DETERMINANTES AMBIENTALES DEL RENDIMIENTO EN MAÍZ TARDÍO EN RECONQUISTA, SANTA FE

ENVIRONMENTAL DETERMINANTS OF YIELD IN LATE-SOWN MAIZE IN RECONQUISTA, SANTA FE

Scarpin G.; Szwarc D.; Simon, C.
Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Ruta 11 km 773, Santa Fe, Argentina|
scarpin.gonzalo@inta.gob.ar

ABSTRACT
In northern Santa Fe and northeastern Argentina (NEA), late-sown maize is used to shift the crop's critical period (CP) away from typical summer heat and water stress, yet the relative contribution of other phenological windows to yield has rarely been assessed in an integrated way. Using data from the Aapresid Late Maize Network, this study quantified the relationship between yield and environmental variables calculated for four phenological windows (vegetative, CP, grain filling, and total cycle) at the INTA Reconquista Experimental Station over five growing seasons (2020/21–2024/25), evaluating 14 to 21 commercial hybrids per season. Twenty-eight simple linear regression models (7 environmental variables × 4 windows) were fitted, excluding the 2023/24 season due to a severe *Dalbulus maidis* outbreak. Accumulated rainfall during the CP explained the largest share of interannual yield variability (R^2 = 0.95; p = 0.024), while the number of days with maximum temperatures above 35 °C and nights with minimum temperatures above 22 °C during grain filling showed significant negative associations (R^2 = 0.97 and 0.93, respectively). These results indicate that, beyond water availability around flowering, daytime and nighttime heat stress during grain filling is a key and previously underappreciated determinant of yield in late-sown maize in this region.

Palabras claves: rendimiento, variabilidad ambiental, maíz tardío, estrés térmico, llenado de grano.
Keywords: yield, environmental variability, late-sown maize, heat stress, grain filling.

INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays* L.) constituye uno de los principales cultivos de las rotaciones agrícolas del norte de Santa Fe y del noreste argentino (NEA), donde ocupa aproximadamente un millón de hectáreas. En esta región predominan las siembras tardías o de segunda, estrategia que permite desplazar el período crítico (PC) del cultivo para reducir la probabilidad de coincidencia con episodios de estrés hídrico y térmico frecuentes durante el verano (Kettler et al., 2025).
El PC comprende aproximadamente 400–450 grados día (°Cd) alrededor de la floración femenina y representa la etapa de mayor sensibilidad del cultivo al ambiente, ya que durante este período ocurren procesos determinantes para la definición del número final de granos, como el crecimiento de la espiga, la emisión de estigmas, la polinización,

la fecundación y el inicio del desarrollo del endosperma (Otegui y Andrade, 2000; Cerrudo et al., 2013). Sin embargo, en ambientes con elevada variabilidad interanual como el NEA, las condiciones ambientales registradas antes y después del PC también pueden modificar significativamente el rendimiento final (Neiff et al. 2016; Kettler et al, 2022; Kettler et al, 2024; Boscarino et al 2026).

En consecuencia, el rendimiento alcanzado en cada campaña no depende exclusivamente del ambiente durante el PC, sino de la combinación de las condiciones meteorológicas experimentadas a lo largo de las distintas etapas fenológicas. No obstante, la contribución relativa de estas ventanas climáticas ha sido escasamente evaluada de manera integrada en redes de ensayos multiambiente.

En este contexto, utilizando la información generada por la Red de Maíz Tardío de INTA-AAPRESID, el objetivo de este trabajo fue cuantificar la relación entre el rendimiento del maíz tardío y distintas variables ambientales calculadas para cuatro ventanas fenológicas del cultivo en Reconquista, Santa Fe.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los ensayos se realizaron en la Estación Experimental Agropecuaria INTA Reconquista (Santa Fe, Argentina) durante cinco campañas agrícolas consecutivas (2020/21–2024/25) con las siguientes fechas de siembra: 6/1/2021; 28/1/2022; 29/12/2022; 24/1/2024 y 27/12/2024. En cada campaña se evaluaron entre 14 y 21 híbridos comerciales pertenecientes a la Red de Maíz Tardío de Aapresid, totalizando 52 genotipos diferentes a lo largo del período de estudio. Los experimentos se condujeron bajo un diseño en bloques completos al azar con tres repeticiones y densidades de siembra ajustadas al manejo regional.

