



Universidad Nacional del Nordeste

Facultad de Ciencias Agrarias

Maestría en Producción Vegetal

Estudio ecofisiológico de híbridos de maíz (*Zea mays*, L.) tropicales y templados en la región occidental del NEA

Tesis para optar al Título de Magister en Producción Vegetal

Tesista: Ing. Agr. Ricardo Ranea

Director: Ing. Agr. (Ph. D.) Oscar Valentinuz

Codirector: Ing. Agr. (Ph. D.) Alberto Peper

2017

INDICE GENERAL

Dedicatoria.....	III
Agradecimientos	IV
Índice de Tablas	V
Índice de Figuras	VI
Abreviaturas	IX
Resumen.....	XI
Abstract	XII
Introducción	1
Hipótesis	5
Objetivo General.....	5
Objetivos Específicos.....	5
Materiales y Métodos.....	6
Ubicación y Manejo del Experimento	6
Diseño Experimental y Tratamientos.....	6
Variables Medidas y Calculadas	8
1. Caracterización Morfológica y Fenológica	8
2. Área Foliar y Captura de la Radiación	8
3. Crecimiento del Cultivo	9
4. Rendimiento y sus Componentes	9
Análisis Estadístico	10
Resultados.....	11
1. Condiciones Meteorológicas durante el Ciclo de Cultivo.....	11
1.1. Lluvias.....	11
1.2. Temperatura.....	12
1.3. Radiación	13
1.4. Déficit de Presión de Vapor (DPV).....	15
2. Desarrollo del Cultivo	16
Fenología del Cultivo	16
3. Crecimiento y sus Determinantes Ecofisiológicos durante el Período Crítico	17
3.1. Biomasa Aérea.....	19
3.2. Índice de Área Foliar en R1	20
3.3. Porcentaje de Radiación Fotosintéticamente Activa interceptada en Floración.....	21
3.4. Eficiencia de Uso de la Radiación en Período Crítico	22
4. Crecimiento y Rendimiento.....	23

4.1. Tasa de Crecimiento del Cultivo en Periodo Crítico	25
4.2. Tasa de Crecimiento del Cultivo durante Llenado de Granos.....	27
4.3. Rendimiento en Grano	28
4.4. Número de Granos.....	29
4.5. Peso de Granos.....	31
4.6. Índice de Cosecha.....	32
4.7. Relación entre el Rendimiento y sus Componentes	33
5. Asociación entre Componentes de Rendimiento y Determinantes Ecofisiológicos del Crecimiento del Cultivo.....	34
5.1. Análisis de Componentes Principales.....	34
5.2. Análisis Ecofisiológico del Rendimiento.....	35
Discusión	37
Conclusiones.....	42
Bibliografía.....	43

Dedicatoria

*Este trabajo está dedicado a mi esposa Laura,
y mis hijos Agustín y Pía,
quienes resignaron mucho tiempo de sus vidas
para permitirme seguir en este proyecto.*

A mis padres, que me enseñaron a progresar.

Agradecimientos

A Gogui, quien me acompañó en el proyecto y colaboró en las tareas de campo.

A Martin y Juani, por su apoyo para que no baje los brazos.

A todas aquellas personas quienes de una manera u otra colaboraron en este proyecto.

Y especialmente a Alberto y Oscar que a pesar de todos los contratiempos siempre estuvieron a mi lado para enseñarme y ayudarme, alentándome para lograrlo.

Índice de Tablas

Tabla 2. Duración de las etapas emergencia - emisión de estigmas (E-R1) y emisión de estigmas - madurez fisiológica (R1-R6) en híbridos tropicales y templados sembrados en tres fechas de siembra (Diciembre, Enero y Febrero). Datos promedio de tres densidades.....	17
Tabla 3. Efectos de la densidad poblacional y la fecha de siembra sobre la biomasa aérea (BM), Índice de área foliar en R1 (IAF), radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAi) en R1 y eficiencia de uso de radiación (EUR), para dos tipos de germoplasmas (Tropical y Templado).....	18
Tabla 4. Efectos de la densidad poblacional y la fecha de siembra sobre el rendimiento en grano (RTO), número de granos (NG), peso de granos (PG), índice de cosecha (IC), tasa de crecimiento del cultivo durante el período crítico (TCC _{PC}) y durante llenado de granos (TCC _{LL}), para dos tipos de germoplasmas (Tropical y Templado), tres densidades y tres fechas de siembra.....	23
Tabla 5. Coeficientes de correlación de Pearson para las variables Rendimiento (RTO), número de granos (NG), peso de granos (PG), biomasa aérea (BM) e índice de cosecha (IC). En la diagonal superior se observan los valores p de los coeficientes observados en la diagonal inferior.....	34

Índice de Figuras

Figura 1. Esquema representativo de una unidad experimental (UE) compuesta por seis surcos. Los sitios de muestreo se encuentran representados con líneas punteadas y fueron elegidos al azar.....	10
Figura 2. Lluvias y temperaturas mínimas y máximas diarias durante el período Enero-Mayo de la campaña 2007-08 (A) y 2009-10 (B). Las líneas horizontales representan el período crítico ($R1 \pm 15$) para cada fecha de siembra para germoplasma tropical (continuas) y templado (discontinuas). Las Breñas, Chaco, ($26^{\circ}59'58.72''S - 61^{\circ}10'36.67''O$).....	13
Figura 3. Radiación global y temperatura mínima diaria durante el período Enero-Mayo de la campaña 2007-08 (A) y 2009-10 (B). Las líneas horizontales representan el período crítico ($R1 \pm 15$ días) para cada fecha de siembra para germoplasma tropical (continuas) y templado (discontinuas). Las Breñas, Chaco, ($26^{\circ}59'58.72''S - 61^{\circ}10'36.67''O$).	14
Figura 4. Cociente fototermal y temperatura media diaria durante el período Enero-Mayo de la campaña 2007-08 (A) y 2009-10 (B). Las líneas horizontales representan el período crítico ($R1 \pm 15$ días) para cada fecha de siembra para germoplasma tropical (continuas) y templado (punteada). Las Breñas, Chaco, ($26^{\circ}59'58.72''S - 61^{\circ}10'36.67''O$).	15
Figura 5. Déficit de presión de vapor diaria durante el período Enero-Mayo de la campaña 2007-08 (A) y 2009-10 (B). Las líneas horizontales representan el período crítico ($R1 \pm 15$ días) para cada fecha de siembra para germoplasma tropical (continuas) y templado (punteada). Las Breñas, Chaco, ($26^{\circ}59'58.72''S - 61^{\circ}10'36.67''O$).	16
Figura 6. Biomasa aérea en híbridos de germoplasma tropical y templado para tres fechas de siembra en las campañas 2007-08 (A) y 2009-10 (B). Valores promedio de tres densidades de plantas. Barras verticales indican error estándar de la media ($\text{Alfa}=0,05$).	19
Figura 7. Biomasa aérea para tres densidades poblacionales y tres fechas de siembra para las campañas 2007-08 (A) y 2009-10 (B). Valores promedio de dos tipos de germoplasmas. Barras verticales indican error estándar de la media ($\text{Alfa}=0,05$).	20
Figura 8. Índice de área foliar en R1 para tres fechas de siembra y tres densidades poblacionales en las campañas 2007-08 (A) y 2009-10 (B). Valores promedio para cuatro híbridos de maíz correspondientes a dos tipos de germoplasma. Barras verticales indican error estándar de la media ($\text{Alfa}=0,05$).....	21
Figura 9. Índice de área foliar en R1 alcanzado por maíces de germoplasma tropical y templado en tres diferentes fechas de siembra. Valores promedio para dos campañas y tres densidades de siembra. Barras verticales indican error estándar de la media ($\text{Alfa}=0,05$).	21
Figura 10. Porcentaje de radiación interceptada (RFAi) para maíces de germoplasma templado (TEM) y tropical (TRO) sembrados en tres densidades (A) y tres fechas de siembra (B). Valores promedio de dos campañas. Barras verticales indican error estándar de la media ($\text{Alfa}=0,05$).	22
Figura 11. Eficiencia de uso de radiación en maíces de germoplasma templado (A y B) y tropical (C y D) para tres densidades poblacionales y tres fechas de siembra durante las campañas 2007-08 y 2009-10. Barras verticales indican error estándar de la media ($\text{Alfa}=0,05$).	23

- Figura 12. Tasa de crecimiento del cultivo durante el período crítico (TCC_{PC}) para maíces de germoplasma tropical (triángulos) y templado (círculos), para tres densidades poblacionales (4, 6 y 8 plantas m^{-2}) y tres fechas de siembra (Dic, Ene y Feb) durante las campañas 2007-08 (A) y 2009-10 (B). Barras verticales indican error estándar de la media ($\text{Alfa}=0,05$). 25
- Figura 13. Relación entre la eficiencia de uso de la radiación y la tasa de crecimiento del cultivo en período crítico para dos germoplasmas. Valores promedio de tres fechas de siembra, tres densidades de siembra y dos años. 26
- Figura 14. Relación entre el porcentaje de radiación interceptada y la tasa de crecimiento del cultivo en período crítico para tres fechas de siembra. Valores promedio de cuatro híbridos correspondientes a dos germoplasmas, tres densidades de siembra y dos años. 27
- Figura 15. Tasa de crecimiento del cultivo durante llenado de granos en maíces de germoplasma tropical (triángulos) y templado (círculos), para tres fechas de siembra y tres densidades poblacionales durante las campañas 2007-08 (A) y 2009-10 (B). Barras verticales indican error estándar de la media ($\text{Alfa}=0,05$). 28
- Figura 16. Rendimiento en grano de maíces con germoplasma templado y tropical para tres fechas de siembra durante 2007-08 (A) y 2009-10 (B). Barras verticales indican error estándar de la media ($\text{Alfa}=0,05$). 28
- Figura 17. Respuesta del rendimiento en grano ante cambios en la densidad de plantas de maíz para tres fechas de siembra, durante 2007-08 (A) y 2009-10 (B). Valores promedio para dos germoplasmas. Barras verticales indican error estándar de la media ($\text{Alfa}=0,05$). 29
- Figura 18. Número de granos fijados por maíces con germoplasma templado y tropical en tres fechas de siembra durante las campañas 2007-08 (A) y 2009-10 (B). Valores promedio de tres poblaciones de plantas. Barras verticales indican error estándar de la media ($\text{Alfa}=0,05$). 30
- Figura 19. Variaciones en el número de granos (NG) ante cambios en la densidad durante tres fechas de siembra para las campañas 2007-08 (A) y 2009-10 (B). Valores promedio de dos germoplasmas. Barras verticales indican error estándar de la media ($\text{Alfa}=0,05$). 30
- Figura 20. Variación del peso de mil granos (PG) para híbridos de germoplasma tropical y templado para tres fechas de siembra, durante las campañas 2007-08 (A) y 2009-10 (B). Valores promedio de tres densidades de plantas. Barras verticales indican error estándar de la media ($\text{Alfa}=0,05$). 31
- Figura 21. Respuesta en el peso de mil granos ante cambios en la fecha de para tres densidades poblacionales durante las campañas 2007-08 (A) y 2009-10 (B). Valores promedio para dos tipos de germoplasma. Barras verticales indican error estándar de la media ($\text{Alfa}=0,05$). 32
- Figura 22. Valores de índice de cosecha para maíces de germoplasma tropical (TRO) y templado (TEM) para tres fechas de siembra durante las campañas 2007-08 (A) y 2009-10 (B). Valores promedio de tres densidades poblacionales. Barras verticales indican error estándar de la media ($\text{Alfa}=0,05$). 33
- Figura 23. Efecto de la fecha de siembra sobre el índice de cosecha para tres densidades poblacionales durante las campañas 2007-08 (A) y 2009-10 (B). Valores promedio de cuatro híbridos y dos tipos de germoplasma. Barras verticales indican error estándar de la media ($\text{Alfa}=0,05$). 33

- Figura 24. Biplot basado en Análisis de Componentes Principales para las variables rendimiento (RTO), número de granos (NG), peso de granos (PG), biomasa aérea (BM), índice de cosecha (IC), índice de área foliar (IAF), radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAi), eficiencia de uso de radiación (EUR), tasa de crecimiento del cultivo alrededor del período crítico (TCC_{PC}) y tasa de crecimiento del cultivo durante llenado (TCC_{LL}), para dos germoplasmas: Tropical (TRO) y Templado (TEM). Los círculos azules indican las combinaciones de fecha de siembra (FS1: Dic, FS2: Ene, FS3: Feb), densidades (D1: 4 plantas m⁻², D2: 6 plantas m⁻², D3: 8 plantas m⁻²) y germoplasma. Los datos corresponden al promedio de dos experimentos (2007-08 y 2009-10) realizados en Las Breñas, Chaco..... 35
- Figura 25. Ubicación del ciclo del cultivo para maíces de germoplasma tropical (símbolo vacío) y templado (símbolo lleno), para tres fechas de siembra durante las campañas 2007-08 (A) y 2009-10 (B). Los círculos identifican las fechas de siembra, fecha de R1 y madurez fisiológica. Las barras verticales indican precipitaciones mensuales acumuladas, las líneas continuas indican la temperatura media y las líneas discontinuas indica la radiación global diaria incidente por metro cuadrado. Datos promedio mensuales para la localidad de Las Breñas, Chaco, (26°59'58.72"S - 61°10'36.67"O). 36
- Figura 26. Temperatura máxima diaria a partir del 1° de Enero y durante las campañas 2007-08 y 2009-10 para la localidad de Las Breñas (Chaco). Las flechas indican día de R1 para los germoplasmas tropicales (TRO) y templados (TEM) en tres fechas de siembra (Dic, Ene y Feb). Información registrada in situ por estación meteorológica automática marca Davis. 37

Abreviaturas

°Cd	Grados día
ACP	Análisis de componentes principales
ANOVA	Análisis de la varianza
BM	Biomasa aérea total
Cx	Serie suelo Capdevila
Den	Densidad
Dic	Diciembre
DMS	Diferencia media significativa
Ene	Enero
E-R1	Eta etapa emergencia-emisión de estigmas
EUR	Eficiencia de uso de la radiación
Feb	Febrero
Fig.	Figura
FS	Fecha de siembra
g	Gramos
g m⁻² d⁻¹	Gramos por metro cuadrado por día
g m⁻²	Gramos por metro cuadrado
Germ	Germoplasma
IAF	Índice de área foliar
IC	Índice de cosecha
IPAR	Radiación fotosintéticamente activa incidente
kg ha⁻¹	Kilogramos por hectárea
L0	Lecturas sobre el canopeo
L1	Lectura debajo de la última hoja verde del cultivo
MF	Madurez fisiológica
Mj m⁻² d⁻¹	Megajoules por metro cuadrado por día
Mj m⁻²	Megajoules por metro cuadrado
mm	Milímetros
n	Número de días utilizados en el período
NEA	Noreste Argentino
NG	Número de granos
PAR	Radiación fotosintéticamente activa
PG	Peso de granos
plantas m⁻²	Plantas por metro cuadrado
Q	Cociente fototermal
R1	Floración femenina
R1+15	Días posteriores a floración femenina
R1-15	Días previos a floración femenina
R1-R6	Eta etapa emisión de estigmas-madurez fisiológica
RFAi	Radiación fotosintéticamente activa interceptada
RLS	Regresión Lineal Simple
RTO	Rendimiento en grano
Ta	Temperatura media del aire
Tb	Temperatura base
TCC	Tasa de crecimiento del cultivo
TCC_{LL}	Tasa de crecimiento del cultivo durante llenado de granos

TCC_{PC}	Tasa de crecimiento del cultivo en período crítico
TEM	Germoplasma Templado
To	Temperatura óptima
TRO	Germoplasma Tropical
UE	Unidad Experimental
USDA	United States Department of Agriculture

Resumen

La región del NEA ha incrementado su participación en la producción nacional de maíz, pero presenta limitaciones de índole climática para los cultivos. Para producir bajo dichas limitantes se pueden seleccionar distintas prácticas de manejo. El objetivo del trabajo fue determinar el efecto de distintas fechas y densidades de siembra sobre el rendimiento y sus determinantes ecofisiológicos en híbridos de maíz tropicales y templados en la región occidental del NEA. Durante las campañas 2007-08 y 2009-10 se llevaron a cabo experimentos en la localidad de Las Breñas, Chaco. La siembra de los mismos se realizó en seco, sin limitaciones bióticas ni nutricionales. Los tratamientos fueron tres fechas de siembra (Diciembre, Enero y Febrero) tres densidades poblacionales (4, 6 y 8 plantas m⁻²) y cuatro híbridos (dos templados TEM y dos tropicales TRO). Los resultados mostraron que la fecha y la densidad de siembra que permiten maximizar el rendimiento en grano en la región occidental del NEA fue similar para los diferentes híbridos. La fecha de Enero presentó las mayores tasas de crecimiento y los mayores rendimientos, indistintamente del germoplasma seleccionado. Siembras previas y posteriores a Enero lograron menores rendimientos, siendo la magnitud de la reducción mayor en TRO. La densidad de 6 plantas m⁻² fue la que presentó mayores rendimientos; excepto en fechas de Diciembre de la primera campaña donde densidades más altas presentaron mayores rendimientos. No se detectó interacción entre densidad poblacional e híbridos para rendimiento en grano. Los híbridos TRO fueron más eficientes en interceptar la radiación solar, sin embargo, los cultivares TEM expresaron mayores eficiencias en la conversión de radiación en materia seca y partición de materia seca hacia granos, generando mayores rendimientos.

Palabras clave: germoplasma tropical, germoplasma templado, fecha de siembra, densidad, NEA.

Abstract

The NEA region has increased its participation in the national corn production, but it has climatic limitations for the crops. To produce under these constraints, different management practices can be selected. The objective of this work was to determine the effect of different sowing dates and plant densities on yield and their physiological determinants in tropical and temperate corn hybrids growing in the western region of NEA. During 2007-08 and 2009-10 growing seasons, experiments were carried out near to Las Breñas, Chaco. Experiments were conducted under rainfed conditions, without nutritional nor biotic limitations. The treatments were three planting dates (December, January and February), three plant densities (4, 6 and 8 plants m⁻²) and four corn hybrids, two temperate (TEM) and two tropical (TRO). The results showed that January planting date and 6 plants m⁻² maximized grain yield for all hybrids in the western region of the NEA. January sowing date also showed the highest growth rates, regardless the germplasm. Previous and subsequent sowings dates achieved lower grain yield and the magnitude of the reduction was higher in TRO. Plant density of 6 plants m⁻² reached highest grain yield; except for December sowing dates during first season where higher densities showed higher yields. No interaction between density and germplasm was detected for grain yield. TRO hybrids were more efficient intercepting solar radiation, however TEM hybrids had greater efficiencies for converting solar radiation in dry matter and for partitioning dry matter to grains, resulting in higher yields.

Key words: tropical germplasm, temperate germplasm, sowing date, plant density, NEA.

Introducción

El maíz está considerado a nivel mundial como el cereal de mayor producción superando los 1060 millones de toneladas anuales (FAOSTAT, 2018). Argentina es el quinto país productor, con una superficie cultivada de 5,4 millones de hectáreas durante la campaña 2017-2018 y un volumen de producción proyectado de 41 millones de toneladas (Bolsa de Cereales, 2018).

Alrededor del ochenta por ciento de esta producción se cultiva en la región central del país (Buenos Aires, Santa Fe, Córdoba) y el resto se distribuye en regiones consideradas marginales para la producción de maíz. Entre estas se destacan la región noroeste (Tucumán, Salta, Jujuy y oeste de Santiago del Estero), noreste (Formosa, Chaco y este de Santiago del Estero), y Cuyo (San Luis). Desde hace más de una década, dichas regiones han incrementado su participación en la producción de maíz y otros cultivos extensivos, tales como la soja. La producción de maíz en estos ambientes suele presentar mayores limitaciones edafoclimáticas, resultando en rendimientos promedios inferiores.

La región del noreste (NEA) en su sector occidental, oeste de Chaco y este de Santiago del Estero, concentra la mayor superficie agrícola de secano con alrededor de 1,93 millones de hectáreas en producción de las cuales el 30% están ocupadas por el cultivo de maíz (Bolsa de Cereales, 2018). Esta región posee un clima subtropical con estación seca y un régimen monzónico de precipitaciones. Anualmente llueven en promedio 950 mm de los cuales el 74% ocurren en primavera-verano, con isohietas que disminuyen su valor de este a oeste (Cáceres Díaz *et al.*, 2008). La temperatura media anual ronda los 21°C con valores máximos y mínimos anuales promedio de 28,1°C y 14,9°C, respectivamente. En los meses más cálidos del año (Diciembre y Enero) las temperaturas máximas absolutas pueden superar los 40°C. Existe un período libre de heladas agrometeorológicas de 256 días con fechas medias para la primer y última helada del 31 de mayo y 3 de septiembre, respectivamente (EEA INTA Las Breñas, 2009).

En general, la brecha entre los rendimientos obtenidos y los máximos posibles de alcanzar está explicada en gran parte por deficiencias hídricas (Cassman *et al.*, 2003). La ocurrencia de sequías de diferente magnitud, intensidad y momento es la causa principal de la variabilidad interanual de los rendimientos de cultivos de secano en la región pampeana argentina (Totis de Zeljkovich y Rebella, 1980; Hall *et al.*, 1992). En la región centro de Argentina los retrasos en la fecha de siembra a partir de Diciembre se

asocian con disminuciones significativas del rendimiento, en particular a través de la regulación del número de granos (Cantarero *et al.*, 2000).

