



Opinión

Manejo de la estructura óptima del cultivo de maíz (fecha, densidad y genotipo) en ambientes marginales de producción de Argentina. Principales hallazgos del Grupo de estudio y trabajo “Red de ultra baja densidad de maíz”

Gustavo Angel Maddonni¹ 

¹Cátedra de Cerealicultura, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Argentina. Instituto de Investigaciones Fisiológicas y Ecológicas Vinculadas a la Agricultura. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (IFEVA-CONICET), Buenos Aires, Argentina.

ORCID Autor: <https://orcid.org/0000-0002-3467-4412>

Autor para correspondencia:

Correo electrónico: maddonni@agro.uba.ar (Gustavo Angel Maddonni)

Abstract

Over the last decades, maize (*Zea mays*, L.) production in Argentina has undergone a remarkable territorial expansion, leading to a sustained increase in national grain production through the incorporation of regions characterized by greater water, thermal, and edaphic constraints. Under these conditions, optimizing crop structure has become a key management strategy to reduce yield gaps and improve production stability. This paper synthesizes the main advances achieved by the UBA Maize Network, an interdisciplinary and interinstitutional initiative established to generate scientific knowledge on maize management in marginal production environments. Multi-environment experiments conducted across diverse agroecological regions of Argentina evaluated the interactions among sowing date, plant density, and maize phenotypes differing in vegetative and reproductive plasticity, including prolific and tillering hybrids. Results indicate that the optimal crop structure is strongly dependent on the productive potential and the predominant environmental constraints of each production environment. Under conditions of limited water availability, lower plant densities increased resource availability per plant and promoted the expression of reproductive plasticity mechanisms, whereas higher plant densities and less plastic phenotypes maximized grain yield in high-yielding environments. Overall, the information generated provides a scientific basis for developing environment-specific management strategies that enhance crop productivity, resource-use efficiency, and yield stability across the marginal maize-producing regions of Argentina.

Key words: maize, sowing date, plant density, phenotype, marginal environments.

Resumen

Durante las últimas décadas, el cultivo de maíz (*Zea mays*, L.) experimentó una marcada expansión territorial en Argentina, impulsando un incremento sostenido de la producción nacional mediante la incorporación de regiones con mayores restricciones hídricas, térmicas y edáficas. En estos ambientes, la optimización de la estructura del cultivo constituye una estrategia clave para reducir las brechas de rendimiento y mejorar la estabilidad productiva. Este trabajo sintetiza los principales avances generados por la Red UBA de Maíz, una iniciativa interdisciplinaria e interinstitucional orientada a generar conocimiento sobre el manejo del cultivo en ambientes marginales. A partir de ensayos realizados en múltiples regiones del país, se evaluó la interacción entre la fecha de siembra, la densidad de plantas y distintos fenotipos con diferente grado de plasticidad vegetativa y reproductiva, incluyendo híbridos prolíficos y macolladores. La estructura óptima del cultivo depende del potencial productivo y de las restricciones predominantes en cada ambiente. En condiciones de limitada disponibilidad hídrica, las menores densidades favorecen una mayor disponibilidad de recursos por planta y promueven la expresión de mecanismos de plasticidad reproductiva, mientras que en ambientes de mayor productividad las mayores densidades y los fenotipos menos plásticos maximizan el rendimiento. En conjunto, la información obtenida aporta bases científicas para definir estrategias de manejo adaptadas a cada ambiente, contribuyendo a incrementar la productividad, la eficiencia en el uso de los recursos y la estabilidad del cultivo de maíz en las regiones marginales de Argentina.

Palabras clave: maíz, fecha de siembra, densidad, fenotipos, ambientes marginales.

Introducción

Durante la última década, el cultivo de maíz experimentó una profunda transformación en Argentina. La superficie sembrada aumentó aproximadamente de tres a ocho millones de hectáreas, mientras que la producción nacional se incrementó desde alrededor de veinte hasta sesenta millones de toneladas. Este

crecimiento respondió principalmente a la expansión del cultivo hacia nuevas regiones productivas, más que al incremento exclusivo de los rendimientos en la tradicional zona núcleo (Satorre y Andrade, 2023).

Como consecuencia de esta expansión territorial, el maíz comenzó a cultivarse en ambientes con condiciones ambientales considerablemente más restrictivas que aquellas presentes en las regiones históricamente productoras. Estas nuevas áreas presentan limitaciones asociadas a la disponibilidad hídrica, el régimen térmico y las características edáficas, generando una elevada variabilidad espacial y temporal en el rendimiento del cultivo (Damiano y Taboada 2000; Satorre y Andrade, 2023). En consecuencia, la adaptación del manejo agronómico adquiere un papel central para maximizar la productividad y reducir el riesgo productivo.

En los sistemas de producción de secano, particularmente en aquellos cuyo rendimiento potencial es inferior a 8 t ha^{-1} , las brechas entre el rendimiento alcanzable y el efectivamente obtenido pueden oscilar entre el 40 y el 70 % (<https://yieldgap.org/atlas/>). Estas diferencias evidencian un importante margen para mejorar la eficiencia productiva mediante prácticas de manejo que permitan adaptar la estructura del cultivo a las condiciones particulares de cada ambiente.

Entre las principales decisiones agronómicas, la estructura del cultivo comprende la definición de la fecha de siembra, la densidad de plantas y la elección del genotipo (Satorre y Maddonni, 2018). En las regiones marginales predominan frecuentemente las siembras tardías y las bajas densidades de plantas, condiciones que favorecen la expresión de mecanismos de plasticidad vegetativa y reproductiva (Maddonni et al., 2020). Estos mecanismos incluyen la prolificidad —capacidad de producir más de una espiga fértil por planta— y el macollaje, ambos capaces de modificar la capacidad del cultivo para aprovechar los recursos disponibles bajo condiciones ambientales variables.

