



50 AÑOS
PENSANDO
EL FUTURO

XIII
CONGRESO
NACIONAL
DE MAÍZ

OPTIMIZACIÓN DE LA DENSIDAD DE PLANTAS EN MAÍZ (*Zea mays* L.) DE SIEMBRA TEMPRANA Y TARDÍA BAJO DISTINTAS FASES DEL ENSO

Beheran, S.¹; Mercau, J.L.²; Casal, J.J.^{3,4}; Cagnola, J.I.^{1,4*}

¹ Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, Departamento de Producción Vegetal, Cátedra de Cultivos Industriales, Av. San Martín 4453, C1417DSE, Buenos Aires, Argentina.

² INTA, Agencia de Extensión San Luis, San Luis, Argentina.

³ Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, Departamento de Biología aplicada y alimentos, Cátedra de Fisiología Vegetal, Av. San Martín 4453, C1417DSE, Buenos Aires, Argentina.

⁴ Facultad de Agronomía, IFEVA, Universidad de Buenos Aires, CONICET, Buenos Aires, Argentina.

*cagnola@agro.uba.ar

OPTIMIZING PLANT DENSITY IN EARLY- AND LATE-SOWN MAIZE (*Zea mays* L.) ACROSS ENSO PHASES

Plant density is one of the management factors that most strongly affects maize (*Zea mays* L.) grain yield, particularly under variable water availability in rainfed systems. This study evaluated how ENSO phase (El Niño or La Niña) and sowing date (early or late) modify the economic optimum density (EOD) of maize in the core maize-growing region of Argentina. Two complementary databases were used: the first consisted of producer records from CREA farms in the study region, while the second was generated through simulations with the CSM-IXIM model within DSSAT v4.8, using 50 years of climate records from Pergamino (Buenos Aires) and three initial water scenarios (potential, wet and dry). Early sowings showed higher potential yields but greater sensitivity to water availability and ENSO phase. In La Niña years, EOD decreased by up to 16% under dry scenarios, reflecting the need to reduce inter-plant competition. Late sowings showed more stable yields across ENSO phases, with less variable optimum densities and lower risk of water stress. These results indicate that plant density should be adjusted according to sowing date, water scenario and ENSO phase rather than applied as a fixed recommendation. Integrating producer databases, seasonal climate information and crop simulation models may improve density recommendations and reduce production uncertainty in maize.

Palabras clave: El Niño; La Niña; manejo del agua.

Keywords: El Niño; La Niña; water management.

INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays* L.) es un pilar de la economía argentina: en la campaña 2022/2023 el país produjo cerca de 56 millones de toneladas, posicionándose como tercer exportador mundial detrás de Estados Unidos y Brasil (FAOSTAT, 2024). Parte de la producción se destina al consumo interno como alimento balanceado para ganado, además de su relevancia en la exportación y en la seguridad alimentaria global, cuya demanda crece de la mano del aumento poblacional y del consumo de proteína animal (Ray et al., 2013).



En las zonas templadas de Argentina (30° - 40° S, 58° - 62° O) el cultivo se realiza principalmente en secano y a gran escala, con dos ventanas de siembra: la temprana (fines de septiembre a fines de octubre) y la tardía (fines de noviembre a fines de diciembre) (Otegui et al., 2021). Durante el período crítico (30 días centrados en floración) cualquier caída en la tasa de crecimiento reduce el número de granos y el rendimiento final (Andrade et al., 2005; Vega et al., 2001). Las siembras tempranas suelen lograr mayor rendimiento potencial por mejores condiciones de radiación y temperatura durante ese período, pero enfrentan mayor demanda atmosférica y riesgo de déficit hídrico (Maddonni, 2012; Mercau y Otegui, 2014). Las tardías, en cambio, exploran menor radiación y temperatura (y por lo tanto menor rendimiento potencial) aunque con menor probabilidad de estrés hídrico y rendimientos más estables entre campañas (Bonelli et al., 2016). Esta práctica se difundió fuertemente en los últimos 15 años y hoy ocupa cerca del 50% del área sembrada en la zona núcleo maicera (Otegui et al., 2021).