Las altas temperaturas constituyen una de las limitaciones más importantes para los cultivos en el centro-norte del país, como en las provincias de Santiago del Estero o Chaco. Entre las alternativas propuestas para enfrentar altas temperaturas existen dos estrategias: adelantar las fechas de siembra hacia fines del invierno o atrasarlas en el verano (Otegui y López Pereira, 2003). Las fechas que coinciden con la etapa final del invierno solo serían viables bajo condiciones de riego, considerando que el régimen de lluvias monzónico provocaría serias dificultades hídricas al cultivo fundamentalmente en la etapa de implantación.

La temperatura controla el desarrollo del cultivo de maíz a través de una respuesta positiva lineal dentro de un determinado rango (Ellis *et al.*, 1992; Tollenaar *et al.*, 1979) que se inicia con una temperatura base (T_b) y alcanza valores máximos de desarrollo a la temperatura óptima (T_o). Los rangos de temperaturas óptimas para el cultivo de maíz se encuentran entre los 30°C y 34°C (Tollenaar *et al.*, 1979; Kiniry and Bonhomme, 1991; Cicchino *et al.*, 2010). Dicha respuesta determina la duración de las etapas de desarrollo pudiéndose prolongar o acortar las mismas con la disminución o el aumento de la temperatura.

Las variaciones interanuales y la fecha de siembra son los principales factores que modifican la temperatura a la cual se expone el cultivo. Cirilo y Andrade (1994) encontraron que atrasos en la fecha de siembra en Balcarce (37°45'S; 58°18'W) acortaron el período reproductivo y redujeron la radiación incidente acumulada, resultando en menores rendimientos. De todos modos, las condiciones térmicas de Balcarce son sustancialmente diferentes a las del NEA, por lo cual recientemente se realizaron esfuerzos para evaluar fechas de siembra en esta última región (Romani, 2016). Sin embargo, este trabajo fue realizado en condiciones de riego y estuvo centrado en la comparación entre una fecha muy temprana (Agosto) y una fecha tradicional (Enero) para la región. Adicionalmente Vega (2011) llevó a cabo una revisión de experiencias en el NOA que incluyó la variable fecha de siembra entre otras.

Dado que el maíz responde al fotoperiodo como una especie cuantitativa de días cortos (Kiesselbach, 1950; Rood y Major, 1980), los cambios en la cantidad de horas de luz se traducen en modificaciones en el desarrollo dependiendo de la sensibilidad de cada genotipo (Bonhomme *et al.*, 1991). Dichos autores encontraron que la sensibilidad fotoperiódica generalmente es menor en genotipos templados que en tropicales. Así, siembras posteriores al mes de Diciembre determinarían que el cultivo encuentre días

más cortos resultando en un acortamiento del período vegetativo. De este modo, la elección del germoplasma puede modificar tanto la duración del ciclo como la cobertura lograda por el cultivo.

En ambientes tropicales el estrés producido por factores bióticos y abióticos generalmente es más severo con respecto al de ambientes templados (Edmeades *et al.*, 1996; Paliwal *et al.*, 2001). La fecha de siembra temprana puede incrementar el riesgo de estrés térmico-hídrico durante la floración y el llenado de granos. En general, el cultivo de maíz es más susceptible a cualquier tipo de estrés durante la floración que durante el llenado de granos en zonas templado-cálidas y cálidas (Andrade, 1995). Cuando el estrés ocurre durante llenado de granos, el peso de los granos disminuye y la removilización de las reservas almacenadas en tallos aumenta (Uhart y Andrade, 1991).

La acumulación de biomasa de un cultivo durante un determinado período depende de (i) la cantidad de radiación fotosintéticamente activa incidente en ese período (IPAR), (ii) la capacidad del cultivo para interceptar dicha radiación (RFAi) y, (iii) la eficiencia con que dicha radiación es convertida en materia seca definida como eficiencia de uso de la radiación (EUR) (Andrade *et al.*, 1996). El porcentaje de radiación interceptada está íntimamente relacionado con el número, tamaño y disposición de hojas por unidad de superficie del suelo (IAF). Así el porcentaje de interceptación depende, entre otros factores, del híbrido seleccionado y de la densidad poblacional lograda (Birch *et al.*, 1998). De manera tal que se pueden lograr aumentos en la interceptación de la radiación utilizando diferentes híbridos y/o mayores densidades de plantas por unidad de superficie (Marchaño *et al.*, 2006).

El conocimiento y la aplicación de determinadas prácticas de manejo agronómico (i.e., elección de híbridos, adecuada población de plantas, fechas de siembra óptima) resultan indispensables para que el cultivo de maíz pueda maximizar la captura de recursos y transformarlos eficientemente en granos (Satorre *et al.*, 2003). Por otra parte, el impacto de estas prácticas de manejo sobre el crecimiento y desarrollo de maíz ha sido estudiado principalmente en ambientes templados, existiendo pocos trabajos en ambientes tropicales.

La densidad poblacional tiene un efecto directo sobre la capacidad del canopeo en capturar radiación incidente (eficiencia de interceptación) y puede modificar también la conversión de la radiación en biomasa (Tollenaar y Aguilera, 1992). El aumento en la densidad de plantas puede generar mayor número de granos por unidad de superficie cuando tiende al óptimo (Otegui y Andrade, 2000) lo cual resulta en mayores

rendimientos potenciales. La tolerancia a mayores densidades poblacionales fue una de las herramientas de mejoramiento que permitió en los últimos años incrementar los rendimientos en híbridos tropicales (Elings *et al.*, 1997).

Por su parte, la elección del híbrido cumple un papel determinante tanto en el manejo como en el resultado del cultivo. Dentro de la oferta de cultivares para la región en estudio se encuentran algunos con germoplasma tropical, otros con germoplasma templado y una combinación de ambos. Los actuales híbridos de germoplasma tropical se caracterizan por tener i) una mayor estructura de planta (más altos y con mayor altura de inserción de espiga), ii) mayor tolerancia a enfermedades típicas de zonas tropicales (i.e. *Exserohilum sp.*, *Cercospora sp.*, “corn stunt”), iii) mayor tolerancia a altas temperaturas, iv) menor índice de cosecha y iv) menor capacidad de producción de granos por m² (Aluko y Fischer, 1987; Uhart y Andrade, 1991; Elings *et al.*, 1997; Rattalino Edreira *et al.*, 2011). En tanto que los híbridos templados muestran menor tolerancia a altas temperaturas y enfermedades tropicales. Sin embargo, los genotipos templados toleran mayores densidades, lo que permite fijar mayor número de granos por unidad de tasa de crecimiento de planta llevando esto a rendimientos potenciales superiores (Valentinuz, 1997; Echarte *et al.*, 2000).

En síntesis, períodos de siembra que se extienden durante los meses estivales, densidades de plantas que oscilan entre 40 y 70 mil plantas ha⁻¹, una gran variedad de híbridos y bases de germoplasma disponibles sumado a la escasez de información específica sobre el manejo de estas herramientas, determinan amplias variaciones tanto en el desarrollo como en el crecimiento del cultivo que se traducen en una alta variabilidad en el rendimiento.

Hipótesis

La fecha de siembra que permite maximizar el rendimiento en grano en la región occidental del NEA varía entre germoplasma templado y tropical.

La densidad de plantas que permiten maximizar el rendimiento en grano en la región occidental del NEA varía entre germoplasma templado y tropical.

Existe interacción entre fecha de siembra, densidad poblacional y genotipos para rendimiento en grano.

Objetivo General

Determinar el efecto e interacciones de distintas fechas de siembra, densidades poblacionales y germoplasmas de origen tropical y templado sobre el rendimiento y sus determinantes ecofisiológicos en la región occidental del NEA.

Objetivos Específicos

Determinar el efecto de fechas de siembra, densidades poblacionales e híbridos sobre:

- La duración de las diferentes etapas fenológicas (emergencia, floración, madurez fisiológica).
- El crecimiento del cultivo en función del índice de área foliar (IAF), la eficiencia de intercepción de la radiación (RFAi) y la eficiencia de uso de la radiación (EUR).
- El rendimiento y sus componentes numéricos (peso y número de granos).
- Las relaciones existentes entre el rendimiento y los componentes ecofisiológicos del crecimiento del cultivo.

Materiales y Métodos

Ubicación y Manejo del Experimento

Durante las campañas 2007-08 (A-1) y 2009-10 (A-2) se llevó a cabo un experimento en la localidad de Las Breñas, Chaco, Argentina (26°59'58.72"S - 61°10'36.67"O; 106 msnm) sobre un suelo de la serie Capdevila (Cx) (Ledesma y Zurita, 2004) que posee una textura franco-limosa (Argiustol údico, USDA).

A fin de representar las condiciones ambientales del cultivo en la región NEA, el ensayo se realizó en condiciones de secano y bajo un sistema de labranza cero (siembra directa) con soja como cultivo antecesor, lo cual representa la mayoría de las situaciones de producción de la región.

Previo análisis de suelo y con el objetivo de evitar posibles limitaciones de N y P, todos los tratamientos fueron fertilizados en forma manual al momento de la siembra con 200 kg ha⁻¹ de urea granulada (46-0-0) y 60 kg ha⁻¹ de fosfato diamónico (18-46-0) utilizando como rendimiento objetivo 7000 kg ha⁻¹. Las malezas se controlaron al momento de la siembra con la aplicación de 3 l ha⁻¹ de glifosato en combinación con 1 kg ha⁻¹ de atrazina y, durante el desarrollo del cultivo, en forma manual. El control de insectos se realizó semanalmente a partir de emergencia y hasta etapa reproductiva con la aplicación foliar de 60 cm³ de Spinosad 48%. Se realizaron evaluaciones semanales por presencia de enfermedades foliares y dada la ausencia de presión no fue necesario realizar aplicaciones de fungicidas.

La siembra se ejecutó de forma manual colocando 3 semillas por golpe las cuales se ralearon en V2-V3 (Richie y Hanway, 1982), dejando solo una planta por golpe. Para asegurar una correcta distribución de plantas en el surco, se colocó a lo largo del mismo una soga con marcas en cada una de las posiciones en las que correspondía realizar el golpe de siembra en función de la densidad objetivo. Para facilitar las operaciones de siembra y fertilización se realizó previamente el marcado de los surcos con una sembradora comercial.

Diseño Experimental y Tratamientos

El diseño experimental utilizado fue el de parcelas sub divididas con tres repeticiones, ubicando como parcela principal a la fecha de siembra (FS), como parcela dividida a las densidades (Den) y como sub parcela a los híbridos (Germ). La unidad experimental (UE) estuvo conformada por 6 surcos de 15 metros de largo distanciados a 0,52 metros (Fig. 1).

Los tratamientos fueron una combinación factorial de cuatro híbridos (dos tropicales y dos templados), tres densidades (4, 6 y 8 plantas m^{-2}) y tres fechas de siembra (Diciembre, Enero y Febrero).

La elección de los híbridos se basó en recomendaciones comerciales en términos de adaptabilidad y volumen de adopción en el mercado. Los híbridos elegidos son representativos de los grupos de germoplasma utilizados en la región (tropicales y templados).

El grupo de germoplasma tropical (TRO) incluyó los híbridos DKB390MGRR y DK910MGRR los cuales fueron desarrollados y seleccionados en regiones subtropicales (latitudes inferiores a $30^{\circ}LS$) con adaptabilidad a condiciones de altas temperaturas, tolerancia a patógenos endémicos o de frecuente aparición en dicha región. Por su parte el grupo templado (TEM) incluyó los híbridos DK190MGRR y DK747MGRR desarrollados y seleccionados en regiones templadas (latitudes superiores a los $30^{\circ}LS$) donde la temperatura media es inferior a la región subtropical.

El primer análisis realizado consistió en determinar si los híbridos que conformaban los grupos de germoplasma tropical (TRO) y templado (TEM) tenían comportamientos similares y podían ser considerados en los posteriores análisis como grupo de germoplasma y no como híbridos individuales. A fin de confirmar dicha uniformidad entre grupos, se realizó un análisis de comparación de medias en función al rendimiento como integrador de todas las variables de desarrollo y crecimiento. Dicho análisis exploratorio confirmó la hipótesis previamente establecida donde los híbridos DK190MGRR y DK747MGRR tuvieron rendimientos similares entre sí y a su vez mayor que los híbridos DKB390MGRR y DK910MGRR los cuales no se diferenciaron entre sí (datos no mostrados). A partir de este análisis se empieza a considerar al germoplasma como una variable de clasificación conformando el grupo de híbridos con germoplasma TEM y el de híbridos con germoplasma TRO.

La elección de las densidades se basó en el criterio de explorar respuestas de los híbridos centrando un valor óptimo (6 plantas m^{-2}) en base a la recomendación comercial, a partir del cual se definieron valores sub y supra óptimos (4 y 8 plantas m^{-2} respectivamente).

Con el objetivo de explorar el amplio período de siembra estival que posee la región, se seleccionaron tres fechas de siembra (FS) que pudieran capturar la mayor variación climática posible. Durante el primer año del experimento, las fechas de siembra fueron el 12/12/07; 03/01/08 y 04/02/08. Durante el segundo año las fechas de siembra fueron el 17/12/09; 17/01/10 y 24/02/10.

Variables Medidas y Calculadas

1. Caracterización Morfológica y Fenológica

En base a la escala de Ritchie y Hanway (1982), se determinó la fecha de ocurrencia de los estados fenológicos i) emergencia, ii) floración femenina (R1) y iii) madurez fisiológica (MF).

La emergencia se determinó registrando la fecha en la cual ocurrió la aparición del 50% de las plantas de cada parcela. La floración femenina se determinó sobre el total de plantas emergidas, en donde se identificaron al azar 10 plantas sobre las que se registró la fecha en la que el 50% tenían estigmas visibles. Por último, seleccionando 5 espigas por UE y sacando cada tres días 5 granos de la parte central de la espiga hasta determinar momento de capa negra se obtuvo la fecha de madurez fisiológica (MF).

Diariamente se registró temperatura máxima y mínima media del aire, radiación solar global y precipitación, utilizando una estación meteorológica automática marca Davis modelo Vantage Pro 2 ubicada en el predio donde se llevó a cabo el experimento. Se obtuvo también el cociente fototermal (Q) y el déficit de presión de vapor (DPV) para caracterizar las condiciones de crecimiento. A fin de llevar a cabo una comparación con datos históricos se utilizaron una serie de datos históricos (1938-2011) disponibles correspondientes a la EEA INTA Las Breñas ubicada a 7 km del ensayo.

La radiación PAR se obtuvo de multiplicar la radiación solar global por 0,48 (Blackburn and Proctor, 1983). El tiempo térmico en grados día (°Cd) se obtuvo por medio de la diferencia entre la temperatura media diaria y la temperatura base (10°C) considerada (Tollenaar *et al.*, 1979). Para el cálculo del tiempo térmico se utilizó el modelo de Ritchie y NeSmith (1991):

$$\text{Tiempo Térmico} = \sum^n (T_a - T_b)$$

n es el número de días utilizados en el período

T_a, es la temperatura media del aire

T_b, es la temperatura base para el período considerado (10°C)

2. Área Foliar y Captura de la Radiación

Al momento de R1, se tomaron 5 de las 10 plantas identificadas por cada UE a las cuales se les determinó el largo y ancho de cada una de las hojas verdes y se multiplicó por 0,75 según metodología citada por Montgomery (1911). El índice de área foliar (IAF) se estimó calculando el área foliar por unidad de superficie según metodología propuesta por Watson (1947).

En R1-15 días, R1 y R1+15 días (en adelante R1-15, R1 y R1+15, respectivamente) se realizaron mediciones de intercepción de radiación usando un

ceptómetro (Cavadevices modelo 2009-Dual). Se registraron 5 lecturas por parcela, ubicando la barra en forma perpendicular a los surcos desde el centro del entresurco hacia el centro del entresurco contiguo, tomando lecturas sobre el canopeo (L0) e inmediatamente debajo de la última hoja verde del cultivo (L1). Dichas mediciones se obtuvieron entre las 11:30 y las 13:00hs. Posteriormente se calculó el porcentaje de interceptación $(L0-L1)/L0 \times 100$ (Gallo y Daughtry, 1986). La eficiencia en el uso de la radiación (EUR) fue calculada como el cociente entre la biomasa acumulada y la radiación interceptada acumulada para los períodos comprendidos entre R1-15 y R1+15.

3. Crecimiento del Cultivo

En tres momentos del ciclo del cultivo (R1-15, R1+15 y MF) se midió la biomasa aérea total (BM) producida por las plantas y su partición a grano. En dichos momentos se cortaron al ras del suelo las plantas de los dos surcos centrales por un metro de largo (Fig. 1), separando la espiga (cuando estaba presente) del resto de la planta para ser trilladas. Posteriormente las muestras se secaron en estufa con circulación forzada de aire (70°C) hasta alcanzar un peso constante registrando dichos valores.

Con los valores de BM obtenidos se calculó la tasa de crecimiento del cultivo por unidad de superficie (TCC) definida como el aumento de biomasa aérea durante un período determinado. Las etapas consideradas para dicha determinación fueron el período crítico (TCC_{PC}: entre R1-15 y R1+15) y llenado de granos (TCC_{LL}: entre R1+15 y MF).

4. Rendimiento y sus Componentes

La determinación del rendimiento en grano del cultivo (RTO) se realizó cosechando manualmente las espigas de 6 metros lineales de los dos surcos centrales de cada UE (Fig. 1). Dichas espigas se desgranaron mediante una trilladora estática, para posteriormente determinar la humedad de los granos con un humedímetro (Delver modelo HD-1021-J). El rendimiento final de cada parcela se obtuvo multiplicando el peso de los granos cosechados corregido a base seca y calculando luego el rendimiento por hectárea.

El peso de grano (PG) se obtuvo a partir de contar y pesar 900 granos por cada UE (3 muestras x 300 granos/muestra) secados en estufa con circulación forzada de aire (70°C) hasta peso constante. El número de granos por unidad de superficie (NG) se calculó mediante el cociente entre RTO y PG.

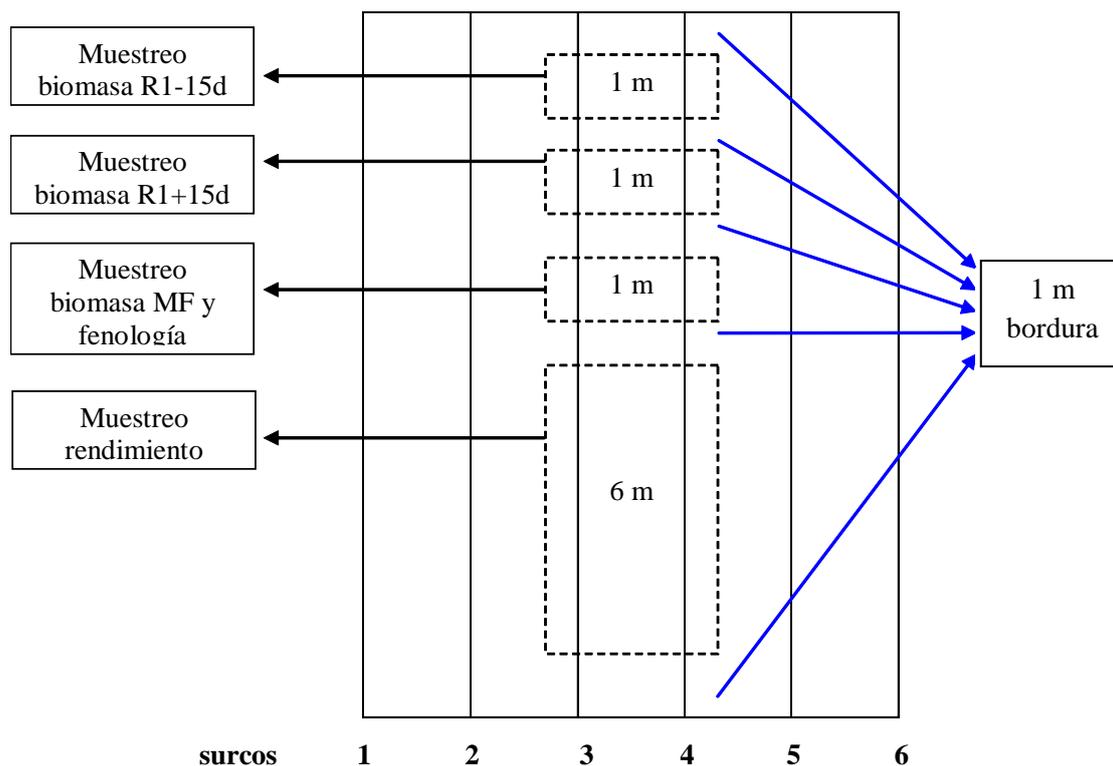


Figura 1. Esquema representativo de una unidad experimental (UE) compuesta por seis surcos. Los sitios de muestreo se encuentran representados con líneas punteadas y fueron elegidos al azar.

Análisis Estadístico

Se realizó análisis de la varianza para las variables de interés considerando el diseño experimental de parcelas sub divididas en bloques completos aleatorizados (Little y Hills, 1979).