Con el propósito de comprender los mecanismos ecofisiológicos que determinan estas respuestas y desarrollar recomendaciones de manejo adaptadas a los diferentes ambientes productivos del país, en 2020 se creó la Red UBA de Maíz (<https://www.agro.uba.ar/GET/reduba-demaiz/divulgacion>). Esta red reúne investigadores de universidades nacionales, organismos científicos, estaciones experimentales, grupos CREA, empresas semilleras y productores, conformando un espacio multidisciplinario orientado a la generación de conocimiento y la formación de recursos humanos especializados en el manejo del cultivo de maíz en ambientes marginales.

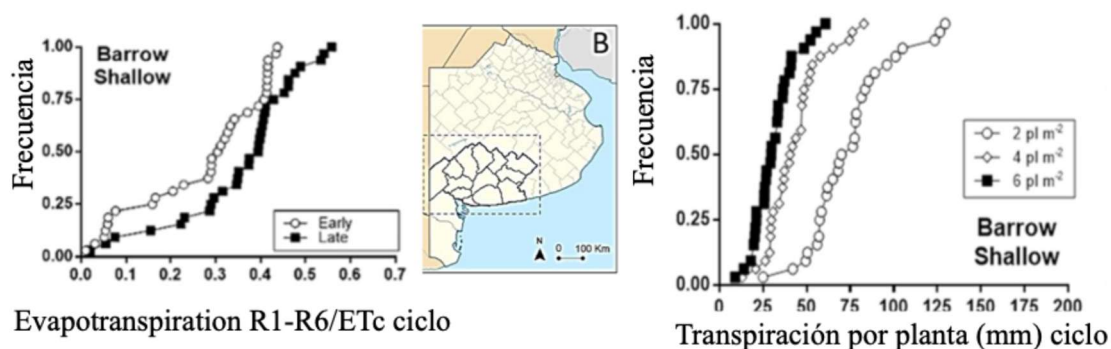
El objetivo de este trabajo es integrar los principales resultados obtenidos por la Red UBA de Maíz para analizar cómo la interacción entre ambiente, fecha de siembra, densidad de plantas y plasticidad fenotípica determina la estructura óptima del cultivo en las diferentes regiones marginales de producción de Argentina, y discutir sus implicancias para el diseño de estrategias de manejo orientadas a incrementar la productividad y la estabilidad de los sistemas agrícolas.

Caracterización ecofisiológica de dos ambientes marginales de producción de maíz en Argentina

Como punto de partida para el desarrollo de estrategias de manejo específicas, se realizó una caracterización ecofisiológica de dos de las principales regiones marginales de producción de maíz de Argentina mediante metodologías adaptadas a las restricciones predominantes en cada ambiente. El objetivo fue identificar los factores que limitan la productividad y establecer indicadores funcionales que permitieran explicar la respuesta del cultivo a distintas prácticas de manejo.

En el sudoeste de la provincia de Buenos Aires, un ambiente semiárido con precipitaciones anuales generalmente inferiores a 400 mm y suelos de escasa profundidad, la caracterización se centró en la dinámica del uso del agua. Para ello se cuantificó la proporción de la evapotranspiración total del ciclo destinada al período reproductivo (R1-R6) y la transpiración acumulada por planta bajo diferentes fechas de siembra y densidades. Este enfoque permitió evaluar simultáneamente la eficiencia en la partición temporal del consumo de agua y la disponibilidad de recursos por planta. Los resultados mostraron que las siembras tardías incrementaron la fracción del consumo hídrico destinada al período reproductivo, mientras que las menores densidades aumentaron la transpiración por planta sin incrementar el consumo total del cultivo, favoreciendo un mayor crecimiento individual y una utilización más eficiente del agua disponible (Fig. 1) (Rotili et al., 2019).

Figura 1. Proporción del consumo total de agua en el ciclo de un cultivo de maíz (evapotranspiración) que es diferido hacia las etapas reproductivas (R1-R6/ETc ciclo) al retrasar la fecha de siembra desde mediados de octubre a fines de noviembre (izquierda) y transpiración por planta en el ciclo ante cambios en la densidad de siembra (derecha) para una localidad del SO de Buenos Aires (Barrow) en suelos limitados por tosca (shallow) a menos de 60cm. Simulaciones a partir de una serie histórica de 30 años. Los datos se representan como frecuencias acumuladas. Adaptado de Rotili et al. (2019).