El desarrollo fenológico se determinó mediante tiempo térmico utilizando una temperatura base de 10 °C y una temperatura máxima de 30 °C (Ritchie y NeSmith, 1991). La emergencia (VE) se estableció al acumular 60 °Cd desde la siembra y, a partir de este punto, el ciclo se dividió en cuatro ventanas fenológicas:

- Vegetativa (Veg): desde VE hasta 700 °Cd.
- Período crítico (PC): entre 700 y 1100 °Cd, correspondiente aproximadamente al intervalo comprendido entre el inicio de la elongación de la espiga y el cuaje de granos (Kiniry y Ritchie, 1985; Cirilo y Andrade, 1994).
- Llenado de granos (LL): desde 900 °Cd hasta 130 días después de la emergencia (DDE). Se estableció este límite temporal debido a que la mayoría de los híbridos evaluados alcanzó la madurez fisiológica entre los 120 y 130 DDE, permitiendo incluir prácticamente la totalidad del período efectivo de llenado de granos.
- Ciclo total (CT): período comprendido entre VE y 130 DDE, considerado representativo del ciclo completo de los híbridos evaluados hasta la madurez fisiológica.

Para cada ventana fenológica se calcularon, a partir de la estación meteorológica de la EEA INTA Reconquista, las siguientes variables ambientales: precipitación acumulada (PP), radiación global acumulada (Rad), temperatura máxima media (Tmax), temperatura mínima media (Tmin), coeficiente fototermal (CFT) , calculado como el cociente entre la radiación solar incidente y la temperatura media por encima de una temperatura base, utilizado como un indicador de las condiciones ambientales para el

crecimiento y la definición del rendimiento, número de días con temperatura máxima superior a 35 °C y número de días con temperatura mínima superior a 22 °C.

Debido a la ocurrencia de una epifitia severa de *Dalbulus maidis*, la campaña 2023/24 fue excluida de los análisis de asociación entre variables ambientales y rendimiento, ya que la reducción generalizada de los rendimientos respondió principalmente a un factor biótico y no solo a las condiciones meteorológicas evaluadas. Para las cuatro campañas restantes, se calculó el rendimiento medio de cada campaña y éste se relacionó con cada variable ambiental estimada para las cuatro ventanas fenológicas mediante modelos de regresión lineal simple. En total se ajustaron 28 modelos (7 variables × 4 ventanas), obteniéndose para cada uno el coeficiente de determinación (R^2), el valor de p asociado a la pendiente y la ecuación de regresión. La ventana fenológica de mayor capacidad explicativa para cada variable se definió como aquella que presentó el mayor R^2 y una pendiente estadísticamente significativa ($p < 0,10$).

Adicionalmente, para cada campaña se ajustó un análisis de varianza considerando al híbrido como efecto fijo (rendimiento ~ híbrido), y las diferencias entre medias se determinaron mediante la prueba de Tukey HSD ($\alpha = 0,05$), identificando grupos de híbridos estadísticamente equivalentes. Todos los análisis estadísticos y la generación de figuras se realizaron utilizando el software R (R Core Team, 2025).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las condiciones ambientales presentaron una marcada variabilidad entre campañas y entre ventanas fenológicas (Tabla 1). La ocurrencia y magnitud de precipitaciones fue la variable con mayor amplitud de respuesta, destacándose la campaña 2021/22 por registrar las mayores precipitaciones durante las etapas vegetativa (298 mm) y período crítico (121 mm), mientras que 2024/25 presentó el menor acumulado en la etapa vegetativa (50 mm). Durante el llenado de granos, la mayor precipitación se observó en 2020/21 (189 mm), mientras que 2021/22 registró el menor valor (25 mm).