Para una determinada campaña, el modelo utilizado fue:

$$Y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha\beta_{ij} + \gamma_k + \alpha\gamma_{ik} + \beta\gamma_{jk} + \alpha\beta\gamma_{ijk} + \tau_l + \alpha\tau_{il} + \beta\tau_{jl} + \gamma\tau_{kl} + \alpha\beta\tau_{ijl} + \beta\gamma\tau_{jkl} + \alpha\beta\gamma\tau_{ijkl} + \varepsilon_{ijkl}$$

Cada rasgo medido (Y_{ijkl}) se puede describir como la media general (μ) más un efecto experimento (α_i), un efecto principal parcela (β_j), un efecto parcela dividida (γ_k), un efecto de sub-parcela (τ_l), las interacciones entre ellos y un término de error (ε_{ijkl}).

Se utilizaron comparaciones múltiples de medias para identificar diferencias entre tratamientos por el método LSD de Fisher con nivel de significancia del 5%. Previamente se comprobó la distribución normal de los residuos y la homogeneidad de varianza de cada variable estudiada para validar los supuestos del ANOVA.

La asociación entre variables fue analizada usando análisis de regresión lineal simple, correlación y componentes principales. El programa informático utilizado fue InfoStat/P versión 2010 (Di Rienzo *et al.*, 2010).

Resultados

1. Condiciones Meteorológicas durante el Ciclo de Cultivo

Los valores mensuales de lluvia, temperatura y radiación registrados durante las campañas en las que se realizó el experimento, así como la media histórica para la localidad de Las Breñas, Chaco se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores mensuales promedio de Lluvia, Temperatura y Radiación Global para la serie histórica (1938-2011) y para las campañas en las que se realizó el experimento (2007-08 y 2009-10). Datos obtenidos de EEA INTA Las Breñas.

Mes	Lluvias (mm)			Temperatura (°C)			Radiación (Mj m ⁻² d ⁻¹)		
	1938-2011	2007-2008	2009-2010	1938-2011	2007-2008	2009-2010	1938-2011	2007-2008	2009-2010
Diciembre	121	203	219	26,1	25,8	26,3	24,0	23,6	20,5
Enero	139	111	191	26,9	27,7	26,8	23,6	22,5	22,9
Febrero	132	77	98	25,8	25,8	27,9	21,4	20,8	20,1
Marzo	127	43	201	23,9	24,3	25,1	17,8	17,4	18,8
Abril	103	13	35	20,1	20,1	19,9	14,0	14,8	14,6
Mayo	38	1	0	17,6	17,8	14,7	11,7	11,7	10,3
Junio	23	5	3	14,8	12,6	14,4	9,3	9,5	8,5
Julio	16	1	6	14,4	19	13,7	10,6	10,6	5,3

1.1. Lluvias

Las lluvias registradas en las dos campañas bajo estudio fueron contrastantes entre sí. Las lluvias entre Diciembre y Julio de la campaña 2007-08 fueron un 35% menor que el promedio histórico, una de las siete campañas con menos lluvias desde 1938. Para idéntico período, las lluvias de la campaña 2009-10 fueron un 7,7% mayor que el promedio histórico (Tabla 1).

La campaña 2007-08, a pesar de haber tenido lluvias muy por debajo de los datos históricos, registró en el mes de Diciembre valores por encima de la media permitiendo disponer de agua en el perfil de suelo para la implantación de la primera fecha de siembra (Fig. 2). Durante Enero el acumulado estuvo por debajo de la media histórica y con una mala distribución. En este sentido, más del 60% del agua caída ocurrió en un solo día (27 Ene), habiendo pasado un mes sin lluvias que superen los 20 milímetros. Las lluvias acumuladas en Febrero estuvieron un 42% por debajo del promedio histórico generando condiciones hídricas deficientes durante floración de los maíces sembrados en Diciembre (Fig. 2). Los meses de Marzo y Abril continuaron mostrando diferencias

negativas respecto del promedio y tuvieron una sola lluvia superior a los 10 mm (28-Mar) en el transcurso de los 60 días considerados.

La campaña 2009-10 transcurrió con tres meses que estuvieron por encima del histórico de acumulación de lluvias (Diciembre, Enero y Marzo) permitiendo la correcta implantación de las dos primeras fechas de siembra. Abril y Mayo fueron los meses de mayor diferencia negativa respecto al histórico y en donde ocurrió una sola lluvia en el término de los 61 días.

1.2. Temperatura

Durante los dos años de estudio la temperatura media fue descendiendo conforme transcurrieron los días calendario, siendo máxima en Enero–Febrero y mínimas en Junio. Las condiciones térmicas de la campaña 2007-08 estuvieron dentro de los valores promedio para la región, permitiendo que la floración de los maíces en las fechas de siembra evaluadas ocurriera con temperaturas máximas diarias en su mayoría por debajo de los 35°C. La excepción estuvo dada por la fecha de siembra de Diciembre cuya floración coincidió con temperaturas superiores a 35°C ocurrido durante dos breves períodos (fin de Enero y principio de Febrero).

En la campaña 2009-10, durante fines de Enero y mediados de Febrero, se registraron temperaturas por encima de 35°C, sobrepasando en algunos casos los 40°C, coincidiendo con el momento de floración de la FS de Diciembre (Fig. 2).

Las temperaturas mínimas tuvieron fuertes oscilaciones en la campaña 2007-08, donde hacia el fin del mes de Mayo se dieron temperaturas muy bajas e inclusive por debajo de 0°C. En la campaña 2009-10 las mínimas fueron levemente superiores, sobre todo durante el mes de Febrero, y luego fueron descendiendo hacia fines de Mayo. Durante esta campaña no se registraron temperaturas inferiores a cero grados (Fig. 2).

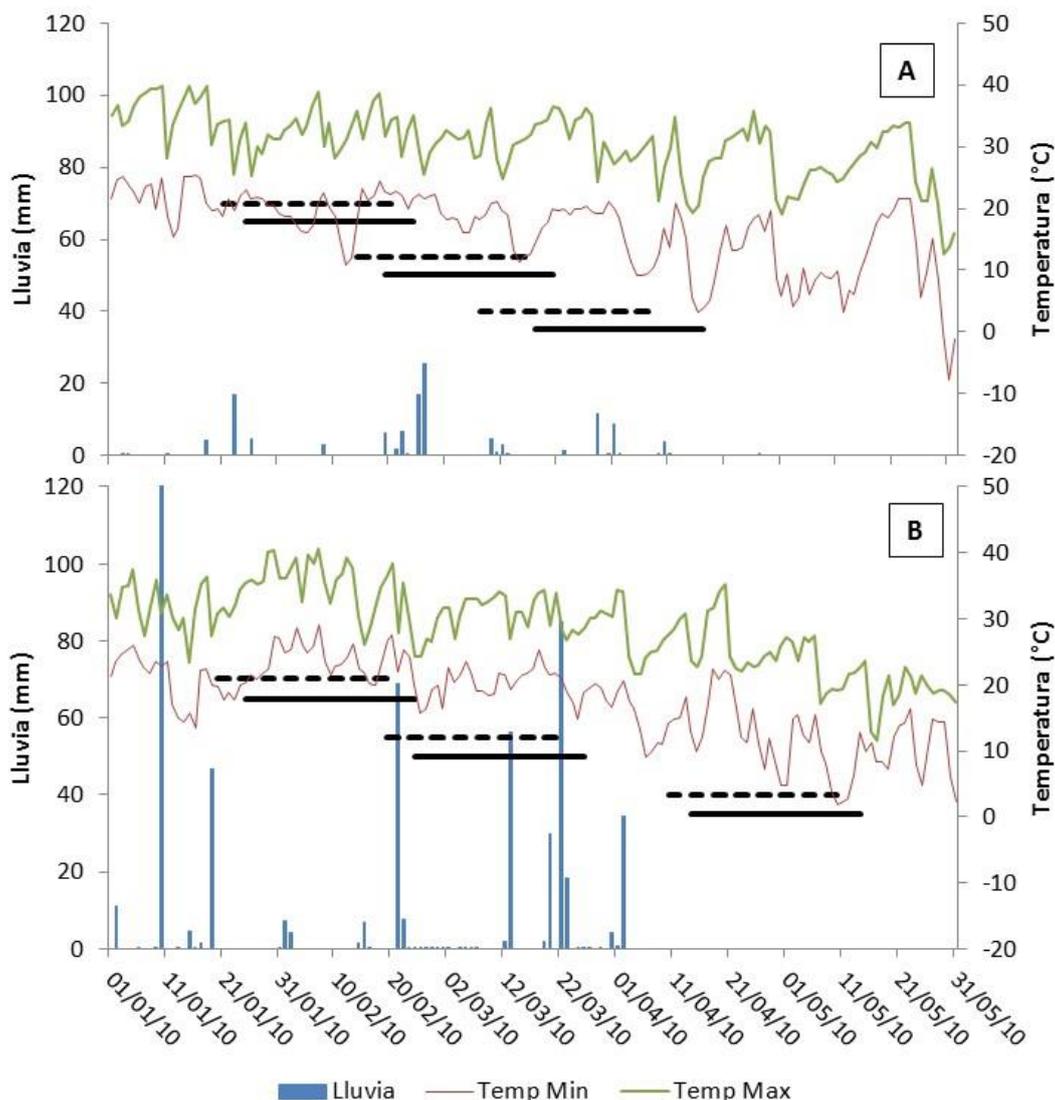


Figura 2. Lluvias y temperaturas mínimas y máximas diarias durante el período Enero-Mayo de la campaña 2007-08 (A) y 2009-10 (B). Las líneas horizontales representan el período crítico ($R1 \pm 15$) para cada fecha de siembra para germoplasma tropical (continuas) y templado (discontinuas). Las Breñas, Chaco, ($26^{\circ}59'58.72''S$ - $61^{\circ}10'36.67''O$).

1.3. Radiación

Las dos campañas evaluadas y las fechas de siembra consideradas permitieron capturar una amplia variación de radiación incidente durante el período del cultivo. Los valores promedio registrados en la primera campaña disminuyeron según avanzó el ciclo del cultivo, variando de $23,6 \text{ Mj m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ promedio diario en Diciembre a $9,5 \text{ Mj m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ en Junio. Durante la segunda campaña el máximo promedio mensual se registró en Enero con $22,9 \text{ Mj m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ y un mínimo en Junio con $8,5 \text{ Mj m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Ambas campañas mostraron valores mensuales muy próximos a los promedios históricos, con excepción de Diciembre y Julio de 2009-10 que mostraron registros inferiores a la media (Tabla 1).

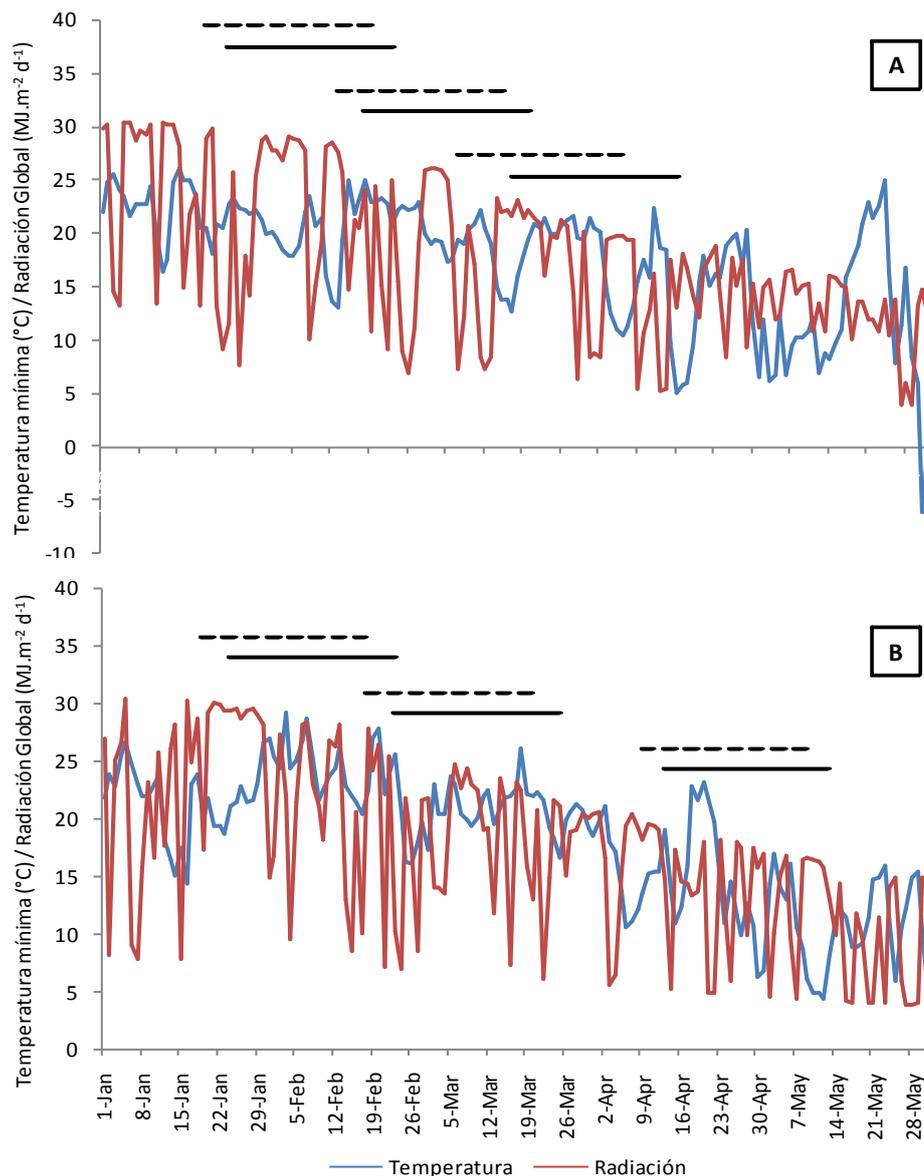


Figura 3. Radiación global y temperatura mínima diaria durante el período Enero-Mayo de la campaña 2007-08 (A) y 2009-10 (B). Las líneas horizontales representan el período crítico ($R1 \pm 15$ días) para cada fecha de siembra para germoplasma tropical (continuas) y templado (discontinuas). Las Breñas, Chaco, ($26^{\circ}59'58.72''S - 61^{\circ}10'36.67''O$).

Los valores del cociente fototermal (Q) durante el período crítico del cultivo fueron comparables para las tres FS en la primera campaña (Dic: 1,2; Ene: 1,1; Feb: 1,2). En la segunda campaña, las dos primeras fechas de siembra tuvieron valores semejantes a la campaña anterior (Dic: 1,1; Ene: 1,1), sin embargo, la siembra de Febrero alcanzó un valor $Q=1,9$ lo cual fue notoriamente superior al resto de las fechas. Este valor de Q se vio influenciado por los menores niveles de temperatura media del ambiente durante ese período (Fig. 4).

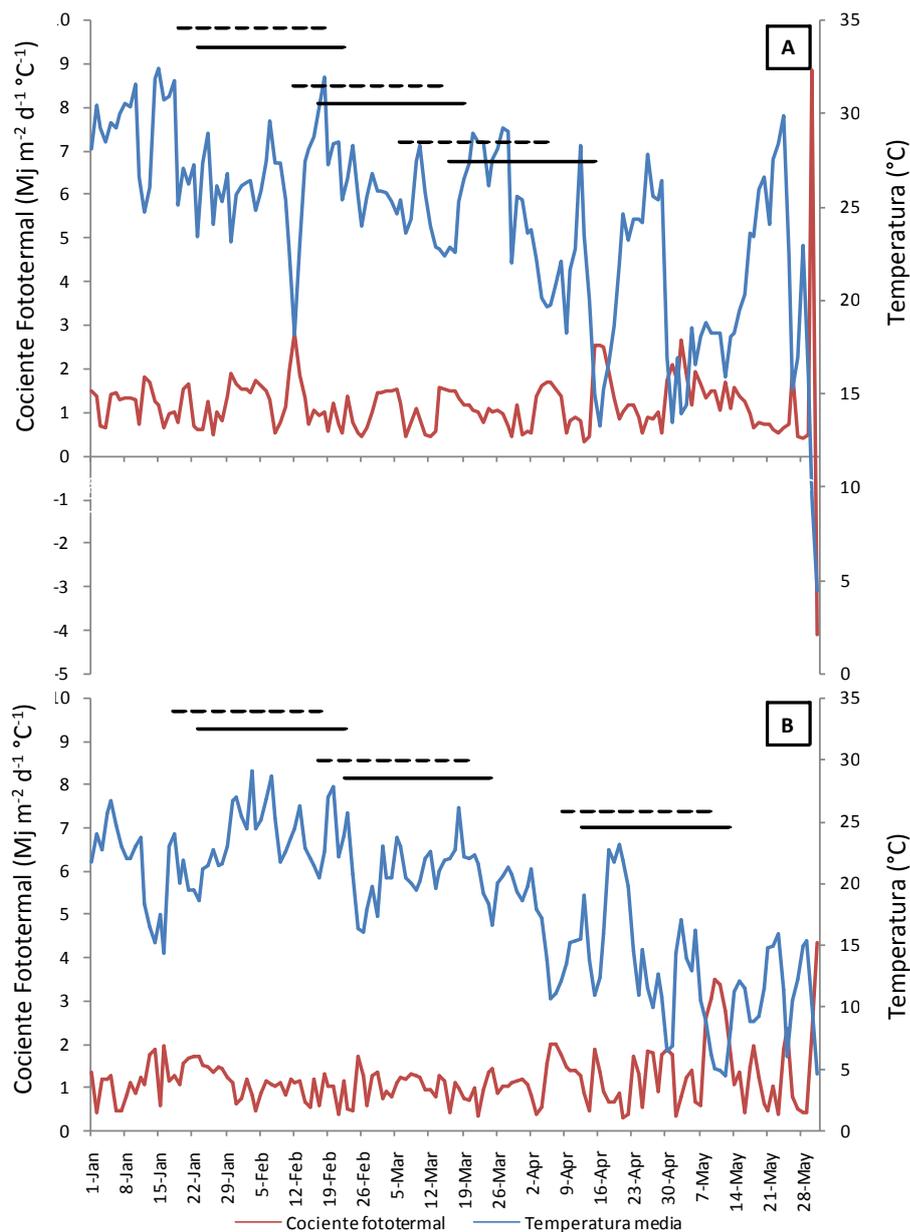


Figura 4. Cociente fototermal y temperatura media diaria durante el período Enero-Mayo de la campaña 2007-08 (A) y 2009-10 (B). Las líneas horizontales representan el período crítico ($R1 \pm 15$ días) para cada fecha de siembra para germoplasma tropical (continuas) y templado (punteada). Las Breñas, Chaco, ($26^{\circ}59'58.72''S - 61^{\circ}10'36.67''O$).

1.4. Déficit de Presión de Vapor (DPV)

En la campaña 2007-08 el déficit de presión de vapor presentó valores elevados durante Enero, Febrero y Marzo que coinciden con los períodos críticos de las distintas fechas de siembra (Fig. 5). En la campaña 2009-10 se registraron elevados valores de déficit de presión de vapor recién hacia fines de Enero, similar a lo ocurrido con las temperaturas máximas, que coincidieron con el período crítico de la fecha de siembra temprana (Fig. 5B).

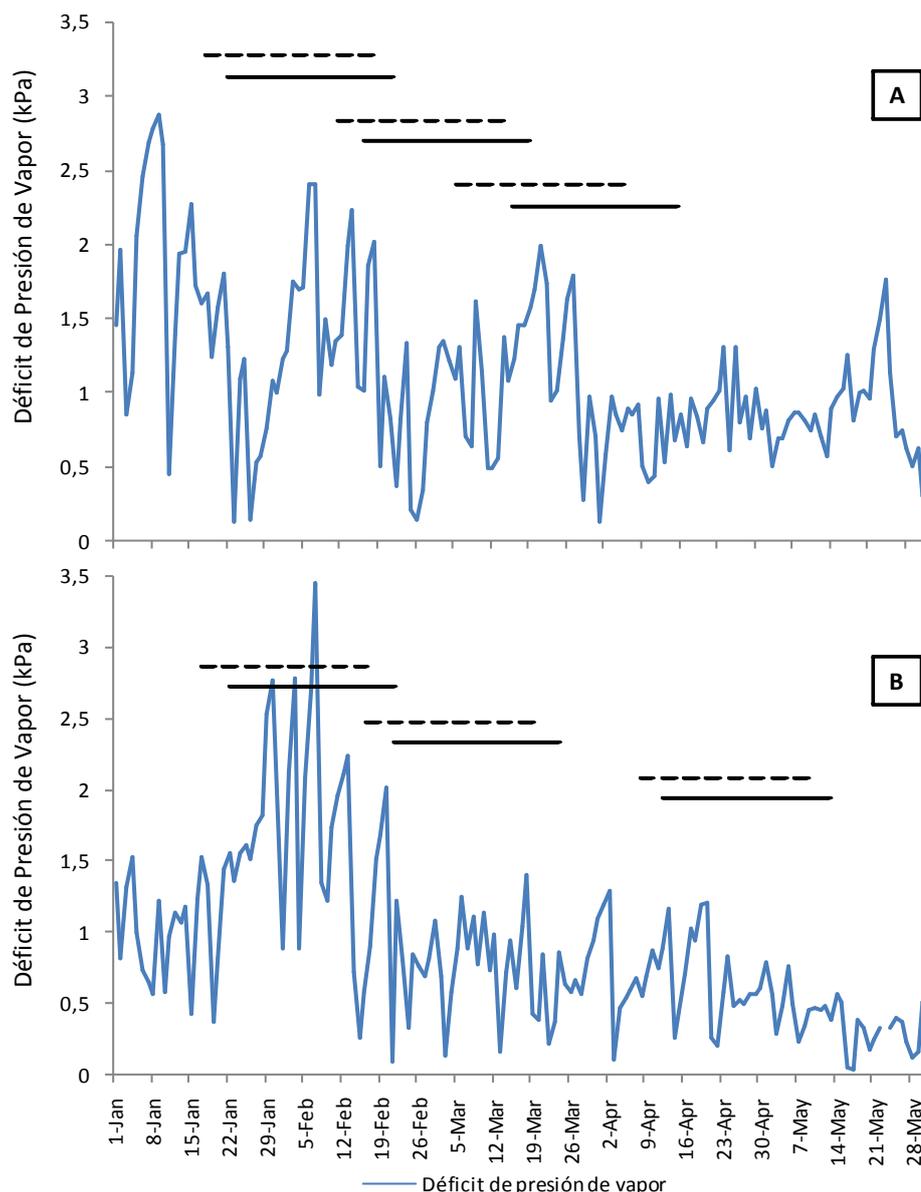


Figura 5. Déficit de presión de vapor diaria durante el período Enero-Mayo de la campaña 2007-08 (A) y 2009-10 (B). Las líneas horizontales representan el período crítico ($R1 \pm 15$ días) para cada fecha de siembra para germoplasma tropical (continuas) y templado (punteada). Las Breñas, Chaco, ($26^{\circ}59'58.72''S - 61^{\circ}10'36.67''O$).