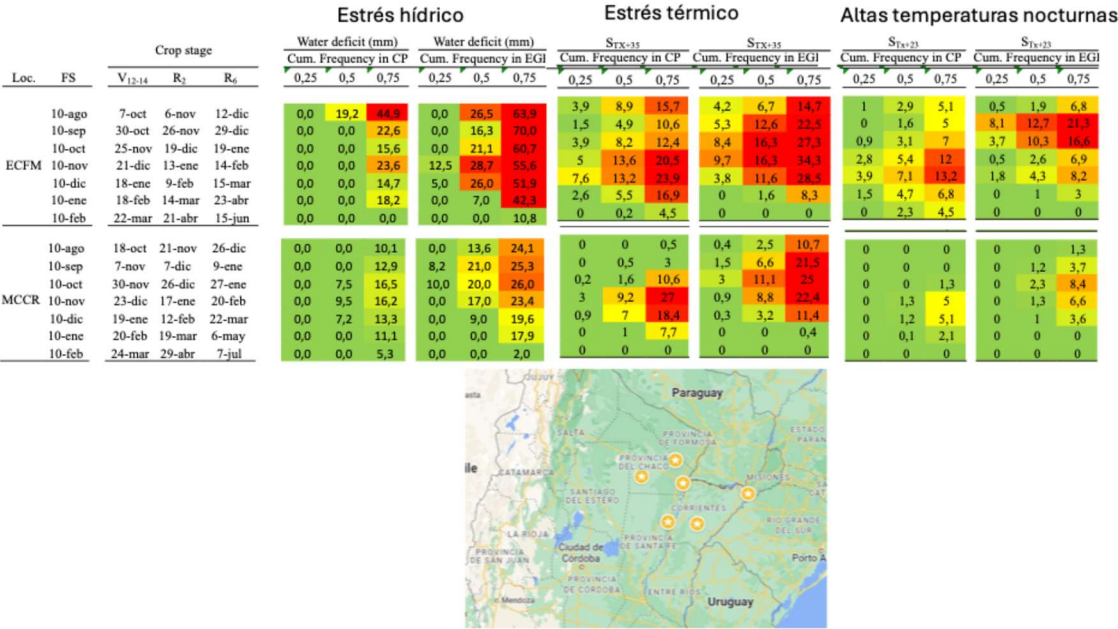


En contraste, la caracterización del noreste argentino (NEA) se realizó mediante un enfoque basado en el análisis de la frecuencia e intensidad de los principales estreses ambientales que ocurren durante el ciclo del cultivo (Fig. 2) (Ketler et al., 2025). A partir de registros meteorológicos de largo plazo correspondientes a diferentes localidades y fechas de siembra, se cuantificó la incidencia de déficits hídricos durante el período crítico y el llenado de granos, la ocurrencia de temperaturas máximas superiores a 35 °C y la frecuencia de noches con temperaturas superiores a 23 °C durante las etapas reproductivas. Este análisis permitió identificar que, a diferencia del sudoeste bonaerense, la principal restricción para la producción de maíz en el NEA no es exclusivamente la disponibilidad de agua, sino la elevada frecuencia de estrés térmico y de altas temperaturas nocturnas, factores que en determinadas localidades se combinan con déficits hídricos. Asimismo, la evaluación de distintas fechas de siembra mostró que las siembras estivales, realizadas entre fines de enero y comienzos de febrero, reducen significativamente la exposición del cultivo tanto al estrés térmico como al hídrico durante las etapas de mayor sensibilidad fisiológica.

En conjunto, ambos estudios demuestran que los ambientes marginales de Argentina presentan limitaciones de naturaleza diferente y, por lo tanto, requieren

metodologías específicas para su caracterización. Mientras que en el sudoeste bonaerense la productividad está condicionada principalmente por la disponibilidad y el patrón temporal de utilización del agua, en el NEA predominan las restricciones asociadas al ambiente térmico durante el período reproductivo. Esta caracterización constituyó la base conceptual para definir estrategias de manejo diferencial de la estructura del cultivo —principalmente fecha de siembra, densidad y elección del genotipo— adaptadas a las condiciones particulares de cada región.

Figura 2. Fenología (crop stage) y frecuencias de estrés hídrico (wáter déficit), térmico (suma de temperaturas máximas superiores a 35 °C) y noches cálidas (suma de temperaturas mínimas superiores a 23 °C) durante el periodo crítico (CP) y el llenado efectivo de los granos (EG) para maíces sembrados en distintas localidades del NEA Argentino en 7 fechas de siembra. Sólo se presenta los resultados para El Colorado (Formosa) y Mercedes (Corrientes). Los colores del verde al rojo destacan los escenarios menos y más restrictivos respectivamente. Adaptado de Ketler et al. (2025).



Plasticidad reproductiva y vegetativa como mecanismos de adaptación en ambientes marginales

Uno de los principales objetivos de la Red UBA de Maíz fue evaluar el potencial de los mecanismos de plasticidad fenotípica para incrementar la adaptación del cultivo a los ambientes marginales de producción. Para ello se analizaron dos componentes de la plasticidad del maíz: la prolificidad, definida como la capacidad de desarrollar más de una espiga fértil por planta, y el macollaje, entendido como la emisión de tallos secundarios capaces de contribuir a la producción de biomasa y granos. Los resultados obtenidos en una amplia red de ensayos realizados en diferentes regiones productivas mostraron que la prolificidad estuvo fuertemente determinada por la disponibilidad de recursos por planta (Fig. 3). La frecuencia de plantas con dos espigas fértiles disminuyó progresivamente al aumentar la densidad del cultivo, confirmando que este mecanismo constituye una respuesta compensatoria frente a condiciones de baja competencia intraespecífica. Se detectó una importante variabilidad genética entre híbridos, indicando que la capacidad para expresar prolificidad depende en gran medida del germoplasma utilizado y