La densidad de siembra es otra decisión de manejo determinante del rendimiento (Andrade et al., 2023). Existe una densidad óptima que maximiza el rendimiento por unidad de superficie (Tn/ha). Densidades por debajo del óptimo disminuyen el rendimiento por área debido a que las plantas no logran interceptar toda la radiación disponible. Densidades por encima del óptimo aumentan la competencia intraespecífica y la esterilidad de plantas, causando mermas en rendimiento por área también (Maddonni et al., 2001; Vega et al., 2001). En la práctica, las densidades habituales oscilan entre 60.000 y 80.000 plantas/ha en siembras tempranas y entre 50.000 y 65.000 en tardías (Di Mauro et al., 2025) debido a la suposición de que las fechas tardías siempre ofrecen menos recursos que las fechas tempranas.

A esto se suma el fenómeno *ENSO* (El Niño-Oscilación del Sur), que a través de sus fases El Niño (calentamiento anómalo del Pacífico ecuatorial, mayor oferta de lluvias) y La Niña (enfriamiento, menor oferta de lluvias) modifica de forma cíclica y pronosticable la disponibilidad hídrica de cada campaña de maíz (Di Mauro et al., 2022; Bert et al., 2006). Se desconoce, sin embargo, cómo debería ajustarse la densidad de siembra al combinar fecha de siembra (temprana o tardía) con la fase *ENSO* esperada, sobre todo en siembras tardías, de incorporación más reciente. El objetivo de este trabajo fue determinar la densidad óptima económica (DOE) de siembra de maíz en planteos tempranos y tardíos bajo distintos escenarios de fase *ENSO* en la zona núcleo maicera de Argentina, y evaluar la necesidad de ajustarla según el ambiente hídrico esperado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó una base de datos del Consorcio Regional de Experimentación Agrícola (CREA) con rendimientos, densidad y fecha de siembra ('temprana': antes del 15 de noviembre; 'tardía': después de esa fecha) de productores de la zona núcleo maicera (sur de Santa Fe, norte de Buenos Aires y sur de Córdoba) de 14 campañas desde 2007 hasta 2021, la cual incluyó años Niño y Niña.

Para las simulaciones se empleó el modelo de cultivo *CSM-IXIM* integrado al sistema *DSSAT v4.8* (Lizaso et al., 2005, 2011, 2017, 2018), que reproduce la dinámica del suelo (agua, nitrógeno, fósforo y carbono orgánico) y el crecimiento y desarrollo del cultivo a partir del balance diario entre fotosíntesis y respiración (Lizaso et al., 2022). El modelo estima el efecto de la densidad de siembra a partir de la sumatoria del

comportamiento de cada planta según los recursos disponibles (radiación, agua y nutrientes); las simulaciones descartaron limitaciones nutricionales.

Se utilizaron 50 años de registros climáticos diarios (radiación, temperaturas máxima y mínima, precipitaciones) de Pergamino (33°54' S, 60°39' O), localidad representativa de la zona núcleo maicera de Argentina. Se simularon dos fechas de siembra (temprana: 29 de septiembre; tardía: 18 de diciembre), seis densidades de plantas dentro del rango utilizado por productores (4; 5,5; 7; 8,5; 10 y 11,5 plantas/m²) y tres escenarios hídricos iniciales: potencial (sin limitaciones de agua), húmedo (perfil cargado al 75% a la siembra) y seco (perfil cargado al 25% a la siembra), en ambos casos sumando el agua aportada por las precipitaciones históricas. La variable de salida fue rendimiento.