2. Desarrollo del Cultivo

Fenología del Cultivo

La duración en días de las etapas vegetativas (E-R1) y reproductivas (R1-MF) difirieron entre campañas para ambos germoplasmas y en las tres fechas de siembra evaluadas. Promediado a través de las fechas de siembra, la etapa E-R1 tuvo una duración de 53 días en 2007-08 y 49 días en 2009-10, en cambio la etapa R1-MF mostró una situación opuesta teniendo en 2009-10 una mayor duración en días (67 días)

respecto de 2007-08 con 57 días (Tabla 2). Cambios en la densidad de plantas no generaron variaciones en la duración de las etapas fenológicas.

Los híbridos TRO requirieron en ambas campañas una mayor cantidad de días para cumplir las etapas E-R1 y R1-MF respecto de los híbridos templados. Del mismo modo, y considerando las sumas térmicas, la tendencia fue similar donde TRO requirió mayor cantidad de °Cd que TEM para cumplir las etapas del cultivo.

La FS también generó variaciones en la duración de las etapas del cultivo, dándose las mayores diferencias en Febrero respecto de Diciembre y Enero, tanto para TRO como para TEM. De todos modos, cuando se consideró la cantidad de días de duración de las etapas, esta respuesta no marcó una tendencia muy clara dado que en la primera campaña las siembras de Febrero fueron las de menor duración en cambio en 2009-10 fueron las de mayor duración.

Por el contrario, considerando el tiempo térmico como indicador de la duración de las etapas, la tendencia fue más estable entre años mostrando claramente que ambos germoplasmas cumplen sus etapas vegetativas y reproductivas con menor cantidad de tiempo térmico a medida que atrasan las siembras de Diciembre a Febrero (Tabla 2). Esto es más marcado en la etapa reproductiva, dado que es cuando el cultivo está expuesto a temperaturas medias menores, lo cual indicarían que a pesar de incrementar en días la duración del ciclo, no sería suficiente para acumular la suma térmica necesaria para equipararse con el resto de las fechas de siembra.

Tabla 1. Duración de las etapas emergencia - emisión de estigmas (E-R1) y emisión de estigmas - madurez fisiológica (R1-R6) en híbridos tropicales y templados sembrados en tres fechas de siembra (Diciembre, Enero y Febrero). Datos promedio de tres densidades.

	<i>Emergencia - Emisión estigmas</i>				<i>Emisión estigmas - Madurez fisiológica</i>				<i>Emergencia - Madurez fisiológica</i>			
	<i>Días</i>		<i>°C día</i>		<i>Días</i>		<i>°C día</i>		<i>Días</i>		<i>°C día</i>	
	<i>2007/08</i>	<i>2009/10</i>	<i>2007/08</i>	<i>2009/10</i>	<i>2007/08</i>	<i>2009/10</i>	<i>2007/08</i>	<i>2009/10</i>	<i>2007/08</i>	<i>2009/10</i>	<i>2007/08</i>	<i>2009/10</i>
Tropical												
Diciembre	57	48	941	772	56	62	803	978	113	110	1744	1750
Enero	60	47	946	823	55	71	653	698	115	118	1599	1521
Febrero	53	58	772	726	54	78	520	385	107	136	1292	1111
<i>Promedio</i>	<i>57</i>	<i>51</i>	<i>886</i>	<i>774</i>	<i>55</i>	<i>70</i>	<i>659</i>	<i>687</i>	<i>112</i>	<i>121</i>	<i>1545</i>	<i>1461</i>
Templado												
Diciembre	53	44	882	720	53	62	796	1002	106	106	1678	1722
Enero	54	43	845	767	52	64	633	727	106	107	1478	1494
Febrero	43	54	609	694	48	67	487	317	91	121	1096	1011
<i>Promedio</i>	<i>50</i>	<i>47</i>	<i>779</i>	<i>727</i>	<i>51</i>	<i>64</i>	<i>639</i>	<i>682</i>	<i>101</i>	<i>111</i>	<i>1418</i>	<i>1409</i>

3. Crecimiento y sus Determinantes Ecofisiológicos durante el Período Crítico

Los valores promedio para las principales variables asociadas al crecimiento se muestran en la Tabla 3.

Tabla 2. Efectos de la densidad poblacional y la fecha de siembra sobre la biomasa aérea (BM), Índice de área foliar en R1 (IAF), radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFA_i) en R1 y eficiencia de uso de radiación (EUR), para dos tipos de germoplasmas (Tropical y Templado).

Año	Germoplasma	Fecha de Siembra	Densidad	BM (g m ⁻²)	IAF	RFA _i (%)	EUR (g MJ ⁻¹)
A-1	Tropical (TRO)	Diciembre	4 pl m ⁻²	1033	2,4	52	2,27
			6 pl m ⁻²	1482	3,5	66	2,87
			8 pl m ⁻²	1546	4,3	84	2,83
		Enero	4 pl m ⁻²	1239	2,4	56	4,72
			6 pl m ⁻²	1573	3,6	74	4,67
			8 pl m ⁻²	1792	4,2	84	4,15
		Febrero	4 pl m ⁻²	751	2,2	52	2,70
			6 pl m ⁻²	977	3,0	70	2,90
			8 pl m ⁻²	1076	4,1	77	3,32
	Templado (TEM)	Diciembre	4 pl m ⁻²	1164	2,1	53	3,47
			6 pl m ⁻²	1445	3,2	63	3,57
			8 pl m ⁻²	1434	4,0	75	3,07
		Enero	4 pl m ⁻²	1182	2,1	52	4,08
			6 pl m ⁻²	1614	2,8	64	4,45
			8 pl m ⁻²	1799	3,5	72	4,35
		Febrero	4 pl m ⁻²	886	1,9	46	2,93
			6 pl m ⁻²	910	2,9	70	2,82
			8 pl m ⁻²	1279	4,1	69	2,98
A-2	Tropical (TRO)	Diciembre	4 pl m ⁻²	1066	2,4	53	1,83
			6 pl m ⁻²	1376	3,6	66	1,28
			8 pl m ⁻²	1354	4,5	83	1,28
		Enero	4 pl m ⁻²	1326	2,6	55	4,48
			6 pl m ⁻²	1930	3,6	73	3,63
			8 pl m ⁻²	1907	4,9	83	3,53
		Febrero	4 pl m ⁻²	592	1,6	45	2,85
			6 pl m ⁻²	822	2,6	56	3,77
			8 pl m ⁻²	1034	2,7	86	3,40
	Templado (TEM)	Diciembre	4 pl m ⁻²	1184	2,2	51	2,12
			6 pl m ⁻²	1163	3,1	66	1,88
			8 pl m ⁻²	1486	3,8	75	1,88
		Enero	4 pl m ⁻²	1295	2,3	53	4,20
			6 pl m ⁻²	1935	3,4	64	4,05
			8 pl m ⁻²	1874	4,4	76	3,62
		Febrero	4 pl m ⁻²	666	1,5	47	3,20
			6 pl m ⁻²	845	1,5	60	3,75
			8 pl m ⁻²	1035	2,3	86	3,17
VALORES PROMEDIO							
A-1				1291	3,1	65	3,45
A-2				1271	2,9	65	3,00
	Tropical			1270	3,2	67	3,14
	Templado			1292	2,8	63	3,31
		Diciembre		1310	3,3	66	2,36
		Enero		1627	3,3	67	4,16
		Febrero		906	2,5	63	3,15
			4 pl m ⁻²	1032	2,1	51	3,24
			6 pl m ⁻²	1343	3,1	65	3,30
			8 pl m ⁻²	1468	3,9	79	3,13
ANOVA							
Año				ns	**	ns	***
Germoplasma (Germ)				ns	***	***	***
Densidad (Den)				***	***	***	**
Fecha Siembra (FS)				***	***	**	***
Año*Germ				ns	ns	**	ns
Año*Den				ns	ns	***	**
Año*FS				***	***	ns	***
Germ*Den				ns	ns	***	ns
Germ*FS				ns	ns	***	***
Den*FS				***	ns	***	***
Año*Germ*Den				ns	ns	ns	ns
Año*Germ*FS				ns	ns	ns	ns
Año*Den*FS				***	***	***	***
Germ*Den*FS				**	ns	*	***
Año*Germ*Den*FS				**	ns	ns	*

*Significativo al $P \leq 0.05$; ** Significativo al $P \leq 0.01$; *** Significativo al $P \leq 0.001$; ns: no significativo

3.1. Biomasa Aérea

La producción de biomasa aérea por unidad de superficie (BM) en madurez fisiológica presentó interacción Año*Germ*Den*FS ($p=0,004$). La biomasa fue similar entre campañas ($p=0,70$), alcanzando un total de 1281 g m^{-2} en promedio para todos los tratamientos. Solo se observó que TRO presentó menor biomasa que TEM ($p=0,046$) en la fecha tardía y alta densidad sólo en la primera campaña.

El tipo de germoplasma determinó las menores variaciones en BM con valores que oscilaron entre 1270 y 1292 g m^{-2} (1,7% de variación). La FS fue la variable de mayor influencia sobre BM la cual determinó valores entre 906 y 1627 g m^{-2} (79,6% de variación). Por último, cambios en Den determinaron variaciones de BM que oscilaron entre 1032 y 1468 g m^{-2} (42,2% de variación, Tabla 3).

Ambos germoplasmas alcanzaron la BM máxima durante la FS de Enero (Fig. 6). Además, existió una interacción triple significativa entre Año*Den*FS ($p=0,019$). Si bien la BM aumentó con el incremento en la densidad ($4\text{pl m}^{-2} < 6\text{pl m}^{-2} < 8\text{pl m}^{-2}$), la magnitud del incremento fue diferente en cada FS (Fig. 7).

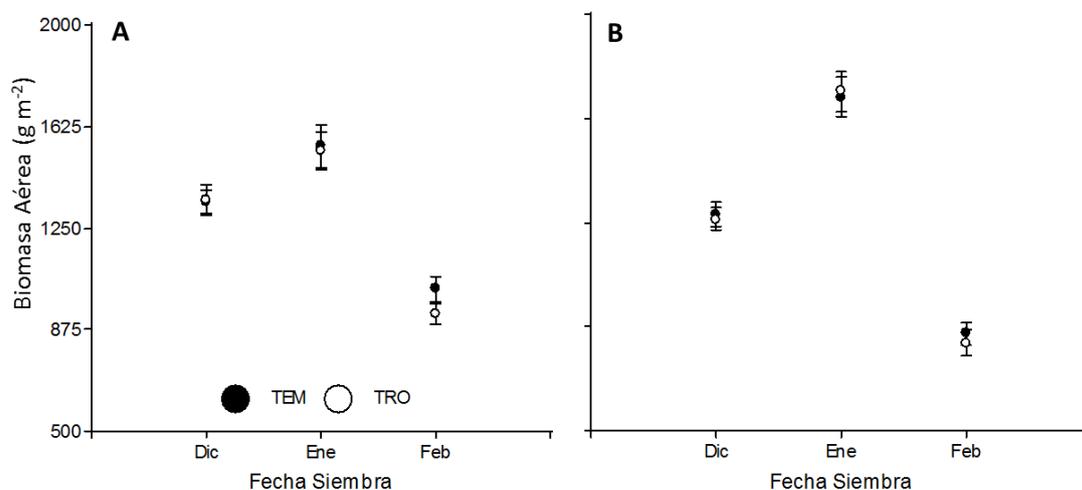


Figura 6. Biomasa aérea en híbridos de germoplasma tropical y templado para tres fechas de siembra en las campañas 2007-08 (A) y 2009-10 (B). Valores promedio de tres densidades de plantas. Barras verticales indican error estándar de la media (Alfa=0,05).

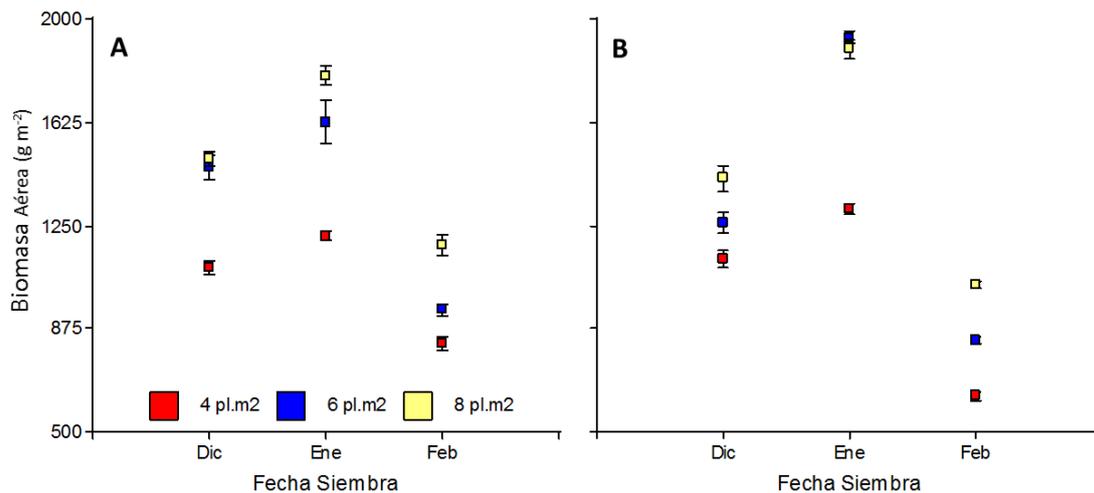


Figura 7. Biomasa aérea para tres densidades poblacionales y tres fechas de siembra para las campañas 2007-08 (A) y 2009-10 (B). Valores promedio de dos tipos de germoplasmas. Barras verticales indican error estándar de la media (Alfa=0,05).

3.2. Índice de Área Foliar

El índice de área foliar (IAF) en R1 presentó una interacción significativa Año*Den*FS ($p \leq 0,0001$). Dicha interacción estuvo explicada principalmente por cambios de magnitud en los niveles de IAF ante cambios en densidad dado que, en ambos años, y para todas las FS, los valores de IAF crecieron con el aumento de la densidad (Fig. 8). Además, el IAF fue alterado por el germoplasma ($p \leq 0,0001$) que no difirió entre campañas, fechas o densidades (Fig. 9). La fecha de siembra generó modificaciones significativas durante las campañas de ensayo (Año*FS, $p \leq 0,0001$), las cuales fueron leves en 2007-08 (3,3; 3,1 y 3,1 para Dic, Ene y Feb, respectivamente), y mayores durante 2009-10 como resultado de una importante reducción en el IAF de Feb (Tabla 3).

La densidad fue la práctica de manejo que mayores variaciones generó en el IAF durante ambas campañas ($p \leq 0,0001$). Durante 2007-08 se alcanzaron valores de 2,2; 3,2 y 4 para 4, 6 y 8 plantas m⁻², respectivamente (85,3% de variación), y durante 2009-10 se alcanzaron valores de 2,1; 3 y 3,8 para 4, 6 y 8 plantas m⁻², respectivamente (80,4% de variación), mostrando una tendencia general al aumento del IAF a medida que aumentó Den.

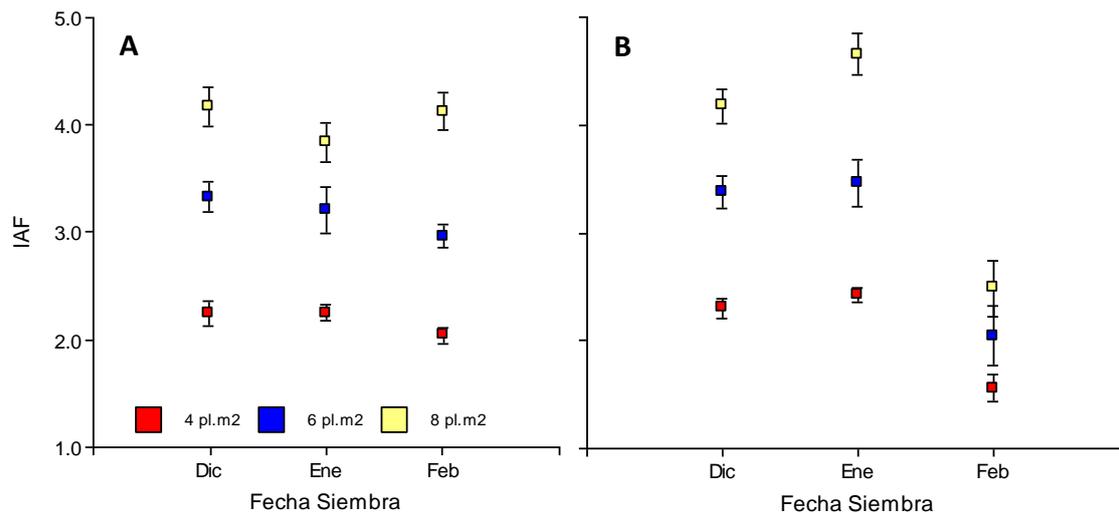


Figura 8. Índice de área foliar en R1 para tres fechas de siembra y tres densidades poblacionales en las campañas 2007-08 (A) y 2009-10 (B). Valores promedio para cuatro híbridos de maíz correspondientes a dos tipos de germoplasma. Barras verticales indican error estándar de la media (Alfa=0,05).

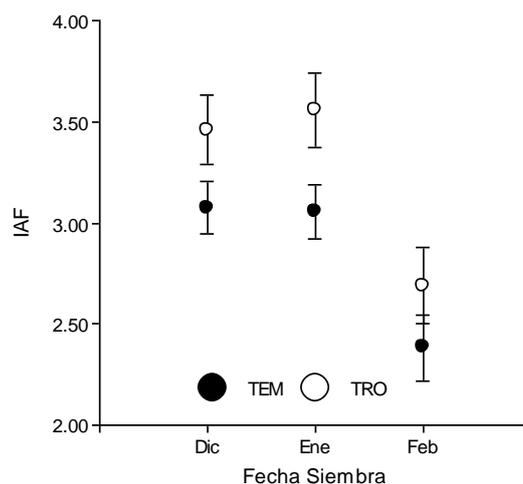


Figura 9. Índice de área foliar en R1 alcanzado por maíces de germoplasma tropical y templado en tres diferentes fechas de siembra. Valores promedio para dos campañas y tres densidades de siembra. Barras verticales indican error estándar de la media (Alfa=0,05).

3.3. Porcentaje de Radiación Fotosintéticamente Activa interceptada en Floración

El porcentaje de intercepción de radiación incidente (RFAi) al momento de floración femenina presentó interacción Germ*Den*FS ($p=0,0264$). Esta interacción mostró que durante las siembras de Enero, TRO interceptó mayores porcentajes de radiación que TEM en todas las densidades, en cambio cuando se atrasó o adelantó la siembra, estas diferencias fueron mínimas, exceptuando siembras de Diciembre con densidades de 8 plantas m⁻² donde TRO mantuvo mayor intercepción que TEM (Tabla 3). Además, hubo una interacción significativa Año*Den*FS ($p\leq 0,0001$).

Los valores de RFAi alcanzados fueron similares entre campañas ($p=0,98$), llegando en promedio para todos los tratamientos a un 65% de intercepción. El uso de germoplasma tropical incrementó la RFAi en un 4% respecto de templado para el promedio de años y tratamientos (Tabla 3). Esta diferencia fue significativamente mayor sobre todo en altas densidades con valores en TRO de 83% y en TEM de 75% ($p\leq 0,0001$), y en FS óptima con valores en TRO de 71% y en TEM de 63% ($p=0,0053$). (Fig. 10).