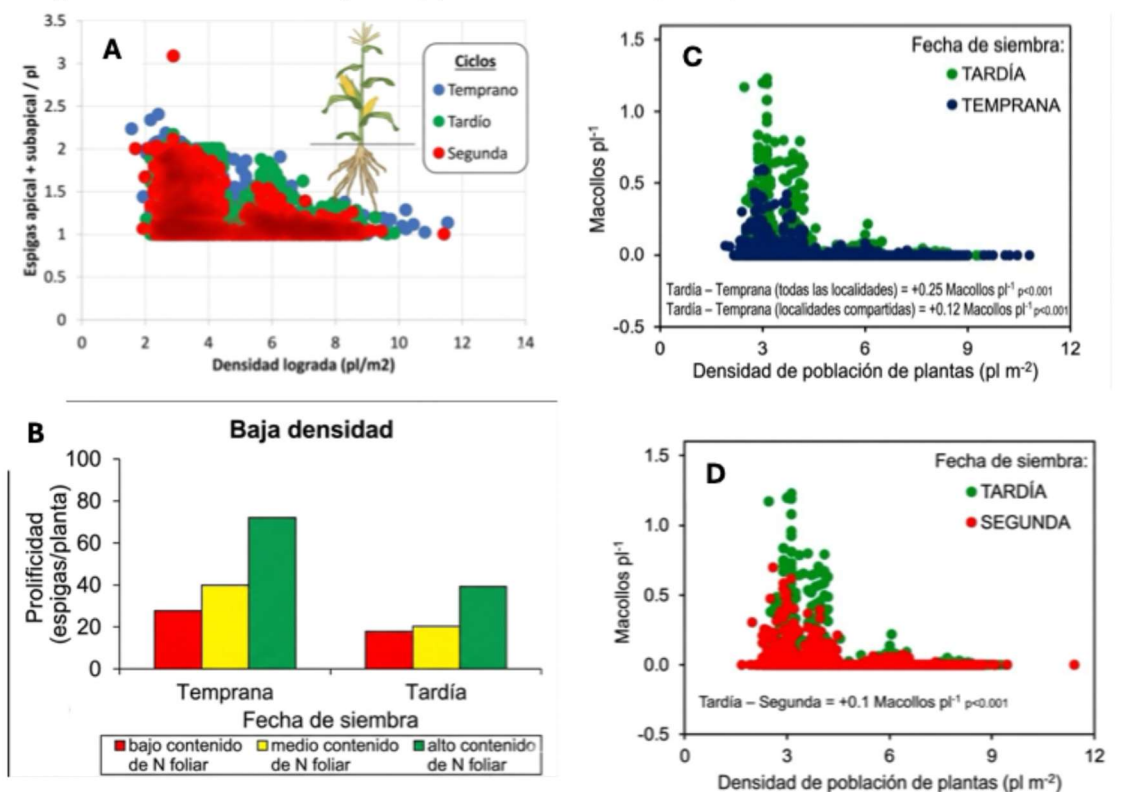
menos de la fecha de siembra (Rotili et al. 2021). Los estudios fisiológicos permitieron además demostrar que la expresión de la prolificidad no depende únicamente de la densidad de plantas, sino también del estado nutricional del cultivo durante el período crítico (Maltese et al. 2021). La disponibilidad de nitrógeno incrementó significativamente la proporción de plantas prolíficas, particularmente bajo condiciones de baja densidad, donde la competencia por recursos es menor (Parco et al., 2020). Este efecto fue más marcado en las siembras tempranas que en las tardías, evidenciando una interacción entre el ambiente y el contenido de N foliar sobre la expresión de este mecanismo de plasticidad (Maltese et al. 2021). Estos resultados indican que el nitrógeno actúa principalmente de manera indirecta, favoreciendo el crecimiento de la planta y elevando la disponibilidad de asimilados para sostener el desarrollo reproductivo, pero también directa sobre la eficiencia reproductiva (i.e. cantidad de granos fijados por unidad de crecimiento de la espiga alrededor de floración).

El comportamiento del macollaje mostró un patrón diferente. La producción de macollos se concentró principalmente en densidades inferiores a 4 plantas m^{-2} y fue significativamente mayor en los cultivos implantados en fechas tardías respecto de las siembras tempranas y de segunda (Fig. 3 C, D) (Rotili et al., 2021). Estas diferencias indican que las condiciones ambientales asociadas a las siembras tardías favorecen la iniciación y supervivencia de los macollos, incrementando su potencial contribución al rendimiento. Al igual que ocurrió con la prolificidad, también se observaron diferencias consistentes entre híbridos, evidenciando una importante variabilidad genética para este carácter.

En conjunto, los resultados demuestran que la prolificidad y el macollaje representan mecanismos complementarios de plasticidad fenotípica que permiten al cultivo ajustar su estructura reproductiva y vegetativa en función de la disponibilidad de recursos. Mientras que la prolificidad estuvo principalmente regulada por el crecimiento de la planta durante el período crítico, determinado por la interacción entre densidad, disponibilidad de nitrógeno y ambiente, el macollaje respondió además de manera marcada a la fecha de siembra y a la reducción de la competencia entre plantas. La integración de ambos mecanismos amplía la capacidad del cultivo para compensar variaciones en el establecimiento y en la disponibilidad de recursos, incrementando la estabilidad del rendimiento en los ambientes de baja productividad.

Desde una perspectiva agronómica, estos resultados demuestran que la utilización de híbridos con elevada plasticidad reproductiva y vegetativa constituye una estrategia promisorio para el manejo del maíz en ambientes marginales. La posibilidad de ajustar dinámicamente el número de espigas y de tallos reproductivos según la oferta de recursos permite ampliar el rango de densidades óptimas, contribuyendo a una mayor resiliencia y estabilidad de los sistemas productivos frente a la elevada variabilidad ambiental característica de estas regiones

Figura 3. Prolificidad (A) y macollaje (C, D) en función de la densidad de siembra para un amplio rango de ambientes (clasificados según fecha de siembra) y genotipos en función de la densidad lograda de siembra. En baja densidad se representa con detalle la expresión de la prolificidad de maíces prolíficos en siembras tempranas y tardías según el contenido de N en la hoja de la espiga (B). Adaptado de Rotili et al. (2021) y Maltese et al. (2021).

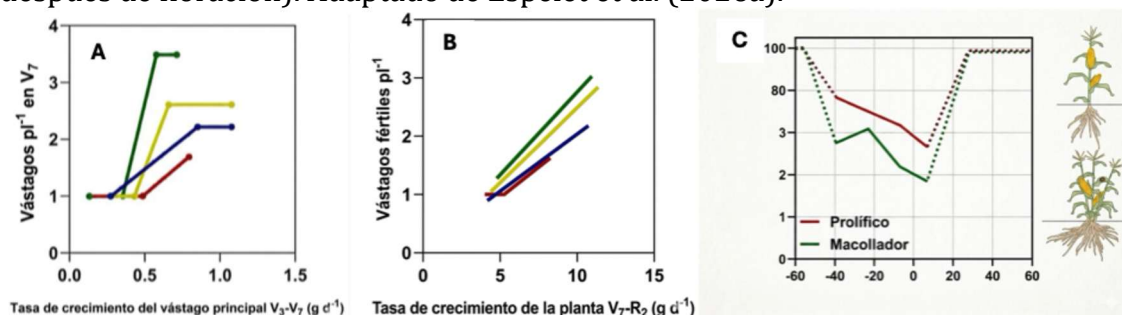


Ecofisiología del macollaje en maíz: Regulación ambiental, estabilidad del rendimiento y eficiencia en el uso del nitrógeno