La radiación solar acumulada alcanzó sus valores más elevados en 2024/25 durante el ciclo completo (2506 MJ m^{-2}) y el llenado de granos (852 MJ m^{-2}), mientras que la campaña 2023/24 presentó los menores registros en la mayoría de las ventanas fenológicas. En cuanto a la temperatura, 2024/25 registró las mayores temperaturas máximas durante las etapas vegetativa (35.6 °C), período crítico (35.0 °C) y ciclo completo (31.5 °C), mientras que las temperaturas mínimas fueron más elevadas en 2023/24 durante la etapa vegetativa (21.9 °C) y en 2024/25 durante el período crítico (22.4 °C). Estos contrastes ambientales generaron un amplio rango de condiciones de crecimiento, constituyendo una base adecuada para evaluar la influencia de los factores climáticos sobre el rendimiento del cultivo.

Tabla 1. Caracterización climática interanual para cinco campañas agrícolas (2020/21 a 2024/25) en la EEA INTA Reconquista, Santa Fe. Las variables climatológicas se encuentran segmentadas por ventanas fenológicas específicas: Etapa Vegetativa (Veg), Período Crítico (PC), Llenado de Grano (LL) y Ciclo Total (CT).

Variable	Campaña	Ventanas fenológicas			
		Vegetativa (Veg)	Período crítico (PC)	Llenado de granos (LL)	Ciclo total (CT)
Coeficiente fototermal (CFT)	2020/21	1,1	0,9	0,9	1,0
	2021/22	0,9	1,0	1,2	1,0
	2022/23	1,0	0,9	0,8	0,9
	2023/24	0,9	0,8	0,9	0,9
	2024/25	1,1	0,9	0,8	0,9
Precipitación acumulada en mm (PP)	2020/21	254,0	117,1	188,6	559,7
	2021/22	298,0	121,0	24,9	425,4
	2022/23	140,1	72,9	117,2	330,2
	2023/24	200,8	84,3	77,5	361,9
	2024/25	49,9	118,4	137,7	306,0
Radiación global acumulada (MJ m^{-2})	2020/21	1103,7	557,6	696,5	2313,9
	2021/22	1018,0	597,0	426,7	2031,4
	2022/23	1109,1	557,6	819,4	2465,7
	2023/24	962,1	467,4	542,3	1945,2
	2024/25	1165,5	535,0	851,6	2505,9
Temperatura máxima media (°C)	2020/21	30,5	29,8	25,4	28,3
	2021/22	32,6	26,0	19,7	26,6
	2022/23	34,6	32,1	26,9	30,8
	2023/24	33,5	30,1	22,0	27,7
	2024/25	35,6	35,0	26,9	31,5
Temperatura mínima media (°C)	2020/21	19,6	18,1	13,4	16,8
	2021/22	18,9	14,2	8,1	14,0
	2022/23	20,5	19,9	15,7	18,3
	2023/24	21,9	20,0	12,0	17,1
	2024/25	20,8	22,4	15,3	18,6
N° días Temperatura máxima > 35°C	2020/21	3,0	0,0	0,0	3,0
	2021/22	20,0	0,0	0,0	20,0
	2022/23	30,0	12,0	4,0	46,0
	2023/24	18,0	6,0	0,0	23,0
	2024/25	25,0	16,0	1,0	41,0
N° días Temperatura mínima > 22°C	2020/21	9,0	2,0	1,0	12,0
	2021/22	7,0	1,0	0,0	8,0
	2022/23	17,0	7,0	12,0	35,0
	2023/24	24,0	11,0	1,0	35,0
	2024/25	17,0	17,0	0,0	33,0

Al evaluar las campañas individualmente (Figura 1), se observó que en 3 de los 5 años evaluados (2021/22, 2022/23 y 2023/24) el análisis ANOVA no detectó diferencias estadísticas significativas entre híbridos. Este fenómeno fue particularmente evidente en

escenarios de estrés severo: en la campaña 2023/24, la elevada presión biótica causada por *Dalbulus maidis* deprimió el rendimiento de todos los materiales, con techos productivos inferiores a 2000 kg ha^{-1}, reduciendo la expresión de las diferencias genéticas. De manera similar, las campañas 2021/22 y 2022/23 estuvieron condicionadas por limitaciones ambientales que restringieron la capacidad de discriminación entre híbridos.