Los años Niño y Niña de la serie histórica se identificaron a partir del Índice Oceánico Niño (ONI) del *Climate Prediction Center*, descartando los años neutros. Para cada combinación de "fecha de siembra × escenario hídrico × fase ENSO" se ajustó una función cuadrática entre el rendimiento (y) y la densidad de siembra (x): $y = ax^2 + bx + c$ [Ecuación 1]. A partir de su derivada primera, $y' = 2ax + b$ [Ecuación 2], se obtuvo el incremento marginal de rendimiento por planta agregada. Este incremento se valorizó con un precio de maíz de 142 U\$S/Tn percibido por el productor (promedio de los últimos diez años en Rosario, descontando 20% de flete y comercialización; MAGyP), obteniéndose una función lineal entre el beneficio marginal (y) y la densidad (x): $y = ax + b$ [Ecuación 3]. La densidad óptima económica (DOE) se definió como aquella en la que el beneficio del incremento marginal iguala al costo de agregar una semilla por m² (18,8-23,7 U\$S/ha, según un costo de bolsa de 150-190 U\$S cada 80.000 semillas).

RESULTADOS

Los registros de productores CREA (Figura 1) muestran que el rendimiento promedio en fechas tempranas es significativamente mayor en años Niño que en años Niña, incluso con una menor variabilidad. El mismo patrón también se observa (aunque con menor magnitud) en fechas tardías, lo que sugiere que el impacto del ENSO es más marcado en siembras tempranas (mayor variabilidad). Las densidades utilizadas por los productores son mayores en fechas tempranas que en tardías, y no varían según la fase ENSO, indicando la falta de reacción de los productores ante la señal de la condición del año.

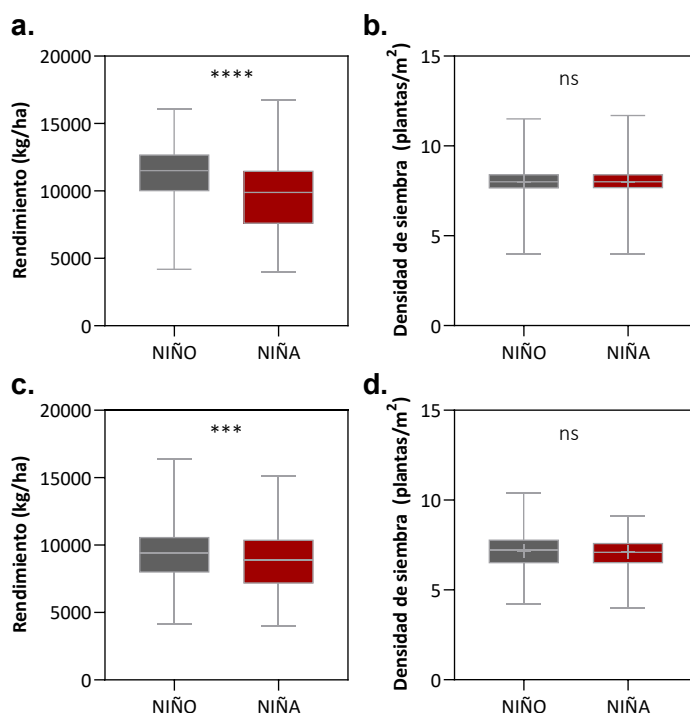


Figura 1: Rendimiento obtenido y densidad de siembra utilizada en fechas tempranas (a y b) y tardías (c y d) por productores de la zona núcleo maicera, diferenciando campañas Niño (negro) y Niña (rojo). Fuente de datos: CREA.

El registro climático de 50 años de Pergamino no mostró diferencias en la oferta de radiación ni en la temperatura entre años Niño y Niña; sí varió la fenología simulada según la fecha de siembra, con mayor duración de la etapa vegetativa y menor de la reproductiva en siembras tempranas respecto de las tardías.

Las simulaciones (Figura 2) muestran una respuesta del rendimiento a la densidad con un *plateau*, cuya altura y densidad óptima varían según la combinación "fecha de siembra × escenario hídrico × fase ENSO". En condiciones potenciales (sin restricciones hídricas), los rendimientos máximos fueron mayores en siembras tempranas que en tardías (16.000 y 15.000 kg/ha, respectivamente) y no se observaron diferencias entre fases ENSO. En escenarios húmedos y secos, en cambio, la fase ENSO tuvo mayor incidencia, dependiendo de la fecha de siembra: en siembras tempranas los años Niño superaron a los Niña en ambos escenarios, mientras que en siembras tardías el efecto del ENSO se redujo y, bajo años Niña, el rendimiento fue similar o incluso mayor que en tempranas, independientemente del agua inicial del suelo.