La utilización de fenotipos con plasticidad reproductiva y vegetativa constituye una estrategia ecofisiológica central para la optimización del rendimiento en el cultivo de maíz (*Zea mays*, L.) ante variaciones en el ambiente y la densidad poblacional. Dentro de las respuestas plásticas, el macollaje, o producción de vástagos secundarios, actúa como un mecanismo regulador de la biomasa total y del número de granos por unidad de superficie (Espelet et al., 2025). La dinámica de esta estructura está fuertemente regulada por señales ambientales y nutricionales tempranas que operan con anterioridad al inicio de la elongación del tallo. Específicamente, durante las etapas vegetativas iniciales comprendidas entre V3 (tres hojas) y V7 (siete hojas expandidas) la emisión de los macollos depende de la interacción entre la base genética, la tasa de crecimiento individual de la planta y la calidad de la luz dentro del canopeo. Un descenso en la relación de radiación rojo a rojo lejano (R:FR), característico de condiciones de alta densidad poblacional, actúa como una señal fotomorfogénica que reprime la iniciación de yemas laterales (Maddonni et al. 2000). Por el contrario, ante una alta disponibilidad de recursos por planta, el incremento en la tasa de crecimiento del vástago principal genera una respuesta lineal y positiva en la emisión de macollos (Fig. 4A) (Espelet et al., 2026a). No obstante, la aparición de los macollos en etapas tempranas no garantiza su contribución directa al rendimiento, ya que su supervivencia y posterior transición hacia estructuras reproductivas funcionales (macollos fértiles) están supeditadas a

la tasa de crecimiento del cultivo durante un período ontogénico más prolongado, que abarca desde V7 hasta R2 (cuaje de los granos de la espiga del vástago principal) (Fig. 4B). Esta ontogenia diferencial entre vástagos principales y macollos altera la sensibilidad temporal del rendimiento frente a estreses ambientales, modificando la definición tradicional del período crítico para la determinación del número de granos en maíz. En híbridos no plásticos o fenotipos prolíficos que concentran su compensación exclusivamente en el vástago principal, la ventana de máxima susceptibilidad es acotada localizándose estrictamente en torno a la floración de la espiga apical (30 días alrededor de floración) del único vástago (Andrade et al., 2002). En contraposición, los fenotipos macolladores exhiben un período crítico significativamente más extendido en el tiempo (Fig. 4C). La ventana de en estos genotipos se amplía hacia fases vegetativas previas, abarcando desde los 50 días antes de floración hasta los 20 días posteriores a la misma (Espelet et al., 2026a). Esto se debe a que cualquier interrupción ambiental o restricción lumínica temprana afecta de forma directa la tasa de crecimiento inicial y compromete la definición estructural de los macollos viables, limitando prematuramente el potencial de compensación reproductiva posterior del cultivo.

Figura 4. A. Número de vástagos por planta (macollos+vástago principal) en el estado de 7 hojas (V7) expandidas del vástago principal en función de la tasa de crecimiento del vástago principal entre el estado de 3 y 7 hojas expandidas (V3-V7) y B. número de vástagos fértiles por planta (macollos+vástago principal) en el cuaje de los granos (R2) del vástago principal en función de la tasa de crecimiento de la planta (vástago principal+macollos) entre el estado de V7 y R2 (V7-R2) en 4 híbridos de maíz con diferente expresión de macollaje. C. Reducción del número de granos de un híbrido prolífico uno macollador, ante reducciones de la radiación durante 15 días en diferentes momentos del ciclo (expresado como días antes o después de floración). Adaptado de Espelet et al. (2026a).

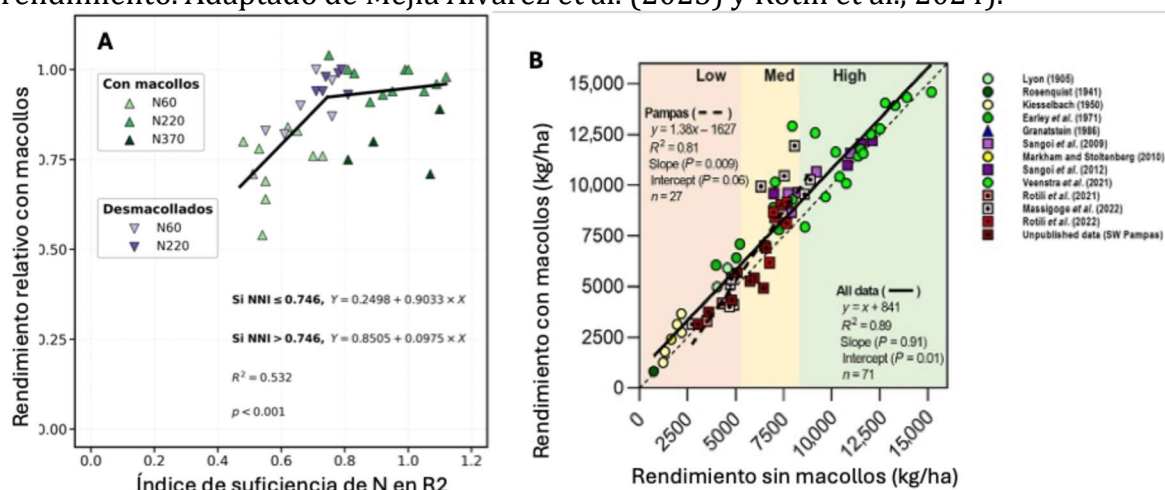


El aporte de estas estructuras secundarias al rendimiento, también está íntimamente ligado a la economía del nitrógeno (N) en cultivos de baja densidad. De acuerdo con Mejía Álvarez et al. (2024), la presencia de macollos modifica sustancialmente el rendimiento de grano (GY), la absorción de N (Nup) y la eficiencia interna de uso de nitrógeno (NIE). Los cultivos que desarrollan macollos logran una mayor producción de grano y una demanda más elevada de este nutriente en comparación con situaciones limitadas en N. No obstante, este incremento en la más que proporcional en la acumulación de N que del rendimiento induce una disminución en la NIE (cayendo de 54 a 44 g de rendimiento / g N absorbido), lo que refleja una mayor saturación y consumo del nutriente en las estructuras secundarias. A pesar de estas variaciones en la NIE, el Índice de Nutrición Nitrogenada del cultivo calculado a los 15 días de la floración se consolida como un estimador robusto y un excelente indicador predictivo del rendimiento relativo de grano tanto para cultivos macolladores como desmacollados

mecánicamente, con funciones que muestran respuestas marcadamente lineales ante deficiencias nutricionales y una estabilidad cercana al máximo potencial en situaciones de suficiencia de N (Fig. 5A) (Mejía Álvarez et al., 2025).