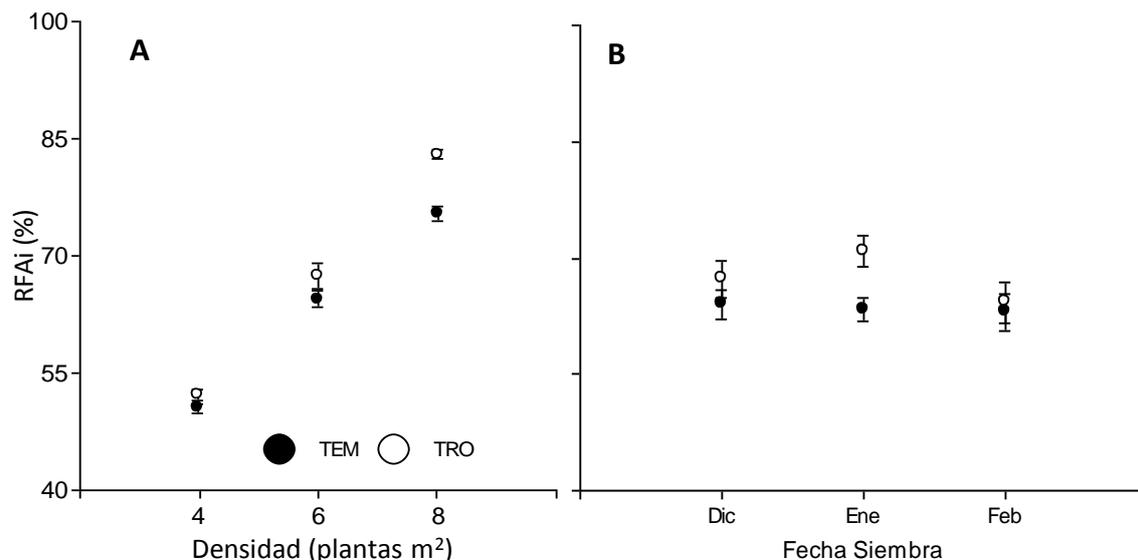


Figura 10. Porcentaje de radiación interceptada (RFAi) para maíces de germoplasma templado (TEM) y tropical (TRO) sembrados en tres densidades (A) y tres fechas de siembra (B). Valores promedio de dos campañas. Barras verticales indican error estándar de la media (Alfa=0,05).

3.4. Eficiencia de Uso de la Radiación en Período Crítico

La eficiencia de uso de la radiación (EUR) para el período entre R1-15 días y R1+15 días presentó una interacción Año*Germ*Den*FS ($p=0,012$). La EUR difirió significativamente entre campañas, siendo mayor durante 2007-08 ($3,45 \text{ g Mj}^{-1}$) que durante 2009-10 principalmente debido a los bajos valores en siembras tempranas de esta última campaña. El efecto de Germ sobre EUR fue escaso (entre $3,38$ y $3,52 \text{ g Mj}^{-1}$ durante 2007-08 y entre $2,90$ y $3,10 \text{ g Mj}^{-1}$ durante 2009-10), en general a favor del germoplasma templado. Las mayores variaciones en EUR estuvieron asociadas a cambios en la FS, las cuales oscilaron entre $2,94$ y $4,40 \text{ g Mj}^{-1}$ durante 2007-08 y entre $1,71$ y $3,92 \text{ g Mj}^{-1}$ durante 2009-10, en ambas campañas alcanzando la máxima EUR en Ene (Fig. 11; $p\leq 0,001$).

En Ene los híbridos TRO lograron la máxima eficiencia con poblaciones de 4 plantas m^{-2} , en tanto que TEM lo lograron con 6 plantas m^{-2} . Siembras distintas a Ene

determinaron que TRO disminuya su EUR, siendo esta de mayor magnitud que la mostrada por TEM independientemente de la densidad (Fig. 11).

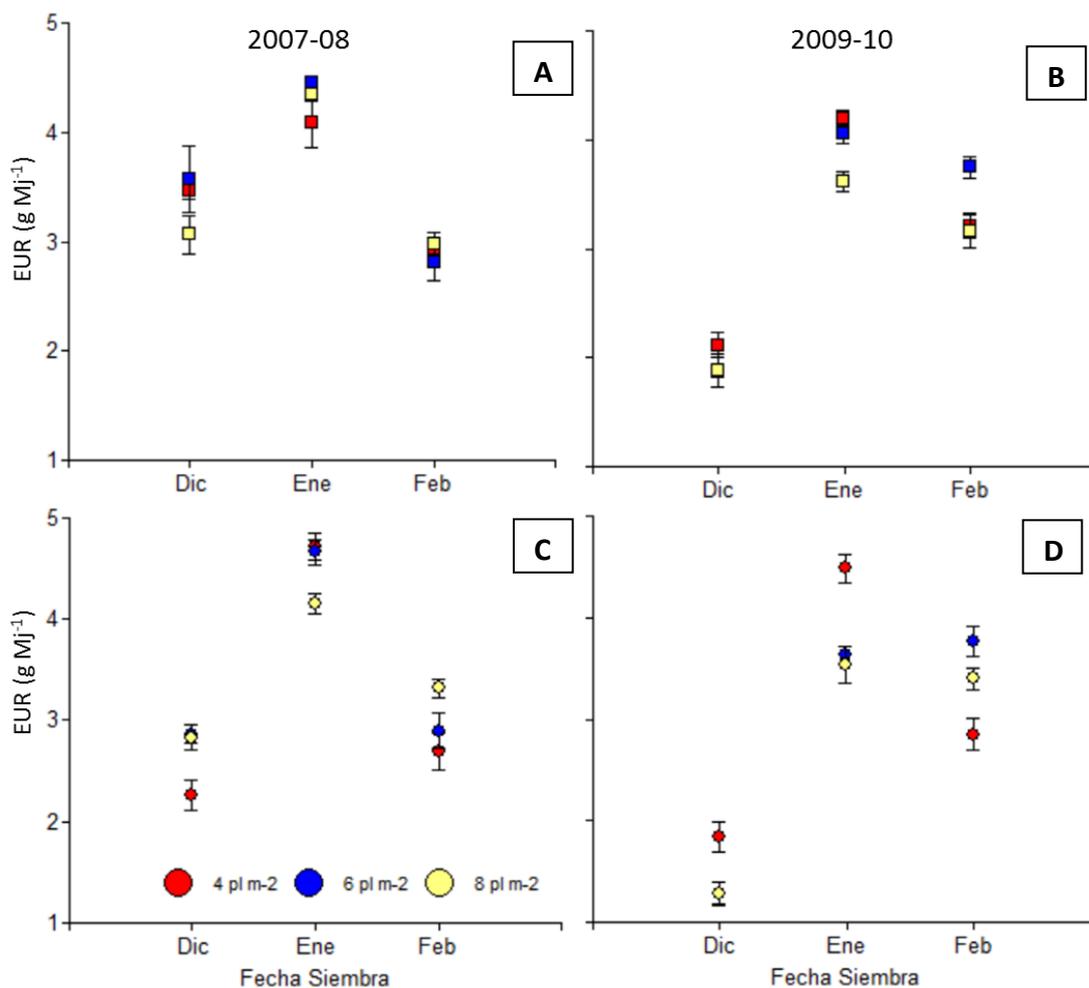


Figura 11. Eficiencia de uso de radiación en maíces de germoplasma templado (A y B) y tropical (C y D) para tres densidades poblacionales y tres fechas de siembra durante las campañas 2007-08 y 2009-10. Barras verticales indican error estándar de la media (Alfa=0,05).

4. Crecimiento y Rendimiento

En la Tabla 4 se describen los valores medios de las variables de crecimiento evaluadas.

Tabla 3. Efectos de la densidad poblacional y la fecha de siembra sobre el rendimiento en grano (RTO), número de granos (NG), peso de granos (PG), índice de cosecha (IC), tasa de crecimiento del cultivo durante el período crítico (TCC_{PC}) y durante llenado de granos (TCC_{LL}), para dos tipos de germoplasmas (Tropical y Templado), tres densidades y tres fechas de siembra.

Año	Germoplasma	Fecha de Siembra	Densidad	RTO (kg ha ⁻¹)	NG (granos m ⁻²)	PG (g)	IC	TCC _{PC} (g m ⁻² d ⁻¹)	TCC _{LL} (g m ⁻² d ⁻¹)
A-1	Tropical (TRO)	Diciembre	4 pl m ⁻²	4836	2326	210	0,47	12,4	14,3
			6 pl m ⁻²	4999	2582	196	0,34	19,2	17,8
			8 pl m ⁻²	5372	3270	165	0,35	22,6	15,9
		Enero	4 pl m ⁻²	6068	3138	194	0,49	26,2	9,1
			6 pl m ⁻²	6668	3852	173	0,43	31,9	12,4
			8 pl m ⁻²	6086	3621	168	0,34	31,2	16,8
		Febrero	4 pl m ⁻²	5041	3534	143	0,61	11,6	8,9
			6 pl m ⁻²	4601	3217	146	0,48	16,2	10,4
			8 pl m ⁻²	5398	4002	136	0,50	20,7	8,3
	Templado (TEM)	Diciembre	4 pl m ⁻²	6090	2384	256	0,45	17,1	18,0
			6 pl m ⁻²	6317	3122	202	0,38	23,7	17,7
			8 pl m ⁻²	6291	3544	178	0,37	22,8	16,5
		Enero	4 pl m ⁻²	5902	3222	186	0,50	20,0	13,9
			6 pl m ⁻²	7595	3891	195	0,47	27,2	21,5
			8 pl m ⁻²	6393	3682	175	0,36	28,4	21,9
		Febrero	4 pl m ⁻²	4999	3404	147	0,57	12,0	14,2
			6 pl m ⁻²	4751	3175	150	0,52	15,2	10,2
			8 pl m ⁻²	5382	3884	138	0,42	18,6	18,6
A-2	Tropical (TRO)	Diciembre	4 pl m ⁻²	4697	1496	313	0,44	9,3	12,9
			6 pl m ⁻²	4301	1421	301	0,32	8,9	18,1
			8 pl m ⁻²	3051	1026	298	0,23	10,9	15,8
		Enero	4 pl m ⁻²	6714	2461	273	0,51	27,1	7,4
			6 pl m ⁻²	7026	2261	311	0,37	27,1	18,2
			8 pl m ⁻²	6312	2213	285	0,33	28,5	15,5
		Febrero	4 pl m ⁻²	1978	1068	186	0,41	8,8	3,6
			6 pl m ⁻²	2826	1586	179	0,41	15,0	3,8
			8 pl m ⁻²	2552	1402	183	0,29	17,9	5,2
	Templado (TEM)	Diciembre	4 pl m ⁻²	4514	1493	304	0,38	10,6	17,1
			6 pl m ⁻²	4926	1774	282	0,42	13,5	13,0
			8 pl m ⁻²	4272	1429	299	0,29	14,8	19,1
		Enero	4 pl m ⁻²	6359	2204	289	0,50	22,2	11,9
			6 pl m ⁻²	7171	2496	288	0,37	26,6	22,6
			8 pl m ⁻²	6023	2135	283	0,32	26,3	20,0
		Febrero	4 pl m ⁻²	3401	1687	203	0,52	10,6	4,8
			6 pl m ⁻²	3802	1741	221	0,45	14,9	5,2
			8 pl m ⁻²	3937	1942	204	0,38	17,1	6,8
VALORES PROMEDIO									
A-1				5710	3325	175	0,46	20,9	14,8
A-2				4659	1768	261	0,37	17,2	12,3
	Tropical			4918	2471	214	0,40	19,2	11,9
	Templado			5451	2622	222	0,44	19,0	15,2
		Diciembre		4972	2155	250	0,39	15,5	16,3
		Enero		6526	2931	235	0,41	26,9	15,9
		Febrero		4056	2553	170	0,45	14,9	8,3
			4 pl m ⁻²	5050	2368	225	0,49	15,7	11,3
			6 pl m ⁻²	5415	2593	220	0,41	20,0	14,2
			8 pl m ⁻²	5089	2679	209	0,35	21,7	15,0
ANOVA									
Año				***	***	***	***	***	***
Germoplasma (Germ)				***	***	***	***	ns	***
Densidad (Den)				***	***	***	***	***	***
Fecha Siembra (FS)				***	***	***	***	***	***
Año*Germ				ns	ns	ns	**	*	*
Año*Den				**	***	***	ns	***	ns
Año*FS				***	***	***	***	***	***
Germ*Den				ns	ns	ns	**	ns	*
Germ*FS				***	ns	**	**	***	***
Den*FS				***	***	***	ns	***	***
Año*Germ*Den				ns	ns	ns	ns	ns	ns
Año*Germ*FS				***	**	***	***	ns	ns
Año*Den*FS				**	***	***	***	***	*
Germ*Den*FS				ns	ns	*	ns	**	**
Año*Germ*Den*FS				ns	ns	***	***	*	*

*Significativo al $P \leq 0.05$; ** Significativo al $P \leq 0.01$; *** Significativo al $P \leq 0.001$; ns: no significativo

4.1. Tasa de Crecimiento del Cultivo en Periodo Crítico

La tasa de crecimiento de cultivo en el periodo crítico de determinación del rendimiento (TCC_{PC}) presentó una interacción Año*Germ*Den*FS ($p=0,0354$; Fig. 12). La TCC_{PC} varió entre campañas alcanzando valores promedio de tratamientos de $20,9 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ durante 2007-08 y $17,2 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ durante 2009-10 ($p=0,0001$) (Tabla 4). El germoplasma generó las menores variaciones de TCC_{PC} con valores que oscilaron entre $20,6$ y $21,3 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ para la campaña 2007-08 y entre 17 y $17,4 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ para la campaña 2009-10. Tales variaciones fueron significativas en la fecha de Ene donde el material tropical presentó mayor tasa de crecimiento ($p=0,002$) y en Dic de la segunda campaña, donde el material templado presentó mayor tasa de crecimiento ($p=0,0001$).

La variable que más influyó sobre TCC_{PC} fue FS, con valores máximos para Ene ($p \leq 0,0001$), tendencia más marcada en la segunda campaña ($75,1$ vs. $132,7\%$ de variación). Los cambios en densidad resultaron en variaciones de la TCC_{PC} entre $16,5$ y $24 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ durante la campaña 2007-08 ($45,4\%$ de variación) y entre $14,8$ y $19,2 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ durante 2009-10 ($29,7\%$ de variación). Las menores tasas se observaron con bajas densidades principalmente en la primera campaña y en Ene y Feb de la segunda campaña. En ambas campañas y para fechas de Feb, cuanto mayor fue la densidad, mayor fue la TCC_{PC} .

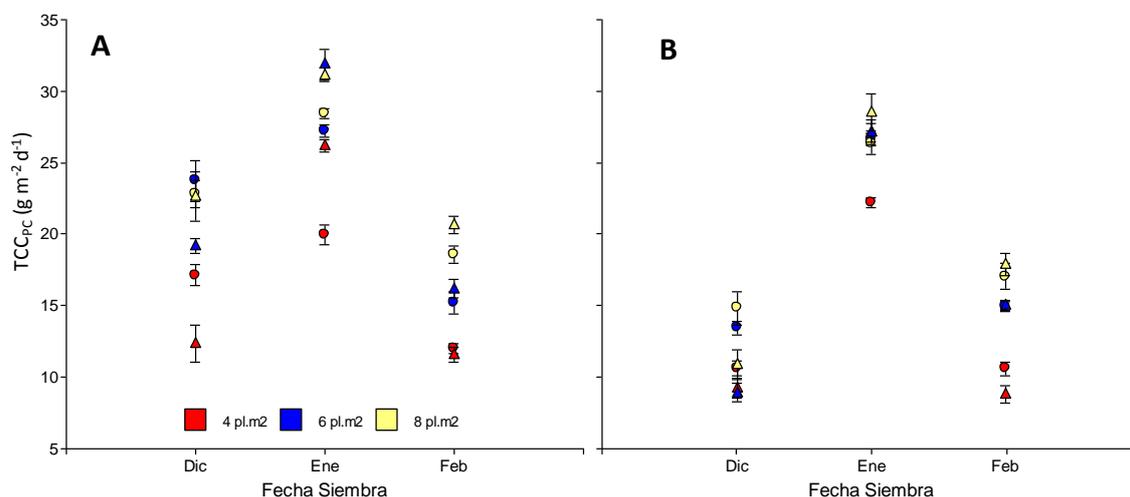


Figura 12. Tasa de crecimiento del cultivo durante el período crítico (TCC_{PC}) para maíces de germoplasma tropical (triángulos) y templado (círculos), para tres densidades poblacionales (4, 6 y 8 plantas m^{-2}) y tres fechas de siembra (Dic, Ene y Feb) durante las campañas 2007-08 (A) y 2009-10 (B). Barras verticales indican error estándar de la media (Alfa=0,05).

La TCC_{PC} tuvo una respuesta lineal y positiva en función de la eficiencia de uso de radiación (EUR) en el período crítico ($R1 \pm 15d$) (Fig. 13). Dicha relación, tuvo una

respuesta similar, pero con un grado de ajuste diferente según el germoplasma considerado, con mayores valores para TRO que para TEM ($R^2=0,68$, $p<0,0001$ y $R^2=0,54$, $p<0,0001$ respectivamente). Además, se observó una asociación significativa ($p<0,0001$) entre la tasa de crecimiento y la radiación interceptada por el cultivo durante el período crítico (RFAi), la cual analizada por Germ estaría explicando una pequeña proporción de los cambios en TCC_{PC} ($R^2=0,12$; $p=0,0002$ y $R^2=0,17$; $p<0,0001$ para TEM y TRO, respectivamente). Sin embargo, cuando se analizó a través de FS, la asociación presento un alto coeficiente de determinación, excepto Dic, evidenciando como a similares niveles de intercepción los cultivos sembrados en Enero podían crecer a tasas muy superiores que en Diciembre y Febrero (Fig. 14), debido a una mayor EUR.

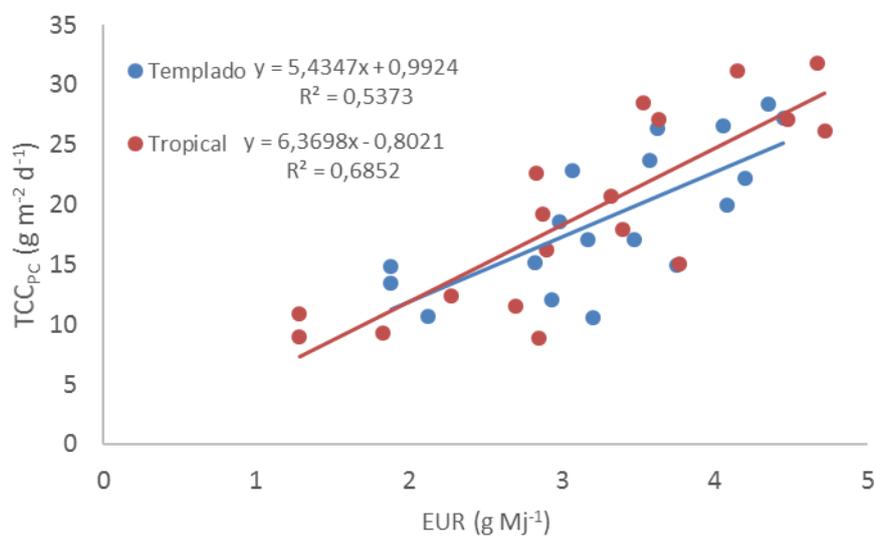


Figura 13. Relación entre la eficiencia de uso de la radiación y la tasa de crecimiento del cultivo en período crítico para dos germoplasmas. Valores promedio de tres fechas de siembra, tres densidades de siembra y dos años.

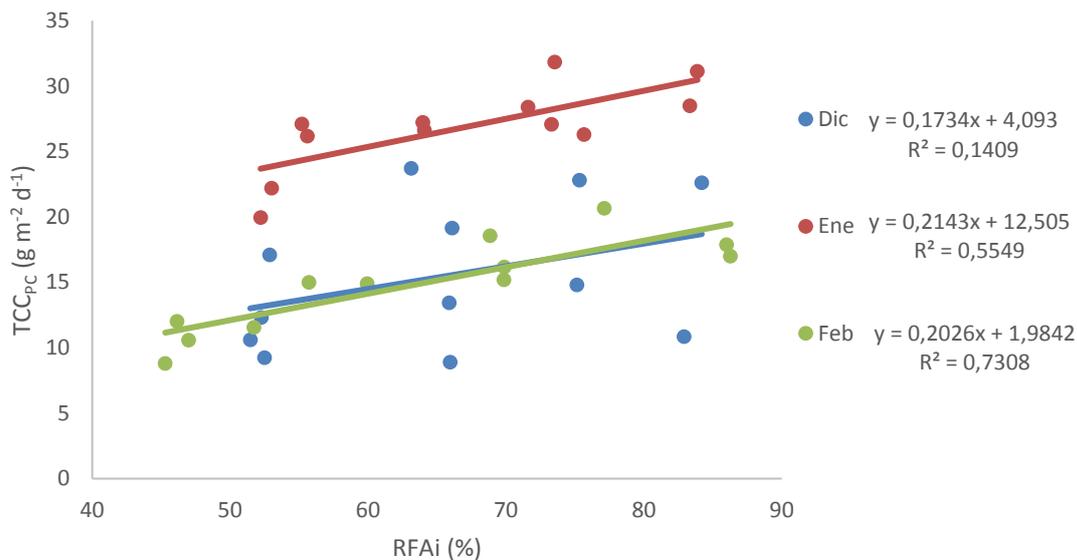


Figura 14. Relación entre el porcentaje de radiación interceptada y la tasa de crecimiento del cultivo en período crítico para tres fechas de siembra. Valores promedio de cuatro híbridos correspondientes a dos germoplasmas, tres densidades de siembra y dos años.

4.2. Tasa de Crecimiento del Cultivo durante Llenado de Granos.

La TCC_{LL} presentó interacción Año*Germ*Den*FS ($p=0,0133$). Al igual que TCC_{PC}, la tasa de crecimiento del cultivo durante el período de llenado de granos (TCC_{LL}) difirió entre campañas ($p=0,0074$) siendo mayor durante 2007-08 con 14,8 g m⁻² d⁻¹ respecto de los 12,3 g m⁻² d⁻¹ alcanzados en 2009-10 (Tabla 4). El germoplasma templado en general presentó mayores valores de TCC_{LL} ($p=0,0398$), excepto cuando se sembraron altas densidades (Tabla 4).