Por el contrario, en las campañas con condiciones ambientales más favorables y mayores rendimientos promedio (2020/21 y 2024/25), se detectaron diferencias altamente significativas ($p < 0.001$), permitiendo una clara segregación y el establecimiento de un orden de mérito entre los materiales comerciales. Estos resultados indican que la expresión del potencial genético depende en gran medida de un ambiente que no limite el crecimiento del cultivo, ya que bajo condiciones favorables las diferencias entre híbridos se manifiestan con mayor claridad, mientras que en ambientes altamente restrictivos tienden a diluirse.

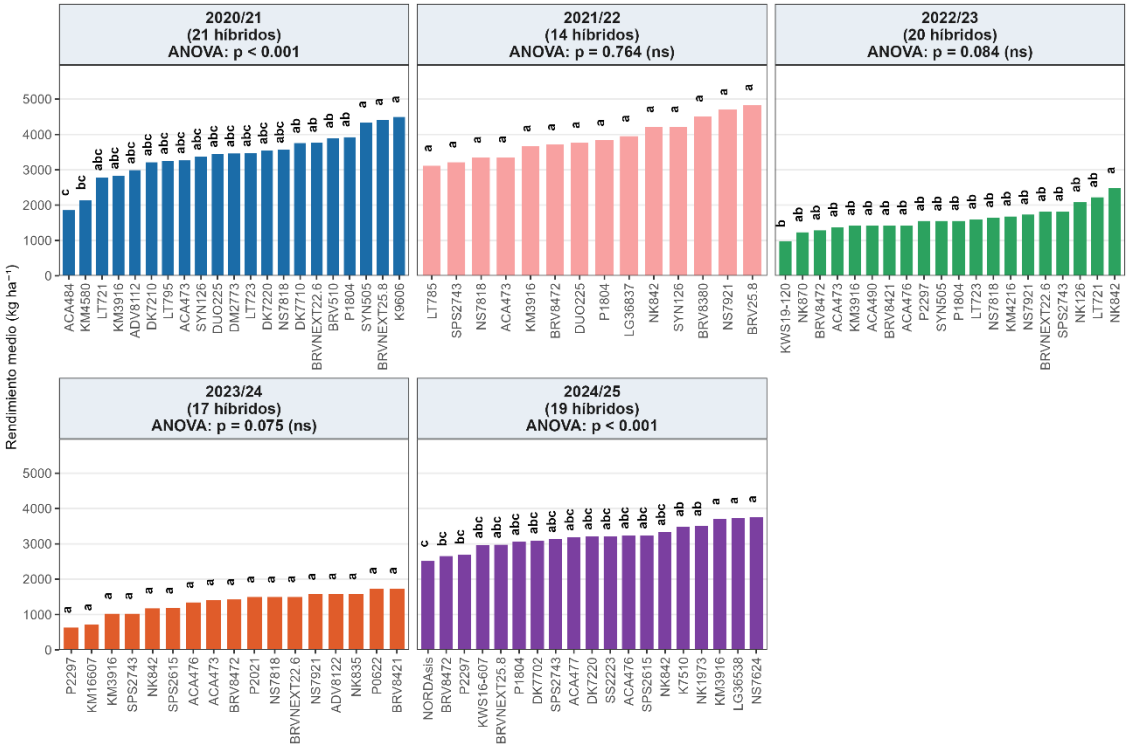

Figura 1. Rendimiento medio de grano (kg ha^{-1}) de los híbridos comerciales evaluados en la Red INTA-AAPRESID durante cinco campañas consecutivas. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas entre materiales dentro de una misma campaña según la prueba de Tukey HSD (alpha = 0.05). (ns: diferencias no significativas).