A pesar de esta mayor ventana de sensibilidad y de los cambios en la dinámica de nutrientes, las revisiones cuantitativas globales basadas en meta-análisis desmitifican la noción histórica de que el macollaje representa una estructura competitiva e ineficiente que penaliza el rendimiento de grano por unidad de superficie (Fig. 5B) (Rotili et al., 2024). Al contrastar el comportamiento productivo de plantas con macollos frente a tratamientos sometidos a desmacollado, se evidencia que los macollos desarrollan espigas fértiles complementarias que resguardan el rinde máximo en densidades óptimas o bajas. Los casos documentados de penalización real sobre el rendimiento son escasos y se restringen de manera muy específica a ambientes de productividad media con restricciones hídricas tardíos en etapas reproductivas, donde el costo transpiratorio o de mantenimiento de la biomasa del macollo temprano supera el aporte final de grano. Fuera de estos escenarios restrictivos, el macollaje se consolida como un carácter funcionalmente neutro o beneficioso que confiere estabilidad al cultivo de maíz frente a la variabilidad ambiental.

Figura 5. A. Rendimientos relativos de cultivos con y sin macollos (desmacollados) ante cambios en la oferta de N en función del índice de suficiencia de N en el estado R2. **B.** Rendimiento de cultivos con macollos en función del rendimiento de esos mismos híbridos sin macollos (desmacollados) para un amplio rango de niveles de rendimiento. Adaptado de Mejía Álvarez et al. (2025) y Rotili et al., (2024).



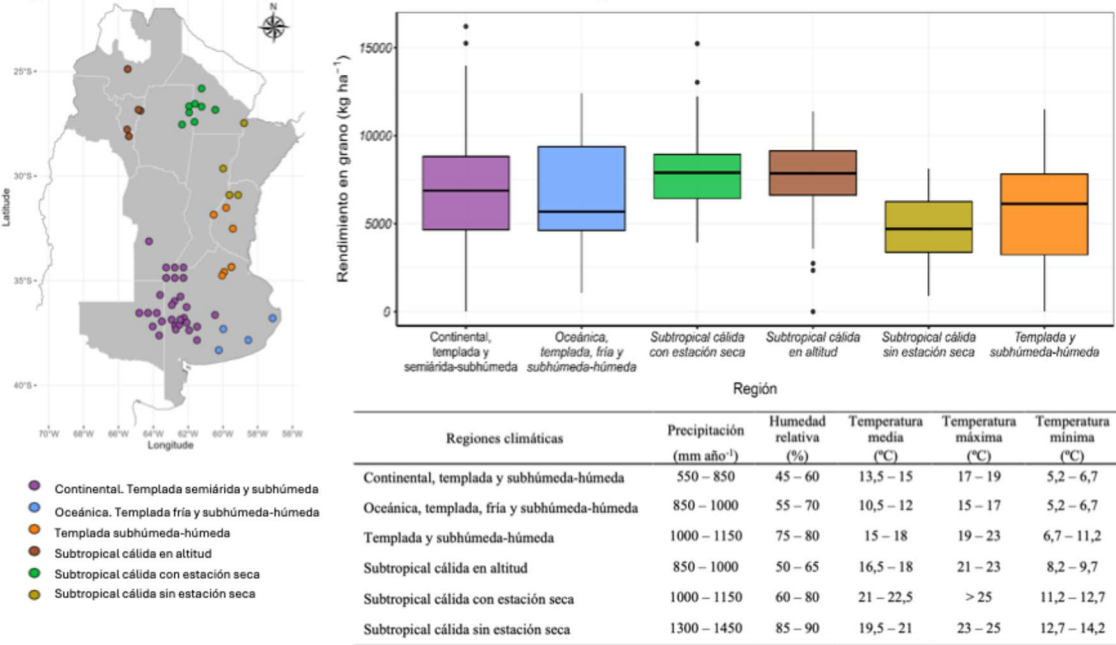
Análisis de la estructura óptima del cultivo (densidad y fenotipo) para la producción de maíz en ambientes marginales

A partir de la base de datos de la Red UBA de Maíz, se buscó definir los manejos de optimización del rendimiento a través de una sólida base experimental que incluyó 95 experimentos bajo un protocolo común en 47 localidades y 11 provincias, conducidos estratégicamente por la red durante 4 campañas agrícolas (Espelet et al. 2026b). Los experimentos se distribuyeron en 6 regiones ambientales contrastantes: la región Continental, templada y subhúmeda-húmeda; la Oceánica, templada, fría y subhúmeda-húmeda; la Subtropical cálida con estación seca; la Subtropical cálida en altitud; la Subtropical cálida sin estación seca; y la región Templada y subhúmeda-húmeda (Fig. 6). Los ensayos se localizaron específicamente en ambientes caracterizados por precipitaciones limitadas y/o alta variabilidad interanual de los registros de precipitaciones y de temperaturas

extremas, seleccionando suelos con limitaciones explícitas en el almacenamiento o suministro de agua debido a texturas gruesas o finas, sedimentos aluviales o restricciones en la profundidad efectiva, bajo esquemas de fechas de siembra tardías. En cada uno de estos escenarios se evaluaron 4 fenotipos con diferentes mecanismos de plasticidad (no plástico denominado comercialmente flex, prolífico, macollador y prolífico macollador) combinados con 2 o 3 densidades de siembra (ultrabaja, baja y alta), manteniendo la gestión del agricultor basada en una correcta decisión de la fecha de siembra, fertilización nitrogenada y el control de adversidades. Finalmente, el protocolo integró el registro continuo de las variables meteorológicas y una metodología de cosecha fundamentada en la identificación de espigas de diferente orden, determinando los componentes del rendimiento y su contribución específica al rendimiento por metro cuadrado (m^2).