La variable más influyente fue la FS (Fig. 15) con variaciones entre 11,7 y 16,7 g m⁻² d⁻¹ durante la campaña 2007-08 y entre 4,9 y 16 g m⁻² d⁻¹ durante 2009-10. Las diferencias entre campañas fueron mínimas para las primeras dos fechas de siembra, pero tuvieron una marcada caída en la fecha tardía de la segunda campaña ($p\leq 0,0001$). Por último, cambios en Den derivaron en variaciones de la TCC_{LL} entre 13,1 y 16,3 g m⁻² d⁻¹ durante la campaña 2007-08 y entre 9,6 y 13,7 g m⁻² d⁻¹ durante 2009-10. En general la densidad más baja presentó menor TCC_{LL} principalmente en Ene ($p=0,0109$), sin diferencias significativas entre densidades en fechas de Dic y Feb.

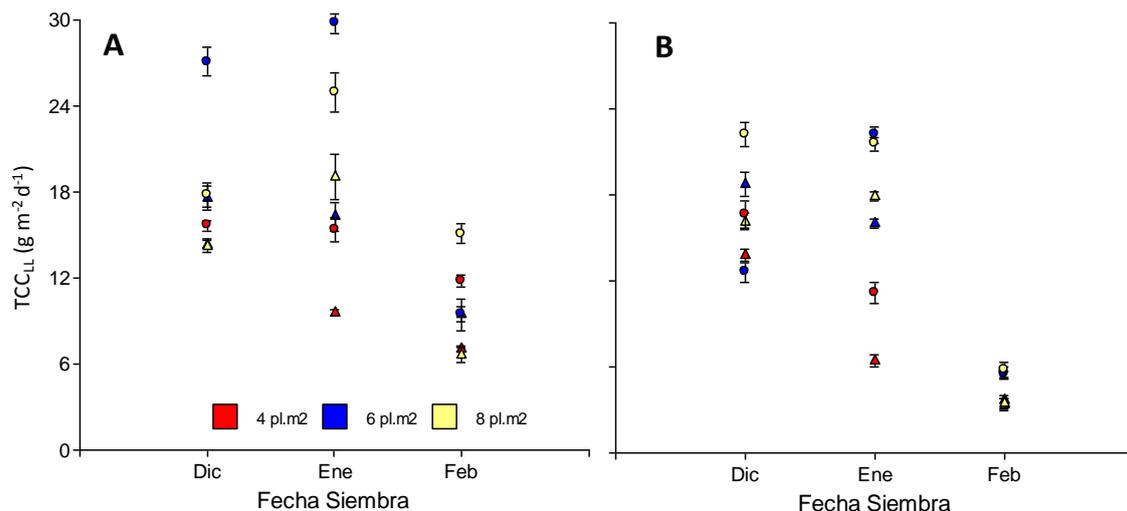


Figura 15. Tasa de crecimiento del cultivo durante llenado de granos en maíces de germoplasma tropical (triángulos) y templado (círculos), para tres fechas de siembra y tres densidades poblacionales durante las campañas 2007-08 (A) y 2009-10 (B). Barras verticales indican error estándar de la media (Alfa=0,05).

4.3. Rendimiento en Grano

El rendimiento en grano (RTO) presentó interacción Año*Germ*FS ($p < 0,0001$) e interacción Año*Den*FS ($p = 0,002$). El rendimiento varió entre campañas ($p = 0,0009$), obteniéndose valores promedio entre tratamientos de 5710 kg ha⁻¹ para 2007-08 y 4659 kg ha⁻¹ para 2009-10. El germoplasma templado tuvo mayores rendimientos en fechas tempranas (Dic) en ambos años y en la fecha tardía (Feb) del segundo año ($p = 0,036$), mientras que en Ene no tuvo diferencias significativas con el tropical (Fig. 16). La práctica de manejo que más influyó sobre el rendimiento en ambas campañas fue la fecha de siembra (FS), con valores que variaron entre 5028 y 6452 kg ha⁻¹ (2007-08) y entre 3082 y 6600 kg ha⁻¹ (2009-10).

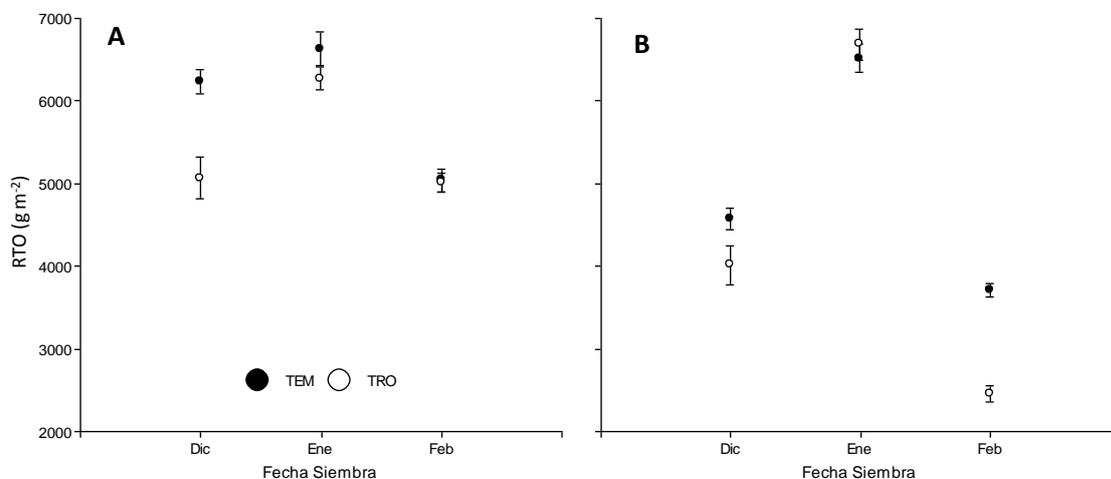


Figura 16. Rendimiento en grano de maíces con germoplasma templado y tropical para tres fechas de siembra durante 2007-08 (A) y 2009-10 (B). Barras verticales indican error estándar de la media (Alfa=0,05).

La siembra de Ene presentó en ambas campañas mayores rendimientos que el resto de las fechas ($p=0,010$), en tanto que Dic y Feb solamente se diferenciaron entre sí en el segundo año (Fig. 16 y 17). La siembra de Feb de la segunda campaña mostró rendimientos significativamente menores al resto de las fechas, los cuales pudieron haberse relacionados al atraso en la fecha de siembra respecto del año anterior, lo cual determinó que el cultivo quede expuesto a menores temperaturas y radiación (Fig. 2 y 3).

Finalmente, la densidad no mostró una respuesta clara, sino una tendencia a lograr mayores rendimientos con densidades de 6 plantas m^{-2} , siendo esto válido para la siembra de Ene en la primera campaña y para las tres fechas de siembra de la segunda campaña (Fig. 17). Densidades de 8 plantas m^{-2} incrementaron el rendimiento respecto de 4 y 6 plantas m^{-2} en siembras de Dic y Feb de la primera campaña ($p<0,0001$), pero en la segunda campaña en fechas de Dic y Ene altas densidades presentaron los rendimientos más bajos.

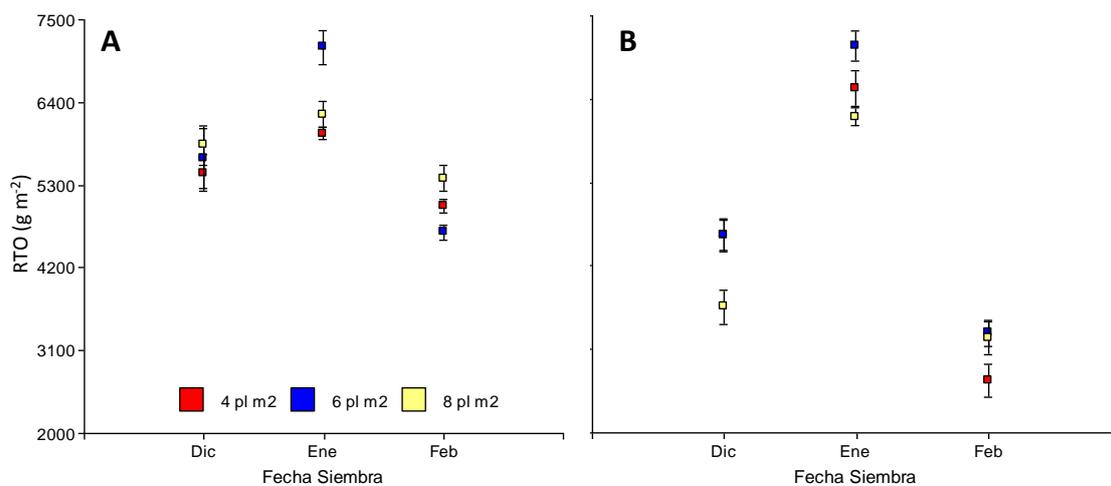


Figura 17. Respuesta del rendimiento en grano ante cambios en la densidad de plantas de maíz para tres fechas de siembra, durante 2007-08 (A) y 2009-10 (B). Valores promedio para dos germoplasmas. Barras verticales indican error estándar de la media (Alfa=0,05).

4.4. Número de Granos

El número de granos (NG) tuvo una fuerte variación entre campañas, con valores de 3325 y 1768 granos m^{-2} para 2007-08 y 2009-10 en promedio de todos los tratamientos. Además, presentó una interacción significativa Año*Germ*FS ($p<0,0001$) y Año*Den*FS ($p=0,0066$). Las fechas de siembra de Ene fueron óptimas y presentaron los mayores números de granos en ambas campañas, aunque en la primera campaña, dicha fecha no se diferenció de Feb (Fig. 18A). Generalmente los híbridos no difirieron

entre sí en fechas óptimas (Fig. 18), sin embargo, TRO presentó menor fijación de granos que TEM para FS sub-óptimas del segundo año (Dic y Feb de 2009-10; $p=0,0079$).

Los cambios en Den derivaron en variaciones del NG entre 3001 y 3667 granos m^{-2} durante 2007-08 y entre 1691 y 1879 granos m^{-2} durante 2009-10. Se registró una leve tendencia a lograr mayores fijaciones de granos con densidades de 6 plantas m^{-2} , principalmente en Ene en la primera campaña (Fig. 19A), aunque en siembras de Dic y Feb las altas densidades incrementaron el número de granos. En la segunda campaña las diferentes densidades produjeron pocos cambios en la fijación de granos, solo se observaron bajas en la fijación de granos con altas densidades en Dic para TRO y ante bajas densidades en Feb también para TRO (Fig. 19B).

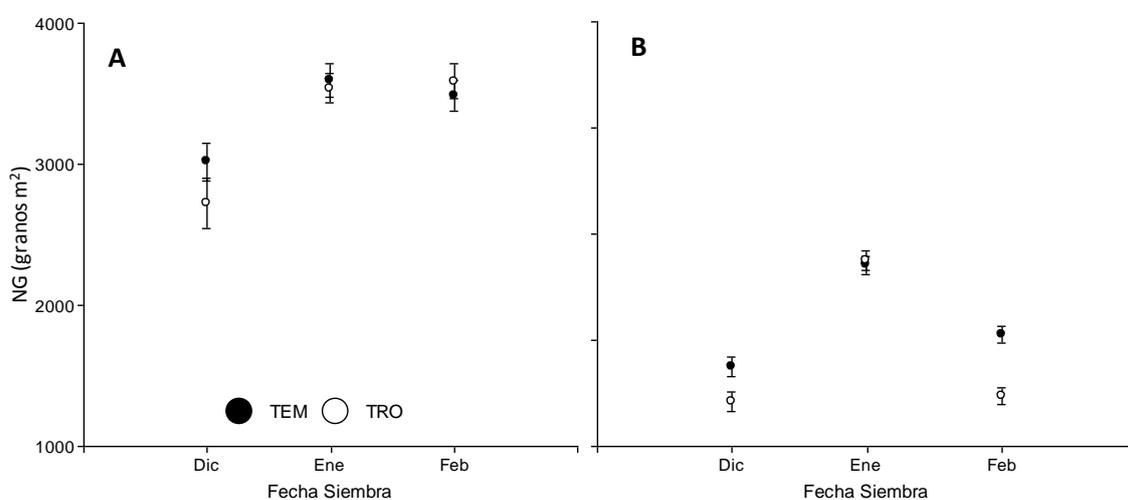


Figura 18. Número de granos fijados por maíces con germoplasma templado y tropical en tres fechas de siembra durante las campañas 2007-08 (A) y 2009-10 (B). Valores promedio de tres poblaciones de plantas. Barras verticales indican error estándar de la media (Alfa=0,05).

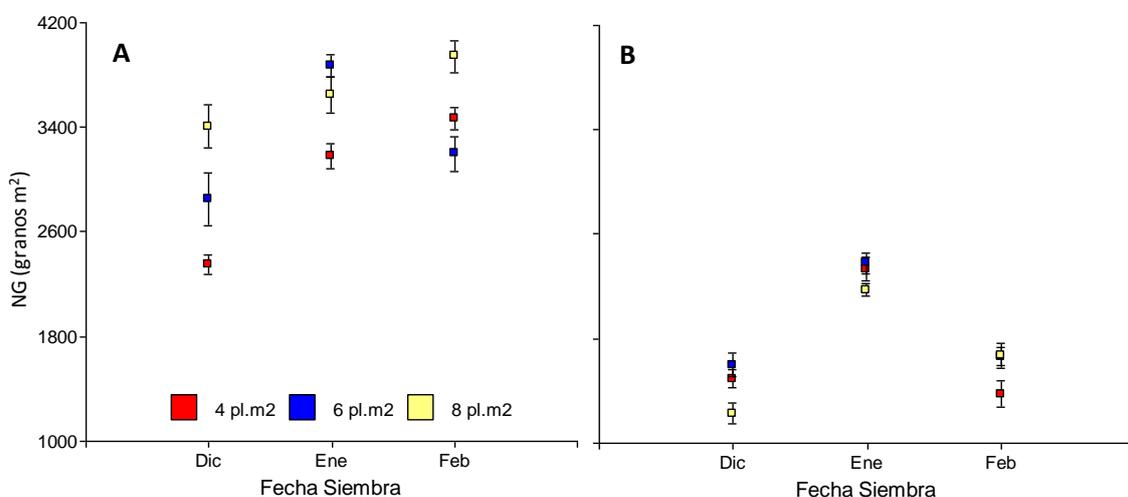


Figura 19. Variaciones en el número de granos (NG) ante cambios en la densidad durante tres fechas de siembra para las campañas 2007-08 (A) y 2009-10 (B). Valores

promedio de dos germoplasmas. Barras verticales indican error estándar de la media (Alfa=0,05).

4.5. Peso de Granos

El peso de granos (PG) presentó una interacción Año*Germ*Den*FS ($p \leq 0,0001$) donde pudo observarse que el peso durante la primera campaña tendió a ser superior al menos en las primeras dos fechas de siembra (Fig. 20). El tipo de germoplasma determinó las menores variaciones en el PG, obteniéndose registros entre 170 y 181 g durante 2007-08 y entre 259 y 263 g durante 2009-10. Los híbridos TEM tendieron a ser los más pesados, aunque las diferencias solo fueron significativas en Dic de 2007-08 y Feb de 2009-10.

La FS fue la variable de mayor influencia sobre el PG, variando entre 143 y 201 g durante 2007-08 y entre 196 y 299 g durante 2009-10. El peso de granos disminuyó al retrasar la fecha de siembra ($p \leq 0,0001$), las fechas de Dic y Ene difirieron estadísticamente, pero fue considerable la caída en fechas de Feb (Fig. 20), maximizándose dicha caída en 2009-10. Finalmente, la Den generó variaciones en el PG de 160 a 189 g durante 2007-08 y entre 259 y 263 g durante 2009-10. Durante la primera campaña, el peso de granos fue mayor cuanto menor era la densidad de siembra ($p=0,0149$), aunque la magnitud de las diferencias se redujo al retrasar la fecha de siembra (Fig. 21A). En la segunda campaña analizada, no se observó un claro efecto de la densidad sobre el peso de los granos, principalmente en la fecha tardía ($p=0,77$).

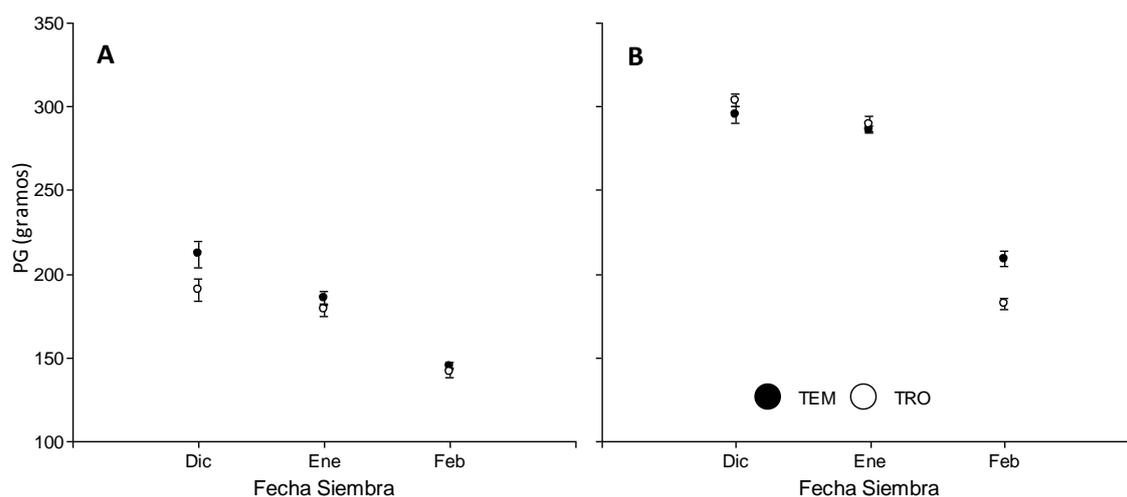


Figura 20. Variación del peso de mil granos (PG) para híbridos de germoplasma tropical y templado para tres fechas de siembra, durante las campañas 2007-08 (A) y 2009-10 (B). Valores promedio de tres densidades de plantas. Barras verticales indican error estándar de la media (Alfa=0,05).

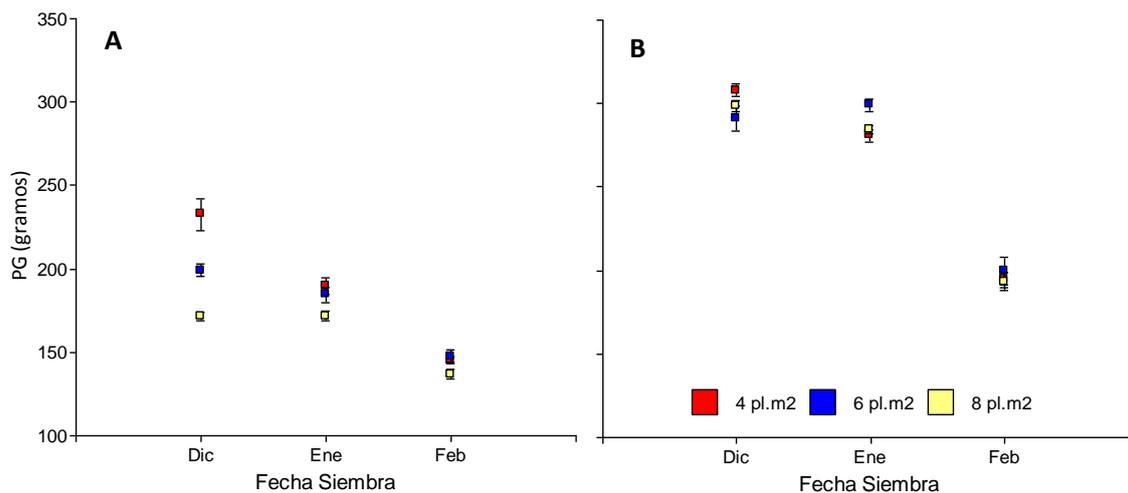


Figura 21. Respuesta en el peso de mil granos ante cambios en la fecha de para tres densidades poblacionales durante las campañas 2007-08 (A) y 2009-10 (B). Valores promedio para dos tipos de germoplasma. Barras verticales indican error estándar de la media (Alfa=0,05).

4.6. Índice de Cosecha

La transformación en grano de parte de la BM producida por las plantas conocido como índice de cosecha (IC), presentó interacción Año*Germ*Den*FS ($p=0,0003$). Difirió levemente entre campañas, con valores promedio de 0,46 para la campaña 2007-08 y 0,37 para la campaña 2009-10 (Tabla 4). Cambios de Germ determinaron las menores variaciones del IC, con escasa variación para la campaña 2007-08 (4,4% de variación) y mayor variación para la campaña 2009-10 (14,3%), donde en fechas subóptimas (i.e. Dic y Feb) el germoplasma tropical presentó menor IC. La FS mostro valores de IC entre 0,43 y 0,53 durante la campaña 2007-08, que tendió a incrementar a medida que se atrasó la siembra. En 2009-10 solo el germoplasma templado presentó esta tendencia, sin grandes cambios en el germoplasma tropical. Por último, la variable de mayor influencia sobre el IC fue Den con valores entre 0,40 y 0,54 durante 2007-08 y entre 0,30 y 0,44 durante 2009-10. Ambos tipos de germoplasma alcanzaron los mayores IC en siembras de Feb, con poblaciones de 4 plantas m^{-2} .