El análisis de regresión lineal evidenció que la asociación entre las variables ambientales y el rendimiento medio de cada campaña dependió tanto del factor climático considerado como de la etapa fenológica analizada (Tabla 2). De las siete variables evaluadas, únicamente tres presentaron asociaciones estadísticamente significativas ($p < 0,05$) con el rendimiento, y todas ellas correspondieron a ventanas fenológicas específicas.

La precipitación acumulada durante el período crítico mostró la mayor capacidad explicativa del rendimiento ($R^2 = 0,95$; $p = 0,024$), indicando una relación positiva entre la disponibilidad hídrica en esta etapa y el rendimiento alcanzado. En contraste, durante el llenado de granos, el número de días con temperaturas máximas superiores a 35 °C

(R^2 = 0,97; p = 0,017) y el número de días con temperaturas mínimas superiores a 22 °C (R^2 = 0,93; p = 0,037) presentaron asociaciones negativas con el rendimiento, evidenciando el efecto restrictivo del estrés térmico durante esta fase del cultivo.

Por el contrario, la radiación, las temperaturas máxima y mínima promedio y el coeficiente fototermal no mostraron relaciones significativas con el rendimiento en ninguna de las ventanas fenológicas evaluadas (p > 0,05), aunque algunas variables presentaron asociaciones moderadas durante el llenado de granos y el ciclo completo.

Tabla 2. Coeficientes de determinación (R^2) y niveles de significancia (p-valor) obtenidos mediante regresiones lineales simples entre el rendimiento medio del maíz tardío y las variables ambientales calculadas para cuatro ventanas fenológicas. Los análisis se realizaron utilizando las campañas agrícolas como unidad experimental (n = 4), excluyendo la campaña 2023/24 debido a la incidencia de Dalbulus maidis. Se indican con formato negrita y casillas resaltadas las regresiones significativas (p < 0,05).

Variable/Etapa	Cuenta	Vegetativa		Periodo Critico		Llenado de granos		Ciclo completo	
		P-valor	R^2	P-valor	R^2	P-valor	R^2	P-valor	R^2
Radiación	Suma	0,63	0,13	0,63	0,13	0,36	0,41	0,36	0,42
Temperatura máxima	Promedio	0,52	0,23	0,52	0,23	0,36	0,41	0,34	0,43
Coeficiente fototermal	Promedio	0,83	0,03	0,84	0,02	0,33	0,45	0,31	0,48
Temperatura mínima	Promedio	0,34	0,44	0,52	0,23	0,30	0,49	0,34	0,43
Precipitación	Suma	0,51	0,23	**0,02**	**0,95**	0,79	0,04	0,50	0,25
Días Tmáx > 35 °C	Número	0,41	0,35	0,42	0,33	**0,02**	**0,97**	0,31	0,47
Días Tmin > 22 °C	Número	0,26	0,55	0,76	0,06	**0,04**	**0,93**	0,22	0,47

La Figura 2 ilustra estas asociaciones utilizando las campañas normales, mientras que la campaña 2023/24, afectada por la epifitia de *Dalbulus maidis*, se presenta únicamente como referencia visual. A pesar de registrar valores ambientales comparables a los de otras campañas, su rendimiento se ubicó muy por debajo de la tendencia esperada, confirmando que la reducción productiva respondió principalmente al efecto del estrés biótico y justificando su exclusión de los modelos de regresión.

En conjunto, estos resultados indican que el rendimiento no estuvo determinado exclusivamente por las condiciones ambientales del período crítico, sino también por el ambiente durante el llenado de granos, donde el estrés térmico explicó una elevada proporción de la variabilidad observada entre campañas. En conjunto, estos resultados indican que, además de la disponibilidad hídrica durante el período crítico, las condiciones térmicas durante el llenado de granos desempeñaron un papel determinante en la explicación de la variabilidad interanual del rendimiento del maíz tardío en el norte de Santa Fe.