50 AÑOS
PENSANDO
EL FUTURO

XIII
CONGRESO
NACIONAL
DE MAÍZ

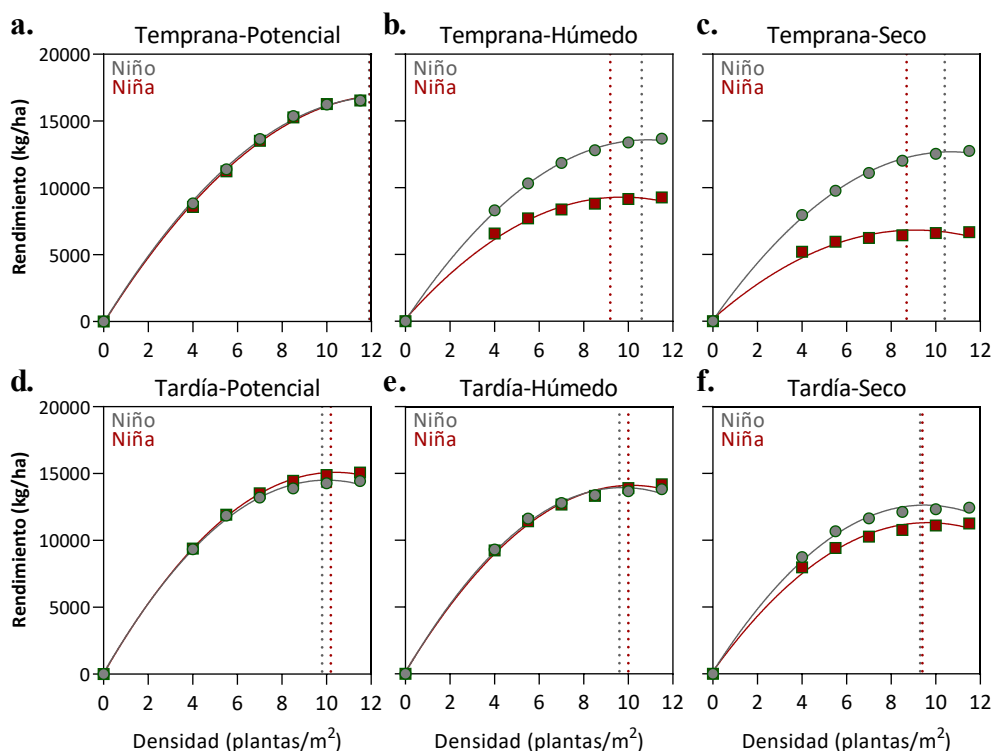


Figura 2: Rendimiento simulado en función de la densidad de siembra en Pergamino según 50 años de registro climático. a-c: fechas tempranas; d-f: fechas tardías. Escenarios potenciales (a, d), húmedos (b, e) y secos (c, f). Años Niño (negro) y Niña (rojo). Las líneas verticales indican la densidad óptima económica (DOE).

La DOE varió entre 8,7 y 12,5 pl/m² según la combinación evaluada (Tabla 1). En escenarios potenciales la DOE no cambió con la fase *ENSO*, pero fue menor en siembras tardías que en tempranas. En escenarios húmedos y secos, la DOE de siembras tempranas fue mayor que la de tardías únicamente en años Niño. Bajo una estrategia temprana, la DOE en años Niña se redujo un 10% en escenarios húmedos y hasta un 16% en escenarios secos respecto de años Niño, mientras que bajo una estrategia tardía la DOE no se modificó por la fase *ENSO*.