La interacción Germ*Den se debió a que ambos tipos de germoplasma disminuyeron diferencialmente su IC a medida que se incrementó la población de plantas. TRO presentó menores IC que TEM a densidades medias (6 plantas m^{-2}) de la primera campaña y en todas las densidades de la segunda campaña (Fig. 22). Por último, se observó un incremento del IC a medida que se atrasó la FS, el cual tuvo variaciones de magnitud según la Den considerada (Fig. 23), donde en fechas tardías la magnitud del cambio tendió a incrementarse (Tabla 4).

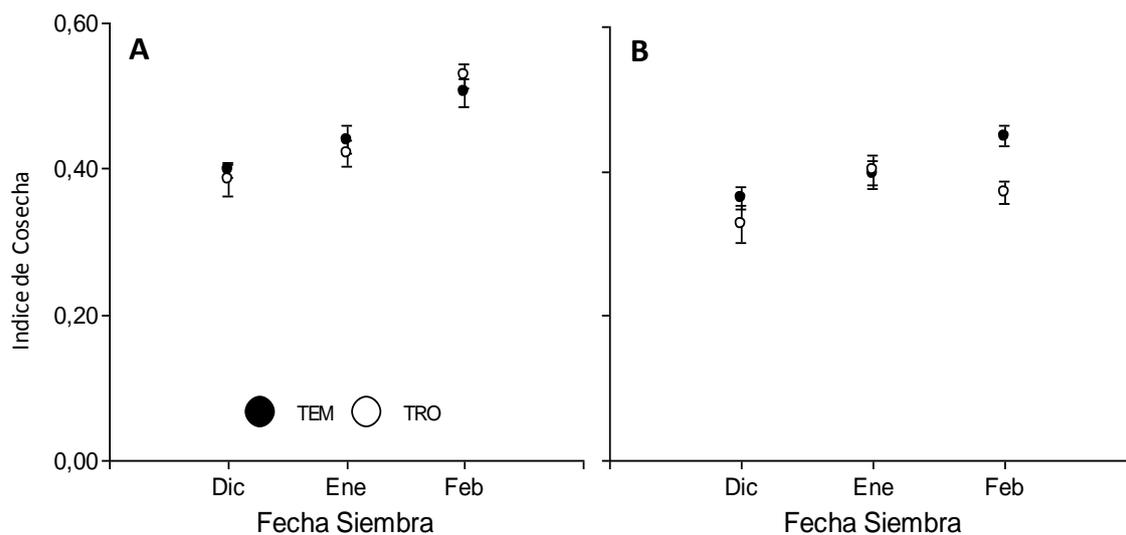


Figura 22. Valores de índice de cosecha para maíces de germoplasma tropical (TRO) y templado (TEM) para tres fechas de siembra durante las campañas 2007-08 (A) y 2009-10 (B). Valores promedio de tres densidades poblacionales. Barras verticales indican error estándar de la media (Alfa=0,05).

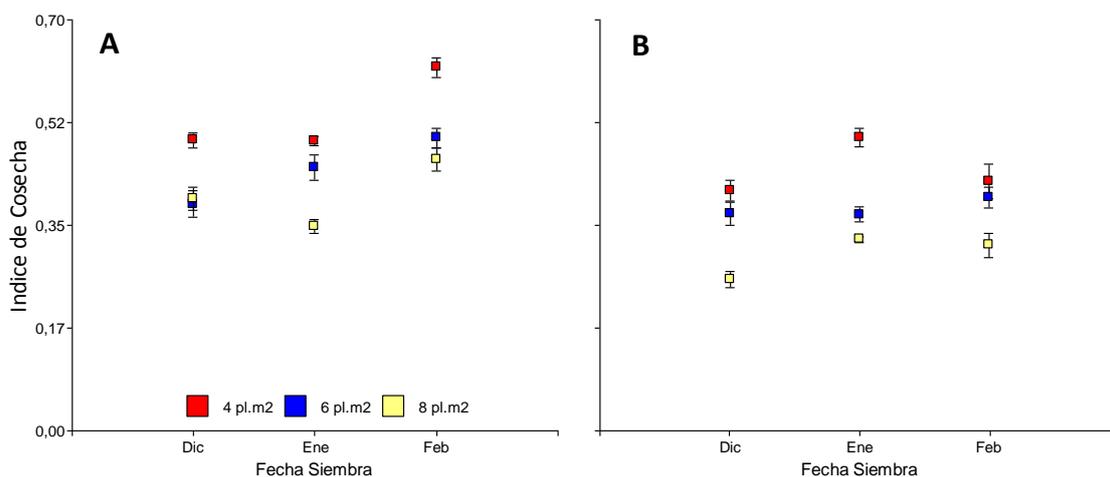


Figura 23. Efecto de la fecha de siembra sobre el índice de cosecha para tres densidades poblacionales durante las campañas 2007-08 (A) y 2009-10 (B). Valores promedio de cuatro híbridos y dos tipos de germoplasma. Barras verticales indican error estándar de la media (Alfa=0,05).

4.7. Relación entre el Rendimiento y sus Componentes

El rendimiento se relacionó directamente con el número de granos (NG) y con la biomasa total en madurez fisiológica (BM) presentando coeficientes de correlación mayores a 0,66 (Tabla 5). El NG presentó una relación inversa con el peso de granos (PG) y una relación directa con el índice de cosecha (IC).

Tabla 4. Coeficientes de correlación de Pearson para las variables Rendimiento (RTO), número de granos (NG), peso de granos (PG), biomasa aérea (BM) e índice de cosecha (IC). En la diagonal superior se observan los valores p de los coeficientes observados en la diagonal inferior.

	RTO	NG	PG	BM	IC
RTO	1	*	n.s.	*	*
NG	0,66	1	*	*	*
PG	0,09	-0,65	1	*	*
BM	0,67	0,25	0,34	1	*
IC	0,36	0,51	-0,33	-0,42	1

* Nivel de significancia a $p \leq 0,05$

5. Asociación entre Componentes de Rendimiento y Determinantes Ecofisiológicos del Crecimiento del Cultivo.

5.1. Análisis de Componentes Principales

Se realizó un análisis de componentes principales para entender la interdependencia de las variables estudiadas y su relación con las combinaciones de Germ, Den y FS. Los componentes 1 y 2 explicaron alrededor del 77,2% de la variación observada. El biplot (Fig. 24) indica que el rendimiento se asoció positivamente con el NG y la tasa de crecimiento del cultivo durante el período crítico (TCC_{PC}), y en menor medida con BM y EUR. El PG se asoció positivamente con BM y TCC_{LL} , pero se asoció negativamente con IC. También se observó que las siembras de Ene (FS2) se relacionaron mejor con el rendimiento, principalmente en la densidad de 6 plantas m^{-2} (D2), y en menor medida en D3 (8 plantas m^{-2}) sin marcadas diferencias entre tipos de germoplasma.

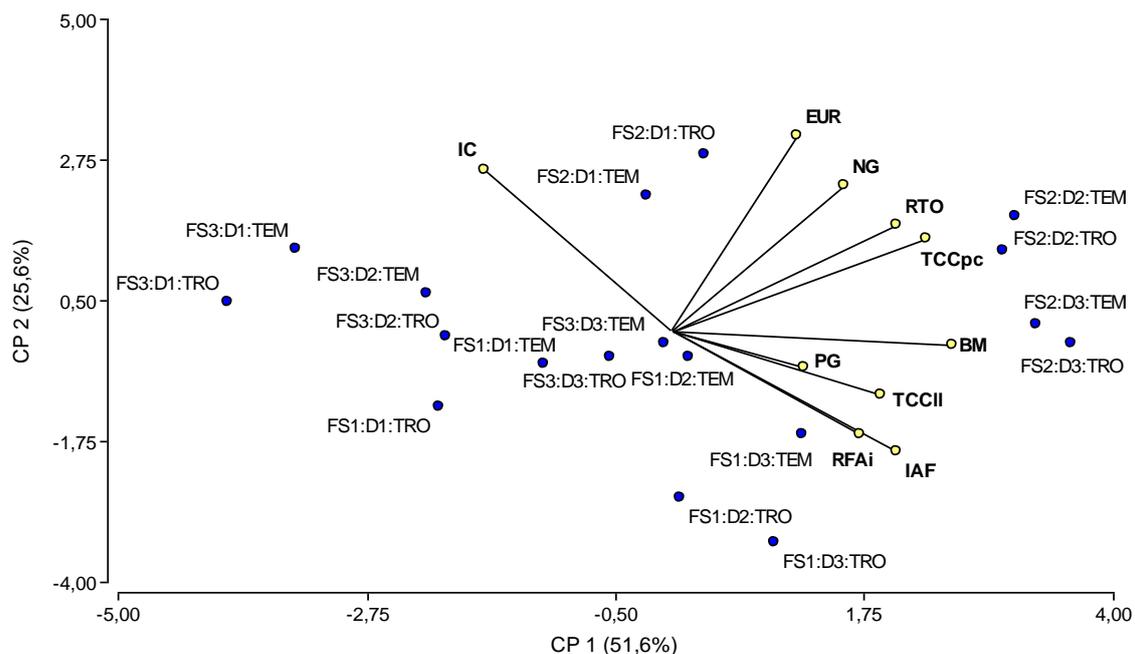


Figura 24. Biplot basado en Análisis de Componentes Principales para las variables rendimiento (RTO), número de granos (NG), peso de granos (PG), biomasa aérea (BM), índice de cosecha (IC), índice de área foliar (IAF), radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAi), eficiencia de uso de radiación (EUR), tasa de crecimiento del cultivo alrededor del período crítico (TCC_{pc}) y tasa de crecimiento del cultivo durante llenado (TCC_{ll}), para dos genotipos: Tropical (TRO) y Templado (TEM). Los círculos azules indican las combinaciones de fecha de siembra (FS1: Dic, FS2: Ene, FS3: Feb), densidades (D1: 4 plantas m^{-2} , D2: 6 plantas m^{-2} , D3: 8 plantas m^{-2}) y genotipo. Los datos corresponden al promedio de dos experimentos (2007-08 y 2009-10) realizados en Las Breñas, Chaco.

5.2. Análisis Ecofisiológico del Rendimiento

El retraso en la fecha de siembra expuso a los cultivos a interceptar menores niveles de radiación incidente, principalmente durante la segunda campaña en mayor medida por FS más tardías (Fig. 25). Además, en ambas campañas las precipitaciones tendieron a disminuir gradualmente hacia el otoño que, sumado a menores temperaturas medias, determinó que las siembras de Febrero presenten menores tasas de crecimiento durante el periodo de llenado de granos respecto de Diciembre y Enero (Tabla 4). La combinación de menor radiación incidente, temperaturas medias inferiores y bajas precipitaciones hicieron que las siembras de Febrero alcancen rendimientos menores respecto de Diciembre y Enero.

Siembras más tempranas (i.e. Diciembre) estuvieron expuestas a mayores niveles de radiación incidente y temperaturas media, lo que podría suponer mejores condiciones de crecimiento que siembras de Enero y Febrero. Sin embargo, esto no se tradujo en

mayores tasas de crecimiento durante el período crítico (TCC_{PC}) lo que implicó niveles de rendimiento inferiores, sobre todo en la segunda campaña.

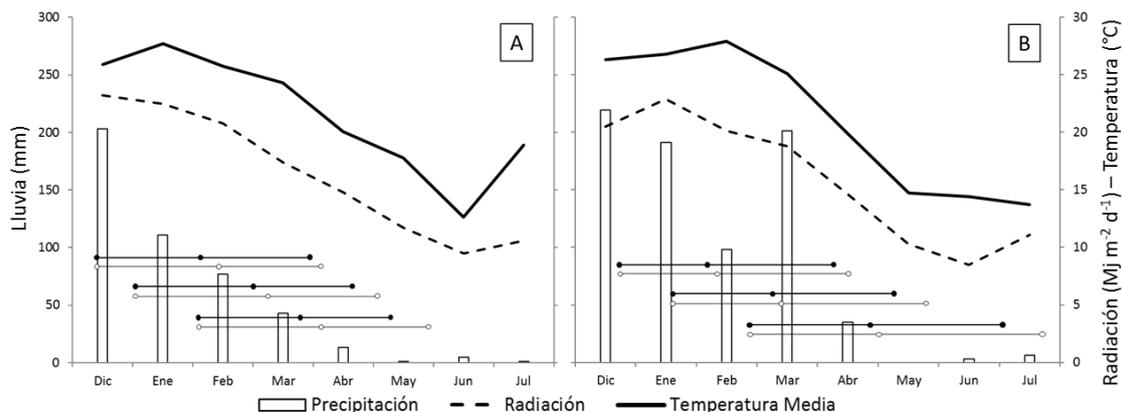


Figura 25. Ubicación del ciclo del cultivo para maíces de germoplasma tropical (símbolo vacío) y templado (símbolo lleno), para tres fechas de siembra durante las campañas 2007-08 (A) y 2009-10 (B). Los círculos identifican las fechas de siembra, fecha de R1 y madurez fisiológica. Las barras verticales indican precipitaciones acumuladas, las líneas continuas indican la temperatura media y las líneas discontinuas indica la radiación global diaria incidente por metro cuadrado. Datos promedio mensuales para la localidad de Las Breñas, Chaco, ($26^{\circ}59'58.72''S$ - $61^{\circ}10'36.67''O$).

Para siembras de Diciembre existió un bajo ajuste entre intercepción de radiación y tasa de crecimiento del cultivo durante el periodo crítico (Fig. 14). Para entender dicha variabilidad se analizó la ubicación del período crítico en cada combinación de campaña y fecha de siembra (Fig. 2 y Fig. 5). Se observó que las bajas precipitaciones durante la primera campaña coincidieron con elevadas demandas atmosféricas, las cuales disminuyeron levemente al retrasar la fecha de siembra. En la segunda campaña, la demanda atmosférica fue menor en general y las lluvias fueron mayores, aunque en la fecha de Diciembre se observó una condición de estrés térmico/hídrico durante el período crítico (Fig. 26) que repercutió en la EUR, TCC_{PC} y en el NG. Dicho estrés durante FS Dic del segundo año tuvo mayor impacto en TEM que produjo su floración antes que TRO. Parte de esta situación podría estar explicando los menores niveles de rendimiento para esta fecha de siembra.

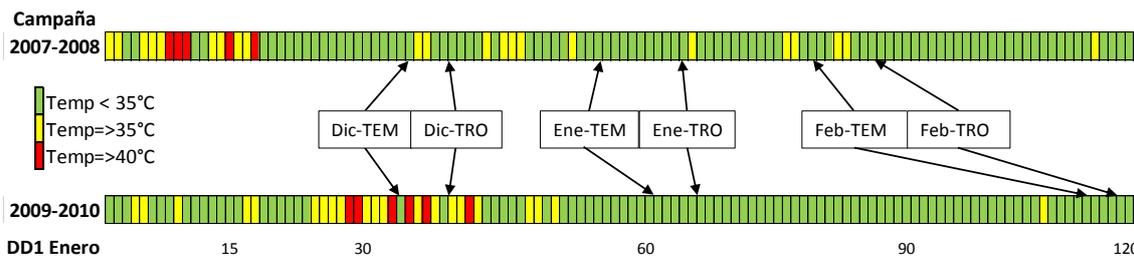


Figura 26. Temperatura máxima diaria a partir del 1° de Enero y durante las campañas 2007-08 y 2009-10 para la localidad de Las Breñas (Chaco). Las flechas indican día de R1 para los germoplasmas tropicales (TRO) y templados (TEM) en tres fechas de siembra (Dic, Ene y Feb). Información registrada in situ por estación meteorológica automática marca Davis.

Discusión

La elección de la fecha de siembra constituye una herramienta esencial para el resultado económico del cultivo de maíz en la región occidental del NEA. Los datos obtenidos en este experimento, a partir de un fuerte contraste entre los años explorados, indican que la fecha de siembra tuvo mayor impacto sobre el rendimiento con respecto a la densidad y germoplasma. La fecha de siembra modificó la duración y ubicación temporal de las etapas del cultivo alterando las condiciones ambientales para la producción de materia seca, la tasa de crecimiento durante el período crítico y el número y peso de los granos. Adicionalmente se obtuvo información acerca del comportamiento productivo de los híbridos tropicales y templados y su interacción con la densidad poblacional y la FS.

La temperatura tuvo un efecto positivo y lineal en el desarrollo del cultivo de maíz influyendo sobre la duración de las etapas y por consiguiente sobre la acumulación de radiación interceptada. La duración de las etapas vegetativa (E-R1) y reproductiva (R1-R6) disminuyó conforme se atrasó la fecha de siembra, particularmente en Feb, con pequeñas diferencias entre los dos tipos de germoplasma.

La radiación incidente disminuyó a partir de Diciembre determinando una menor acumulación por parte del cultivo en FS tardías. Los híbridos tropicales mostraron leves diferencias positivas respecto de templados en la duración de la etapa vegetativa con leves diferencias en la etapa reproductiva. Según Andrade y Cirilo (2002), el acortamiento del ciclo del cultivo provocado por el retraso de la siembra reduce el aprovechamiento de la radiación solar. Asimismo, menores temperaturas en siembras tardías pueden afectar la eficiencia de uso de la radiación con la consiguiente reducción en la biomasa total (Andrade et al., 1993). Considerando los valores de radiación incidente y temperatura diaria explorados en este trabajo, es posible afirmar que siembras posteriores a Febrero ofrecen condiciones de desarrollo limitantes para los cultivos indistintamente el material utilizado.

En general, los cambios en la fecha de siembra modificaron en gran medida la oferta ambiental, donde podemos pensar en ambientes “óptimos” que permiten maximizar el rendimiento. En ambas campañas, la siembra de Enero produjo los mayores rendimientos. La combinación lograda en términos de radiación incidente, precipitaciones y temperaturas se tradujo en tasas de crecimiento durante las etapas vegetativas y reproductivas que resultaron en un mayor número de granos y, en consecuencia, un mayor rendimiento (Andrade et al., 1999). La drástica caída del rendimiento en grano durante la segunda campaña para la siembra más tardía parece mostrar un límite para aquella combinación cuando se desfasa la siembra más hacia el otoño. Así, para fechas de siembra muy tardía en el NEA, las limitaciones parecen ser similares a aquellas indicadas para regiones más templadas (Cirilo y Andrade, 1994). En ambas zonas el rendimiento potencial disminuye, pero se reduce el riesgo de estrés térmico/hídrico. La información generada en este trabajo puede robustecer y/o validar modelos de crecimiento y rendimiento vigentes. Sin embargo, estudios adicionales en el NEA podrían contribuir a una mejor cuantificación de las caídas en rendimiento con la fecha de siembra y ayudar a dilucidar como los cambios ambientales operan sobre los mecanismos/procesos más básicos involucrados en la fijación y crecimiento de los granos de maíz.

Por otra parte, el efecto del germoplasma fue menor al que se esperaba a partir de la revisión bibliográfica. Generalmente los híbridos no difirieron en número de granos entre sí en fechas óptimas (i.e., Enero). Sin embargo, durante FS subóptimas, TRO presentó menor fijación de granos que TEM. Contrariamente a lo que se ha publicado (Cirilo y Andrade, 1994; Andrade et al., 1996; Birch et al., 1998; Marchaño et al., 2006), etapas fenológicas más prolongadas en TRO durante las fechas tardías produjeron solo ligeros incrementos en la captura de radiación. La mayor fijación de granos del germoplasma templado por unidad de tasa de crecimiento reportada por trabajos previos podría explicar el mayor número de granos de TEM en fechas subóptimas (Valentinuz, 1997; Echarte et al., 2000; Metzler et al., 2007). Tal vez este comportamiento observado y reportado en el germoplasma templado sea más un reflejo del avance en el mejoramiento genético en cuanto al aumento de la partición a grano a bajas tasas de crecimiento por planta que a una verdadera tolerancia a condiciones estresantes.

Además de la radiación incidente, la temperatura y el contenido hídrico del suelo alrededor del momento de floración tienen un efecto directo sobre la fijación de granos. Durante las siembras de Diciembre el número de granos fue significativamente menor que en el resto de las fechas, sobre todo en el germoplasma tropical. Las siembras de Dic del segundo año expusieron al cultivo a temperaturas superiores a 35°C. Las altas temperaturas podrían haber sido las responsables de la reducción en el número de

granos (Cantarero *et. al.*, 1999; Cicchino *et. al.*, 2010). En este sentido, varios autores reportaron mayores disminuciones en germoplasmas templados con respecto a los tropicales (Elings *et. al.*, 1997; Rattalino Edreira *et. al.*, 2011; Rattalino Edreira y Otegui 2012; Rattalino Edreira y Otegui 2013). Por el contrario, Neiff *et. al.* (2016) reportaron iguales o mayores reducciones de NG en el germoplasma tropical lo cual sugiere que no hay una generalidad en la respuesta a la tolerancia a estrés térmico en base al germoplasma, y por ende es necesario identificar el comportamiento de híbrido específico. No obstante, los datos de este trabajo deberían tomarse con prudencia debido a que los valores presentados en la Fig. 19 incluyen los efectos de altas densidades pudiendo estas haber generado un mayor impacto negativo en tropicales que en templados.