Estos resultados muestran que la mirada tradicional, centrada exclusivamente en el período crítico del cultivo, resulta insuficiente para caracterizar la respuesta ambiental de las siembras tardías. Si bien la disponibilidad hídrica durante floración continúa

siendo uno de los principales determinantes del rendimiento, el estrés térmico durante el llenado de granos —tanto por elevadas temperaturas máximas como mínimas— emergió como una restricción de magnitud comparable. Este efecto probablemente se asocia con una reducción de la duración efectiva del período de llenado, una aceleración de la senescencia y un incremento de los costos respiratorios de mantenimiento, disminuyendo la acumulación neta de fotoasimilados en los granos. En conjunto, estos resultados indican que, en ambientes de siembra tardía del NEA, el rendimiento no depende únicamente de las condiciones ambientales durante la definición del número de granos, sino también de aquellas que determinan su posterior llenado. Esta evidencia amplía el enfoque tradicional de análisis del rendimiento, resaltando la necesidad de considerar ambas etapas fenológicas para comprender la variabilidad productiva y mejorar la predicción del comportamiento de los cultivos bajo escenarios de creciente variabilidad climática, tal como ha sido señalado en estudios recientes realizados en la región (Neiff et al., 2016; Kettler et al., 2022; Kettler et al., 2024). Estos hallazgos sugieren que las estrategias de manejo orientadas a mitigar riesgo climático en maíz tardío del NEA (fecha de siembra, elección de ciclo, ambientes de multiambiente) deberían considerar no solo el desplazamiento del período crítico, sino también la exposición térmica durante el llenado de granos (Kettler et al., 2025).

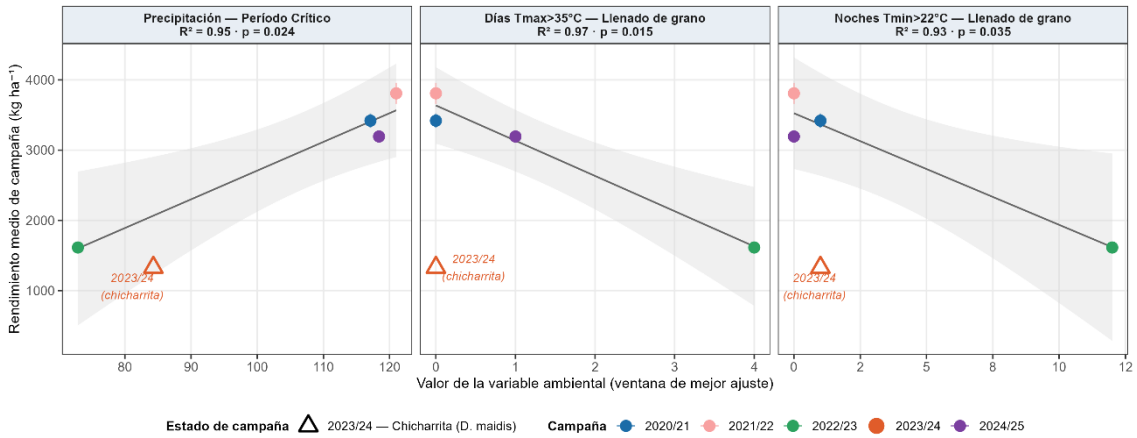

Figura 2. Modelos de regresión lineal simple entre el rendimiento medio de la campaña (kg ha⁻¹) y las tres variables ambientales de mayor peso predictivo surgidas del análisis cuantitativo: Precipitación acumulada en Período Crítico (izquierda), Días con Tmax > 35°C en Llenado de Grano (centro) y Noches con Tmin > 22°C en Llenado de Grano (derecha). Los sombreados grises representan el intervalo de confianza del 95%.