			Parámetros de la Ecuación 3		DOE según costo de semilla (pl/m ²)		DOE promedio (pl/m ²)	Cambio en la DOE según ENSO (%)
Escenario hídrico	Fecha de siembra	Fase ENSO	a	b	18.8 U\$S/ha	23.7 U\$S/ha		
POTENCIAL	TEMPRANO	NIÑO	-38.8	483.3	12.0	11.8	11.9	5.4
		NIÑA	-36.7	472.8	12.5	12.5	12.5	
	TARDÍO	NIÑO	-51.3	513.7	9.8	9.8	9.8	4.3
		NIÑA	-49.7	515.9	10.2	10.2	10.2	
HÚMEDO	TEMPRANO	NIÑO	-40.8	443.2	10.6	10.6	10.6	-11.3
		NIÑA	-34.4	334.3	9.4	9.4	9.4	
	TARDÍO	NIÑO	-51.8	505.3	9.6	9.6	9.6	4.1
		NIÑA	-48.2	490	10.0	10.0	10.0	
SECO	TEMPRANO	NIÑO	-39.4	420.6	10.4	10.4	10.4	-16.3
		NIÑA	-28.7	260.4	8.7	8.7	8.7	
	TARDÍO	NIÑO	-49.2	467.6	9.3	9.3	9.3	1.1
		NIÑA	-42.6	411	9.4	9.4	9.4	

Tabla 1: Efecto de la fase ENSO sobre la densidad óptima económica (DOE, rango general 8,7-12,5 pl/m²) según fecha de siembra y escenario hídrico, calculada a partir del beneficio del incremento marginal de rendimiento (Ecuación 3).

DISCUSIÓN

En ausencia de limitaciones hídricas, las siembras tempranas expresaron mayor rendimiento potencial que las tardías, en coincidencia con la mejor sincronización entre el período crítico y las condiciones foto-termales óptimas. En condiciones no potenciales (húmedo o seco) las simulaciones reflejan similares o mayores rendimientos de las fechas tardías en comparación a las tempranas. Estos resultados coinciden con los reportados por Otegui et al. (2021), aunque difieren de los registros de productores CREA que muestran la tendencia opuesta (tempranas > tardías). Esta discrepancia podría vincularse a una fertilización nitrogenada más ajustada en siembras tardías (Gambin et al., 2016), práctica habitual para reducir costos, que el modelo (al no contemplar restricciones nutricionales) no reproduce.

Respecto de la fase ENSO, los datos de productores confirman menores rendimientos en años Niña (en línea con Bert et al., 2012), aunque sin evidencia de ajustes de densidad asociados a dicho pronóstico, posiblemente por desconocimiento o desconfianza en la herramienta. Las simulaciones validan la conveniencia de reducir la densidad en años Niña, con una magnitud que depende fuertemente de la fecha de siembra: en siembras tempranas, la menor oferta hídrica en años Niña justifica reducir la densidad en torno al 11% para disminuir la competencia intraespecífica y sostener la tasa de crecimiento por planta durante el período crítico (Vega et al., 2001), reducción que se acentúa con perfiles de suelo secos. En siembras tardías, en cambio, la fase ENSO no modifica sustancialmente las condiciones hídricas del período crítico y la DOE no requiere ajustes relevantes (Cagnola et al., 2024; Mercu y Otegui, 2014).

En conjunto, estos resultados indican que la densidad de siembra no debería fijarse de manera única, sino ajustarse según el ambiente pronosticado (fase ENSO) y la disponibilidad inicial de agua en el suelo, siendo la fecha de siembra tardía una herramienta de manejo particularmente robusta frente a la variabilidad climática interanual, que amortigua el riesgo productivo sin penalizar significativamente la productividad media.

CONCLUSIÓN

Es habitual que los productores reduzcan la densidad de siembra tanto en maíces tardíos como en años Niña, asumiendo en ambos casos una menor productividad esperada. Sin embargo, los resultados de este trabajo muestran que esa estrategia no siempre es válida: en maíz temprano, reducir la densidad en años Niña resulta beneficioso para disminuir la competencia por recursos, pero en maíz tardío bajar la densidad no aporta ventajas y puede incluso desaprovechar el potencial productivo del lote. La densidad óptima de siembra debe definirse, por lo tanto, a partir de un análisis conjunto de la fecha de siembra, el escenario hídrico esperado y la fase *ENSO* pronosticada, y no de manera fija según la fecha de siembra o el tipo de campaña.