Los rendimientos de grano obtenidos a través de las regiones evaluadas reflejan tres niveles de productividad, donde los ambientes Subtropical cálida con estación seca y Subtropical cálida en altitud lideran el potencial productivo con medianas cercanas a los $8,000\text{ kg ha}^{-1}$. En el nivel de productividad intermedia se ubican las regiones templadas (Océánica, templada, fría y subhúmeda-húmeda, Continental, templada y semiárida-subhúmeda y Templada y subhúmeda-húmeda) con medianas distribuidas entre los $5,500$ y $7,000\text{ kg ha}^{-1}$, aunque exhibiendo una marcada variabilidad ambiental y picos de rendimiento máximos que superan los $12,000\text{ kg ha}^{-1}$. Por último, el menor potencial de rendimiento se consolida en la región Subtropical cálida sin estación seca, cuya mediana se posiciona visiblemente por debajo de los $5,000\text{ kg ha}^{-1}$ y sus valores máximos raramente intersectan los umbrales de alta productividad de las restantes regiones.

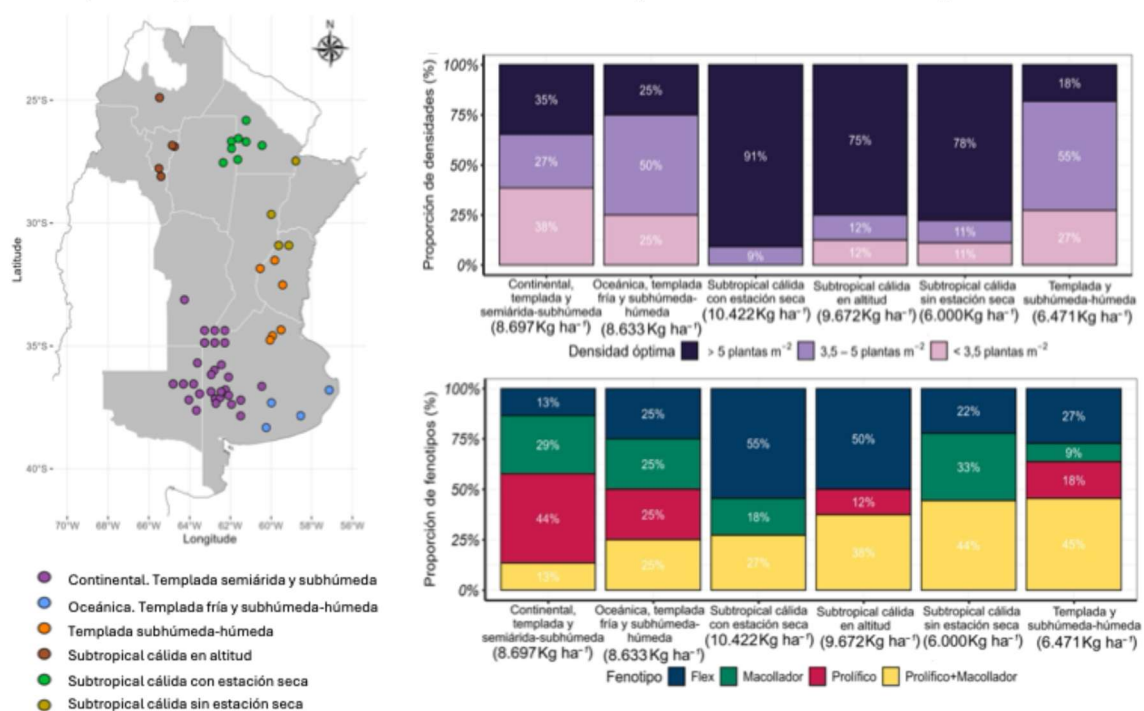
Figura 6. Ubicación geográfica de los experimentos en 6 regiones de Argentina, variabilidad de los rendimientos obtenidos por región y caracterización de los registros climatológicos de las diferentes regiones.



La elección de las densidades de siembra y de los fenotipos que optimizaron el rendimiento, estuvieron fuertemente asociadas al potencial productivo de cada región (Fig. 7). Específicamente, en las regiones de mayor productividad —que correspondieron a los ambientes subtropical con estación seca y en altitud— se registró un marcado predominio de manejos orientados a densidades altas (> 5

plantas m^{-2}); asimismo, bajo estas condiciones óptimas de crecimiento, prevalecieron los fenotipos sin plasticidad vegetativa-reproductiva, consolidando una estrategia de maximización del rendimiento basada en un mayor número de plantas por unidad de superficie. Por el contrario, en las regiones de productividad intermedia —representadas por los ambientes templados— el patrón de respuesta se modificó sustancialmente, registrándose un predominio de densidades de siembra bajas (< 5 plantas m^{-2}). En estos escenarios de recursos intermedios prevalecieron los fenotipos equipados con mecanismos de plasticidad vegetativa-reproductiva, lo que evidencia una estrategia adaptativa orientada a estabilizar o compensar el rendimiento por planta individual frente a variaciones en la oferta ambiental. Finalmente, en la región de menor rendimiento, correspondiente al ambiente subtropical sin estación seca, predominó el uso de una alta densidad de siembra sin que se registrara un claro efecto del fenotipo sobre las variaciones en la productividad final del cultivo.

