Gallo KP, Daughtry CST (1986) Techniques for Measuring Intercepted and Absorbed Photosynthetically Active Radiation in Corn Canopies ¹. *Agron J* 78:752–756. <https://doi.org/10.2134/agronj1986.00021962007800040039x>

Gambin 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/10.1016/j.agsy.2016.03.011>

Gizzi G, Gambin BL (2016) Eco-physiological changes in sorghum hybrids released in Argentina over the last 30 years. *F Crop Res* 188. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.01.010>

Peña Zubiarte, C. y D'hiariart, A. (2000). Carta de suelos de la Rep. Argentina. Hoja Villa Mercedes, provincia de San Luis. San Luis: INTA.

Hammer GL, Dong Z, McLean G (2009) Can changes in canopy and/or root system architecture explain historical maize yield trends in the U.S. corn belt? *Crop Science* 49:299–312. <https://doi.org/10.2135/cropsci2008.03.0152>

Kang S, Gu B, Du T, Zhang J (2003) Crop coefficient and ratio of transpiration to evapotranspiration of winter wheat and maize in a semi-humid region. *Agric Water Manag* 59:239–254. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(02\)00150-6](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(02)00150-6)

Karam F, Masaad R, Sfeir T (2005) Evapotranspiration and seed yield of field grown soybean under deficit irrigation conditions. *Agric Water Manag* 75:226–244. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2004.12.015>

Loomis R, Connor D (1992) Productivity and management in agricultural systems. *Crop Ecol* Cambridge University.

Luque SF, Cirilo AG, Otegui ME (2006) Genetic gains in grain yield and related physiological attributes in Argentine maize hybrids. *F Crop Res* 95:383–397. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.04.007>

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>

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>

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*

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)

Orta FJ, Federighi ME (1996) El régimen de heladas en el área de V. Mercedes (San Luis) en relación con cultivos estivales extensivos. *Actas VII Congr Argentino Meteorol y VII Congr Latinoam e Ibérico Meteorol*

Orta FJ, Rojas E (2012) Caracterización y variabilidad de las heladas en Villa Mercedes (San Luis). *IV Reun Argentina Agrometeorol Mendoza Argentina*

Otegui ME, Riglos M, Mercau 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>

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>

Passioura JB (1996) Drought and drought tolerance. *Plant Growth Regul* 20:79–83. <https://doi.org/10.1007/BF00024003>

Ritchie S, Hanway J (1982) How a corn plant develops. Iowa State University of Science and Technology. *Ext Serv Rep Iowa*

Rotundo JL, Salinas A, Gomara N (2024) Maize outyielding sorghum under drought conditions helps explain land use changes in the US. *F Crop Res* 308:109298. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109298>

Saenz C (2009) El riego complementario en relación a la agricultura en el este de San Luis. [researchgate.net](https://www.researchgate.net)

SAGyP (2024) Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca. <https://www.argentina.gob.ar/agricultura-ganaderia-y-pesca>

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)

Singh BR, Singh DP (1995) Agronomic and physiological responses of sorghum, maize and pearl millet to irrigation. *F Crop Res* 42:57–67. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(95\)00025-L](https://doi.org/10.1016/0378-4290(95)00025-L)

Tolk JA, Howell TA (2003) Water use efficiencies of grain sorghum grown in three USA southern Great Plains soils. *Agric Water Manag* 59:97–111

Vanderlip R (1993) How a sorghum plant develops

Viglizzo E, Jobbágy E (2010) Expansión de la frontera agropecuaria en Argentina y su impacto ecológico-ambiental

Yang SY (2018) Trends of World Cereals and Pulses Following the Human Populations. *Biomed J Sci Tech Res* 11:. <https://doi.org/10.26717/BJSTR.2018.11.002098>