BIBLIOGRAFÍA

- Andrade, F.H.; Cirilo, A.G.; Uhart, S.** (2023) Ecofisiología y manejo del cultivo de maíz. MAIZAR, Asociación Maíz y Sorgo Argentino.
- Andrade, F.H.; Sadras, V.O.; Vega, C.R.C.; Echarte, L.** (2005) Physiological determinants of crop growth and yield in maize, sunflower and soybean. *J Crop Improv*, 14, 51-101.
- Bert, F.E.; Satorre, E.H.; Ruíz Toranza, F.; Podestá, G.P.** (2006) Climatic information and decision-making in maize crop production systems of the Argentinean Pampas. *Agricultural Systems*, 88, 180-204.
- Bonelli, L.E.; Monzon, J.P.; Cerrudo, A.; Rizzalli, R.H.; Andrade, F.H.** (2016) Maize grain yield components and source-sink relationship as affected by the delay in sowing date. *Field Crops Res*, 198, 215-225.
- Cagnola, J.I.; D'Andrea, K.E.; Rotili, D.H.; Mercáu, J.L.; Ploschuk, E.L.; Maddonni, G.A.; Otegui, M.E.; Casal, J.J.** (2024) Eco-physiology of maize crops under combined stresses. *The Plant Journal*, 117, 1856-1872.
- Di Mauro, G.; Rotili, D.H.; Parra, G.; Gambin, B.L.; Costanzi, J.; Micheloud, J.; Martini, G.; Paolini, M.; Schwalbert, R.** (2025) Revisiting plant density by environment interaction in maize across contrasting sowing dates. *Field Crops Research*, 328.
- FAOSTAT** (2024) FAOSTAT. Disponible en: <http://www.fao.org/faostat/>.
- Gambin, B.L.; Coyos, T.; Di Mauro, G.; Borrás, L.; Garibaldi, L.A.** (2016) Exploring genotype, management, and environmental variables influencing grain yield of late-sown maize in central Argentina. *Agricultural Systems*, 146, 11-19.
- Lizaso, J.I.; Boote, K.J.; Jones, J.W.; Porter, C.H.; Echarte, L.; Westgate, M.E.; Sonohat, G.** (2011) CSM-IXIM: A New Maize Simulation Model for DSSAT Version 4.5. *Agron J*, 103, 766-779.
- Maddonni, G.A.** (2012) Analysis of the climatic constraints to maize production in the current agricultural region of Argentina - a probabilistic approach. *Theor Appl Climatol*, 107, 325-345.
- Maddonni, G.A.; Otegui, M.E.; Cirilo, A.G.** (2001) Plant population density, row spacing and hybrid effects on maize canopy architecture and light attenuation. *Field Crops Res*, 71, 183-193.
- Mercáu, J.L.; Otegui, M.E.** (2014) A modeling approach to explore water management strategies for late-sown maize and double-cropped wheat-maize in the rainfed Pampas region of Argentina. *Practical Applications of Agricultural System Models to Optimize the Use of Limited Water*, 351-374.
- Otegui, M.E.; Riglos, M.; Mercáu, J.L.** (2021) Genetically modified maize hybrids and delayed sowing reduced drought effects across a rainfall gradient in temperate Argentina. *J Exp Bot*, 72, 5180-5188.
- Ray, D.K.; Mueller, N.D.; West, P.C.; Foley, J.A.** (2013) Yield trends are insufficient to double global crop production by 2050. *PLoS One*, 8.
- Vega, C.R.C.; Andrade, F.H.; Sadras, V.O.; Uhart, S.A.; Valentinuz, O.R.** (2001) Seed number as a function of growth. A comparative study in soybean, sunflower, and maize. *Crop Sci*, 41,



50 AÑOS
PENSANDO
EL FUTURO

XIII CONGRESO NACIONAL DE MAÍZ