Por ultimo, es importante señalar algunas limitaciones del presente análisis. En primer lugar, las regresiones ambiente-rendimiento se ajustaron con un número reducido de campañas (n = 4), por lo que los valores de R^2 obtenidos, aunque elevados, deben interpretarse con cautela y ser validados con series más largas o incorporando otros sitios de la red. En segundo lugar, la precipitación acumulada se utilizó directamente como disponibilidad hídrica, sin considerar la reserva de agua útil en el suelo ni el balance hídrico del cultivo, por lo que su relación con el rendimiento podría estar subestimada o sobreestimada según las condiciones edáficas particulares de cada campaña. Finalmente, los resultados corresponden a un único ambiente (Reconquista), por lo que su extrapolación a otras localidades del NEA con distinta variabilidad climática y edáfica requiere validación adicional.

CONCLUSIONES

En el norte de Santa Fe, el rendimiento del maíz tardío estuvo condicionado principalmente por la variabilidad meteorológica interanual, cuyo efecto superó al de la elección del híbrido comercial: en campañas con limitantes severas —térmicas o bióticas, como el achaparramiento por *Dalbulus maidis*— las diferencias genotípicas se anularon, homogeneizando los rendimientos hacia valores bajos, mientras que en ambientes favorables el potencial genético de los híbridos se expresó con claridad.
Dado el tamaño acotado de la serie analizada (n = 4 campañas para los modelos de regresión), se recomienda validar estas relaciones incorporando más años, sitios de la red y modelos de simulación de cultivo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrade, F. H., Cirilo, A. G., & Echarte, L. (2024). Factors affecting kernel number in maize. In *Physiological bases for maize improvement* (pp. 59-74).

Boscarino, S., Echarte, L., Kettler, B. A., Sonzogni, F. D. N., & Neiff, N. (2026). Grain yield response to combined heat stress and low water availability in temperate and temperate× tropical maize hybrids. *Field Crops Research*, *345*, 110573.

Cerrudo, A., Di Matteo, J., Fernandez, E., Robles, M., Pico, L. O., & Andrade, F. H. (2013). Yield components of maize as affected by short shading periods and thinning. *Crop & Pasture Science*, *64*(6), 580-587.

Kettler, B. A., Carrera, C. S., Nalli Sonzogni, F. D., Trachsel, S., Andrade, F. H., & Neiff, N. (2022). High night temperature during maize post-flowering increases night respiration and reduces photosynthesis, growth and kernel number. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *208*(3), 335-347.

Kettler, B. A., Carrera, C. S., Nalli Sonzogni, F. D., Andrade, F. H., & Neiff, N. (2024). Maize responses to high night temperature during postflowering and early grain filling: effects on yield components, kernel growth and dry matter allocation. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *210*(5), e12741.

Kettler, B. A., Nalli Sonzogni, F. D., Neiff, N., Boscarino, S., & Maddonni, G. Á. (2025). Climatic constraints for rainfed maize production in the Northeastern subtropical region of Argentina. Theoretical and Applied Climatology, 156(6), 313.

Kiniry, J. R., & Ritchie, J. T. (1985). Shade-Sensitive Interval of Kernel Number of Maize 1. *Agronomy Journal*, *77*(5), 711-715.

Neiff, N., Trachsel, S., Valentinuz, O.R., Balbi, C.N. and Andrade, F.H. (2016), High Temperatures around Flowering in Maize: Effects on Photosynthesis and Grain Yield in Three Genotypes. Crop Science, 56: 2702-2712. https://doi.org/10.2135/cropsci2015.12.0755

Otegui, M. E., & Andrade, F. H. (2000). New relationships between light interception, ear growth, and kernel set in maize. *Physiology and modeling kernel set in maize*, *29*, 89-102.

R Core Team (2025). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. https://www.R-project.org/.

Ritchie, J. T., & Nesmith, D. S. (1991). Temperature and crop development. *Modeling plant and soil systems*, *31*, 5-29.