La captura de radiación del cultivo depende del área foliar, la cual puede ser modificada por la fecha de siembra, el ciclo y estructura foliar del genotipo, y prácticas de manejo como densidad poblacional y fertilización. Por ello, incrementos en la captura de radiación maximizarían el rendimiento siempre y cuando las condiciones ambientales sobre el cultivo no afecten la eficiencia de uso de radiación. Resultados obtenidos en el presente trabajo mostraron una vinculación positiva entre la TCC_{PC} y la eficiencia de uso de radiación (EUR). Las mayores variaciones en la EUR también estuvieron asociadas a cambios en la FS, alcanzando su máximo en Ene donde los híbridos TRO lograron la máxima eficiencia con poblaciones de 4 plantas m^{-2} , en tanto que TEM lo lograron con 6 plantas m^{-2} . El adelanto (Dic) o atraso (Feb) en las FS disminuyeron la EUR más en TRO que en TEM. El retraso de la fecha de siembra en general puede ser causante de reducciones en la EUR debido a temperaturas inferiores al óptimo (Cirilo y Andrade, 1996). Por otro lado, en fechas tempranas el cultivo estuvo sometido a episodios de altas temperaturas y elevado déficit de presión de vapor que al resultar en estrés térmico e hídrico producen una reducción en la eficiencia en el uso de la radiación (Rattalino Edreira y Otegui, 2012). De este modo, la falta de ajuste entre la interceptación de la radiación y la tasa de crecimiento durante el período crítico en las siembras de Diciembre pueden explicarse debido a caídas en la EUR por estrés térmico/hídrico.

Definir la densidad de siembra es otra de las prácticas comunes y de gran impacto para maximizar el rendimiento del cultivo dado que determina la capacidad de interceptar radiación y el NG potencial. Como era esperable, en el presente trabajo el aumento de la densidad incrementó IAF y RFAi. Por su parte TRO alcanzó mayores niveles de IAF y RFAi que TEM en todas las combinaciones evaluadas. Estos resultados coinciden con estudios anteriores donde se reportó que maíces tropicales registraron ciclos más largos, mayor área foliar y tamaño de panoja que los templados (Fischer y Palmer, 1984; Johnson *et al.*, 1986; Rattalino Edreira y Otegui, 2012).

No se encontró una interacción entre germoplasma y densidad poblacional para rendimiento en grano, lo cual es coincidente con otras experiencias que utilizaron germoplasma tropical y templado (Vega, 2011; Metzler et. al, 2007). En condiciones de máximo rendimiento (siembras de Enero) la densidad de siembra de 6 plantas m^{-2} fue significativamente más productiva que el resto. En cambio, en siembras de Dic y Feb la respuesta se modificó según el año considerado. Es así como durante el primer año las altas densidades incrementaron el número de granos y por ende alcanzaron mayor rendimiento a pesar de la reducción en el peso de granos (Graneros y Uhart, 2006; Vega, 2011). Lo contrario ocurrió en el segundo año con rendimientos máximos para TEM a 6 y 8 plantas m^{-2} en Dic y Feb, y a 4 y 6 plantas m^{-2} para TRO en Dic y Feb respectivamente. Varios autores han registrado reducciones en el rendimiento por planta e incrementos en su variabilidad cuando el cultivo sufrió estrés abiótico, los cuales podrían asociarse a incrementos en la densidad (Alessi y Power, 1976; Edmeades y Daynard, 1979; Borrás y Otegui 2001; Vega y Sadras, 2003; Maddonni y Otegui, 2004; Maddonni y Otegui, 2006; Pagano y Maddonni, 2007). Posiblemente el hecho de no tener una respuesta clara fue producto de la variación climática interanual por lo que deberían llevarse adelante nuevos experimentos para obtener recomendaciones más robustas. La densidad depende del híbrido y del ambiente, a mayor tolerancia a estrés del híbrido y mayor calidad de ambiente (i.e. mayor oferta de agua y nutrientes), la densidad óptima es mayor.

En la región occidental del NEA se experimenta una respuesta óptima del rendimiento a la fecha de siembra, donde en fechas tempranas y tardías los rendimientos fueron bajos y en fechas de Ene los rendimientos fueron los mayores por mayor fijación de granos.

Como estudios adicionales derivados de la realización de este trabajo, se propone avanzar en la definición de estrategias de manejo específicas para reducir riesgos de estrés hídrico y térmico durante el ciclo de cultivo. Es importante colocar especial énfasis en el manejo de nutrientes, la densidad poblacional y el espaciamiento entre hileras ante distintas fechas de siembra tanto estivales como a finales del invierno. Respecto a la probabilidad de estrés térmico, es necesario el estudio del comportamiento de nuevos híbridos tropicales y templados buscando la mayor tolerancia al mismo, así como estrategias de escape. La combinación de la mayor tolerancia a la competencia intraespecífica de los híbridos templados con la tolerancia a condiciones de altas temperaturas y a enfermedades del germoplasma tropical pueden incrementar el rendimiento alcanzable en condiciones de secano para la región occidental del NEA.

La información generada en este trabajo aporta conocimientos originales sobre la respuesta de germoplasma tropical y templado de maíz a fecha de siembra y densidad

poblacional en la región occidental del NEA, que adicionalmente puede ser utilizada para para robustecer y/o validar modelos de simulación de crecimiento y rendimiento de maíz.

Conclusiones

No existen diferencias entre genotipos tropicales y templados en las fechas de siembra y densidades poblacionales que permiten alcanzar los máximos rendimientos en grano de la región occidental del NEA.

La fecha de siembra en la que se lograron maximizar las tasas de crecimiento y por consiguiente los componentes de rendimiento fue la primera quincena de Enero, indistintamente el germoplasma seleccionado. Siembras previas y posteriores a la misma lograron menores rendimientos y la magnitud de la reducción dependió del germoplasma considerado, siendo los híbridos tropicales los que mayores reducciones mostraron.

Las siembras de Febrero restringieron el crecimiento, principalmente durante la etapa reproductiva dado que expusieron al cultivo a una menor oferta de radiación y temperatura. Por otro lado, las siembras de Diciembre ofrecieron un ambiente de mayor radiación, pero evidenciaron condiciones de elevadas temperaturas diarias durante el período crítico, afectando su crecimiento e impactando en el número final de granos producidos.

La densidad de 6 plantas m^{-2} fue en general la que mayores rendimientos alcanzó. Además, no se encontraron evidencias que indiquen una respuesta diferencial de los distintos germoplasmas a la densidad de siembra.

Los híbridos con germoplasma tropical fueron más eficientes en interceptar la radiación, sin embargo, los híbridos templados expresaron mayores eficiencias en la conversión y partición conduciéndolos a mayores rendimientos, mostrando un mayor avance en el mejoramiento de este tipo de germoplasmas.

Bibliografía

- ALESSI, J.; POWER, J.F. 1976. Water use by dryland corn as affected by maturity class and plant spacing. *Agronomy J.* 68:547-550.
- ALUKO, G. K. and K. FISCHER 1987. The effect of changes of assimilate supply around flowering on grain sink size and yield of maize (*Zea mays* L.) cultivars of tropical and temperate adaptation. *Australian Journal of Agricultural Research.* 39 (2): 153-161.
- ANDRADE, F.H. 1995. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. *Field Crop Res.* 41: 1–12.
- ANDRADE, F. H.; VEGA, C., UHART, S.; CIRILO, A.; CANTARERO, M.; VALENTINUZ, O. 1999. Kernel number determination in maize. *Crop Sci.* 39: 453-459.
- ANDRADE, F.H; CIRILO, A.G. 2002. Fecha de siembra y manejo de los cultivos. En: Andrade, F.H.; Sadras, V.O. (eds.) *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja.* E.E.A. Balcarce INTA – FCA, UNMdP. Balcarce, Argentina. pp.137-156.
- ANDRADE, F.H.; CIRILO, A.G.; UHART, S.A.; OTEGUI, M.E. 1996. *Ecofisiología del Cultivo de Maíz.* 1ª Ed. Editorial La Barrosa. Dekalb Press CERBAS-EEA INTA (Ed.) Balcarce, Argentina. 292 pp.
- ANDRADE, F.H.; UHART, S.A.; CIRILO, A. 1993. Temperature affects radiation use efficiency in maize. *Field Crops Res.* 32, 17–25.
- BIRCH, C.J., K.G. RICKERT and G.L. HAMMER, 1998. Modelling leaf production and crop development in maize (*Zea mays* L.) after tassel initiation under diverse conditions of temperature and photoperiod. *Field Crops Research* 58: 81-95.
- BLACKBURN W. J and PROCTOR T. A. (1983) Estimating photosynthetically active radiation from measured solar irradiance, *Solar Energy*, 31 (2), 233-234.
- BONHOMME, R., M. DERIEUX, J. R. KINIRY, G. O. EDMEADES and H. OZIER-LAFONTAINE. 1991. Maize leaf number sensitive in relation to photoperiod in multilocation field trials. *Agronomy Journal* 83:153-157.
- BORRÁS, L.; OTEGUI, M.E. 2001. Maize kernel weight response to postflowering source-sink ratio. *Crop Sci.* 41: 1816 – 1822.
- BOLSA DE CEREALES, 2018. [en línea]. Estimaciones Agrícolas Campaña 2017/18. Ing. P. A. M. Victoria Corte, Martín López; Dpto. Estimaciones Agrícolas 13 de Marzo de 2018. Sitio web: <http://www.bolsadecereales.com/imagenes/informes/2018-03/27-expoagro.2018.pdf>. [Fecha de búsqueda: 01/05/2018].
- CACERES DIAZ, R. O., G. HERRERA, D. PALAORO, M. LEIVA, M. ALVAREZ, D. ALCARAZ. 2008. Análisis Pluviométrico del Suroeste de la provincia del Chaco. Sitio web <http://www.inta.gov.ar/lasbrenas/info/documentos/>. [Fecha de búsqueda: 06/07/2010].

- CANTARERO, M. G.; CIRILO, A. G.; ANDRADE, F.H. 1999. Night temperature at silking affects kernel set in maize. *Crop Science*. 39: 703-710.
- CANTARERO, M.G.; LUQUE, S.F.; RUBIOLO, O.J. 2000. Effects of sowing date and plant density on grain number and yield of a maize hybrid in the central region of Cordoba, Argentina. *AgriScientia* 17:3-10.
- CASSMAN, K.G.; DOBERMANN, A.; WALTERS, D.T.; YANG, H. 2003. Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 2003. 28: 315–58.
- CICCHINO, M.; RATTALINO EDREIRA, J.I.; OTEGUI, M.E. 2010. Heat stress during late vegetative growth of maize: effects on phenology and assessment of optimum temperature. *Crop Sci.* 50, 1431–1437.
- CICCHINO, M.; RATTALINO EDREIRA, J.I.; URIBELARREA, M.; OTEGUI, M.E. 2010. Heat Stress in Field-Grown Maize: Response of Physiological Determinants of Grain Yield. *Crop Sci.* 50, 1438–1448.
- CIRILO, A.G.; ANDRADE, F.H. 1994. Sowing date and maize productivity. II. Kernel number determination. *Crop Sci.* 34, 1044-1046.
- CIRILO A. G.; F. H. ANDRADE 1996. Sowing date and kernel weight in maize. *Crop Sci.* 36:325-331.
- DI RIENZO J.A., CASANOVES F., BALZARINI M.G., GONZALEZ L., TABLADA M., ROBLEDO C.W. InfoStat version 2010. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- DIMSAT 2008, Diagnóstico por Imagen Satelital. Análisis de área de siembra para cultivo de maíz, soja, sorgo y girasol en la campaña 07/08 (Datos no publicados) Argentina.
- ECHARTE, L., LUQUE, S.; ANDRADE, F.H.; SADRAS, V.O.; CIRILO, A.; OTEGUI, M.E. y VEGA, C.R.C. 2000. Response of maize kernel number to plant density in Argentinean hybrids released between 1965 and 1993. *Field Crops Research* 68:1-8.
- EDMEADES, G.O.; DAYNARD, T.B. 1979. The development of plant-to-plant variability in maize at different planting densities. *Can. J. Plant Sci.* 59, 561-576.
- EDMEADES, G.O.; BÄNZIGER, M; MICKELSON, H.R.; PEÑA-VALDIVIA, C.B. 1996. Proceedings of a Symposium, March 25-29. Developing Drought and Low Nitrogen Tolerant Maize. CIMMYT, El Batán, México.
- EAA INTA Las Breñas. 2009. Boletín Meteorológico Mensual. Sitio web: <http://www.inta.gov.ar/lasbrenas/met/clima.html>. [Fecha de búsqueda 30 de junio de 2010].
- ELINGS, A., J.W. WHITE and G.O. EDMEADES. 1997. Options for breeding for greater maize yields in the tropics. *European Journal of Agronomy.* 7:119-132.

- ELLIS, R. H., R. J. SUMMERFIELD, G. O. EDMEADES and E. H. ROBERTS. 1992. Photoperiod, temperature, and the interval from sowing to tassel initiation in diverse cultivars of maize. *Crop Science*, 32:1225-1232.
- FAOSTAT, 2018. Maíz. Producción. Sitio web: [http://www-fao-org/faostat/es/#data/QC/visualize](http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC/visualize). [Fecha de búsqueda: 27 de marzo de 2018]
- FISCHER, K.S.; PALMER, A.F.E. 1984. Tropical maize. In: Goldsworthy PR and Fisher NM (Eds.), *The Physiology of Tropical Field Crops*. John Wiley & Sons, Chichester, England, pp. 213 – 248.
- GALLO, W.P., and C.S.T. DAUGHTRY. 1986. Techniques for measuring intercepted and absorbed photosynthetically active radiation in crop canopies. *Agron. J.* 78:752-756.
- GRANEROS, I.; UHART, S.A. 2006. Efecto de la distancia entre surcos y la densidad poblacional sobre el rendimiento de híbridos de maíz de diferente estructura de planta en el norte argentino. Disponible en: www.maizar.org.ar/documentos/dist_entre_surcos-dens-hib.doc
- HALL, A. J.; REBELLA, C.M.; GHERSA, C.M.; CULOT, J.P. 1992. Field-crops systems of the Pampas. In: Pearson CJ (Ed.) *Field Crop Ecosystem*. Elsevier, Amsterdam, pp 413-450.
- JOHNSON, E.C.; FISCHER, K.S.; EDMEADES, G.O.; PALMER, A.F.E. 1986. Recurrent Selection for Reduced Plant Height in Lowland Tropical Maize. *Crop Sci.* 26: 253 – 260.
- KIESELBACH, T. A. 1950. Progressive development and seasonal variations of the corn crop. *Nebraska Agricultural Experimental Station Research Bulletin*, 166.
- KINIRY, J. R. and R. BONHOMME. 1991. Predicting maize phenology. En: T. Hodges (ed.). *Predicting crop phenology*. CRC Press. Boca Raton, Ann Arbor. Boston. Pag. 115-131.
- LEDESMA, L.L. y ZURITA, J.J. 2004. Carta de Suelos de la República Argentina. Provincia del Chaco. Los Suelos del Departamento 9 de Julio. Convenio Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria - INTA. Gobierno de la Provincia del Chaco - Ministerio de la Producción. Edición Digital. INTA - EEA - Sáenz Peña, Provincia del Chaco - Argentina. 187 pp.
- LITTLE, T. M. and HILLS, F. J. 1979. Métodos estadísticos para la investigación en la agricultura. Editorial Trillas. México. Pag. 95-104.
- MADDONNI, G.A.; OTEGUI, M.E. 2004. Intra-specific competition in maize: early-determined hierarchies among plants affect final kernel set. *Field Crops Res.* 85, 1-13.
- MADDONNI, G.A.; OTEGUI, M.E. 2006. Intra-specific competition in maize: Contribution of extreme plant hierarchies to grain yield, grain yield components and kernel composition. *Field Crops Res.* 97, 155-166.

- MARCHAÕ, R. L., E. M. BRASIL and P. A. XIMENES. 2006. Interceptação da radiação fotossinteticamente ativa e rendimento de grãos do milho adensado. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v.5, n.2. Pag. 170-181.
- METZLER, M.J; VALENTINUZ, O.; UHART, S. 2007. Híbridos de maíz con germoplasma de origen tropical: ¿una opción para fechas tardías? *Actualización Técnica. Maíz, Girasol y Sorgo. Serie Extensión* nº 44.
- NEIFF, N; TRACHSEL, S; VALENTINUZ, O.R.; BALBI, C.N.; ANDRADE, F.H. 2016. High Temperatures around Flowering in Maize: Effects on Photosynthesis and Grain Yield in Three Genotypes. *Crop Sci.* 56:1–11 (2016).
- OTEGUI M.E., ANDRADE F.H. 2000. In: *Physiology and modeling kernel set in maize.* CSSA Special Publication N° 29, CSSA and ASA, Madison WI, USA. Págs. 89-102.
- OTEGUI, M.E.; LÓPEZ PEREIRA, M. 2003. Fecha de siembra. En: Satorre, E.H.; Benech-Arnold, R.; Slafer, G.A.; de la Fuente, E.B.; Miralles, D.J.; Otegui, M.E.; Savin, R. (Eds.). *Producción de granos: Bases funcionales para su manejo.* Editorial Facultad Agronomía-Universidad de Buenos Aires. Cap. 12. Pag. 257-275.
- PAGANO, E.; MADDONNI, G.A. 2007. Intra-specific competition in maize: early established hierarchies differ in plant growth and biomass partitioning to the ear around silking. *Field Crops Res.* 101, 306-320.
- PALIWAL, R.L.; GRANADOS, G.; LAFITTE, H.R.; VIOLIC, A.D. 2001. *El maíz en los trópicos: Mejoramiento y producción.* Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación. Roma. 334 pp.
- RATTALINO EDREIRA, J.I.; BUDAKLI CARPICI, E.; SAMMARRO, D.; OTEGUI, M.E. 2011. Heat stress effects around flowering on kernel set of temperate and tropical maize hybrids. *Field Crops Res.* 123, 62–73.
- RATTALINO EDREIRA, J. I.; OTEGUI, M. E. 2012. Heat stress in temperate and tropical maize hybrids: Differences in crop growth, biomass partitioning and reserves use. *Field Crops Research* 130:87-98.
- RATTALINO EDREIRA, J.I.; OTEGUI. M.E. 2013. Heat stress in temperate and tropical maize hybrids: A novel approach for assessing sources of kernel loss in field conditions. *Field Crops Res.* 142:58–67.
- RITCHIE, S.W.; HANWAY, J.J. 1982. How a corn plant develops. *Spec. Rep.* 48 (Rev. Feb. 1982). Iowa State Univ. Coop. Ext. Service, Ames, IA.
- RITCHIE, J.T.; NESMITH, D.S. (1991). Temperature and crop development, in: Hanks, J. y Ritchie, J.T. (Eds.), *Modelling plant and soil systems*, American society of agriculture, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison, WI. pp. 5-29.

- ROMANI M.R. 2016. Efecto de la época de siembra y la densidad poblacional sobre el desarrollo, crecimiento y rendimiento de híbridos de maíz con germoplasma tropical, tropical x templado y templado en el área de riego del Río Dulce, Santiago del Estero. Tesis presentada para optar al título de Magister de la Universidad de Buenos Aires, Área Producción Vegetal. Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano, Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina. 125 pp.
- ROOD S. B. and MAJOR D. J. 1980. Response of early corn inbreds to photoperiod. *Crop Science*, 20:679-682.
- SATORRE E.H; R. BENECH ARNOLD; G.A. SLAFER; E. B. DE LA FUENTE; D.J. MIRALLES; M.E. OTEGUI y R. SAVIN. 2003. Producción de Granos: Bases Funcionales para su Manejo. Editorial Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina.
- TOLLENAAR M. and A. AGUILERA. 1992. Radiation use efficiency of an old and a new maize hybrid. *Agronomy Journal* 84:536–541.
- TOLLENAAR, M.; DAYNARD, T.B.; HUNTER, R.B. 1979. Effect of temperature on rate of leaf appearance and flowering date in maize. *Crop Sci.* 19: 363 – 366.
- TOTIS DE ZELJKOVICH, L.E. ; REBELLA, C.M. 1980. Necesidades de agua de un cultivo de maíz en le región de Pergamino. En: AIANBA (eds.). Actas del II Congreso Nacional de Maíz. Pág. 211-219.
- UHART S.A. and F.H. ANDRADE. 1991. Source-sink relationship in maize grown in a cool temperate area. *Agronomy Journal*, 11:863-875.
- VALENTINUZ, O.R. 1997. Crecimiento y rendimiento potencial de híbridos de maíz con germoplasma de origen tropical y templado. VI Congreso Nacional de maíz. Pergamino. Noviembre, 1997.
- VEGA, C.R.C.; SADRAS, V.O. 2003. Size-dependent growth and the development of inequality in maize, sunflower and soybean. *Ann. Bot.* 91, 1-11.
- VEGA, C.R.C. 2011. Determinación del rendimiento de maíz ante modificaciones en el manejo de la sustentabilidad, distancia entre surcos y fecha de siembra. Análisis de campañas 2007 – 2010 de miembros de MAIZAR en el NOA. Buenos Aires (AR): MAIZAR. Asociación Maíz y Sorgo Argentino. 55 p. Disponible en: <http://www.maizar.org.ar/documentos/maizar%20noa.pdf>.
- VEGA, C.R.C.; ANDRADE, F.H. 2002. Densidad de plantas y espaciamiento entre hileras. En: Andrade, F.H.; Sadras, V.O. (eds.) Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. E.E.A. Balcarce INTA – FCA, UNMdP. Balcarce, Argentina. pp.137-156.
- WATSON, D.J., 1947. Comparative physiological studies in growth of field crops. I: Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Ann. Bot.*, 11: 41-76.