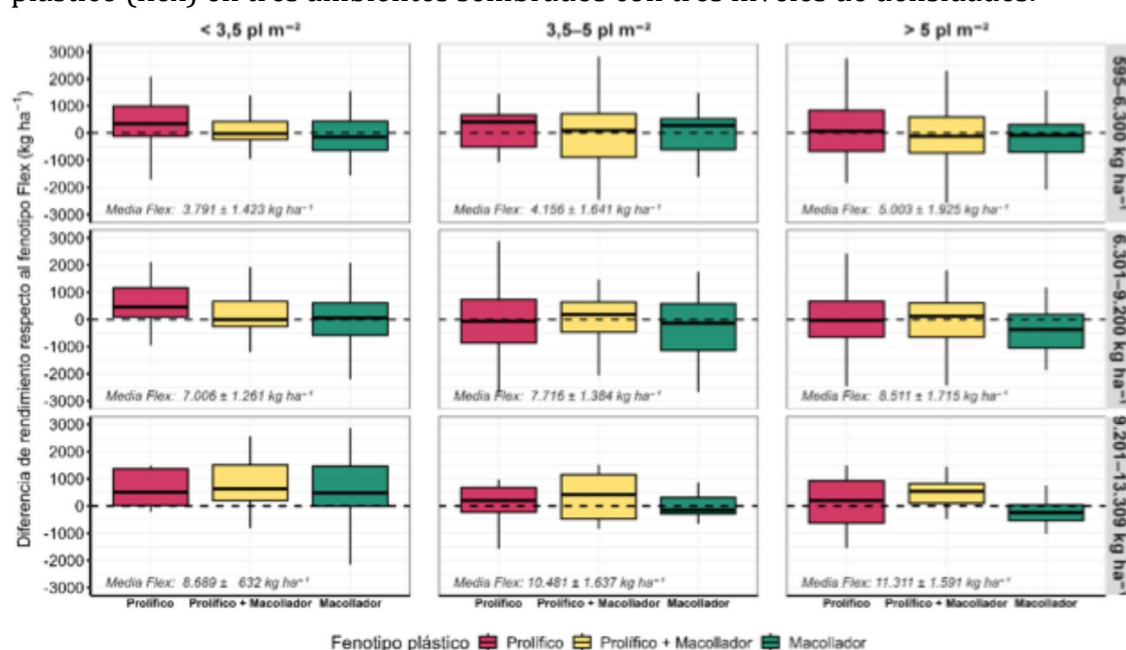
Figura 7. Proporción de casos en cada región que optimizaron el rendimiento con cada una de las densidades (superior) y fenotipos (inferior) utilizados. Los valores debajo de cada región representan los rendimientos medios y sus desvíos con el manejo de optimización en cada uno de los experimentos de cada región.



La optimización del manejo agronómico aquí descritos surgen de una evaluación retrospectiva y detallada de los datos obtenidos en los experimentos; sin embargo, en la práctica agrícola real, el productor se ve obligado a tomar la decisión de manejo de forma predictiva, meses antes de la siembra, interactuando con un ambiente caracterizado por una alta variabilidad interanual en la expectativa de los rendimientos. Frente a esta incertidumbre climática y financiera, la estrategia habitualmente adoptada consiste en recurrir al uso de bajas densidades poblacionales, una táctica que minimiza el costo inicial del insumo semilla y busca sostener el rédito económico del sistema productivo ante la eventualidad de un año adverso que deprima severamente la producción. En este contexto defensivo, surge el interrogante de si los mecanismos de plasticidad vegetativa y reproductiva pueden conferir un mayor piso de rendimiento y una mejor protección del capital

en comparación con el uso de fenotipos no plásticos tradicionales. Para explorar esta hipótesis, se realizó un nuevo análisis cuantitativo utilizando los rendimientos absolutos de grano obtenidos para cada fenotipo en la totalidad de los experimentos evaluados. A partir de estos datos, se calculó la diferencia neta de rendimiento de cada fenotipo plástico frente al rendimiento del fenotipo testigo no plástico (denominado flex). Estas diferencias se desglosaron para cada densidad poblacional evaluada y se agruparon bajo tres niveles o rangos ambientales contrastantes (ambientes de baja, media y alta productividad). Con el fin de contextualizar la magnitud de estas brechas y evaluar la estabilidad del sistema, se transcribe para cada una de las situaciones mencionadas el rendimiento medio alcanzado por el fenotipo flex acompañado por su respectivo desvío estándar, permitiendo así cuantificar con rigor estadístico la ventaja comparativa de los materiales plásticos en los distintos ambientes (Fig. 8).

Figura 8. Diferencia de rendimiento de los fenotipos plásticos vs el fenotipo no plástico (flex) en tres ambientes sembrados con tres niveles de densidades.



En los ambientes de baja productividad (5.95 – 6.300 kg ha⁻¹), el fenotipo flex incrementa su rendimiento medio en 365 kg ha⁻¹ al pasar de densidades bajas a intermedias (de 3.791 ± 1.423 a 4.156 ± 1.641 kg ha⁻¹), y en 1.212 kg ha⁻¹ cuando se incrementa a densidades altas (5.003 ± 1.925 kg ha⁻¹). Al analizar la respuesta en baja densidad (< 3,5 pl m⁻²), el fenotipo prolífico genera una ventaja mediana neta que ronda los 300 a 400 kg ha⁻¹ respecto al flex con techos cercanos a los 1000 kg ha⁻¹. Este beneficio iguala o supera marginalmente el incremento que el productor obtendría con el fenotipo tradicional al aumentar la densidad a niveles medios, con la ventaja crítica de haber evitado el costo adicional del insumo semilla en un entorno de alto riesgo. En este ambiente restrictivo, el aumento poblacional hacia densidades altas logra un salto productivo mayor que la compensación plástica en baja densidad, asumiendo una penalidad económica superior si el año resulta climáticamente adverso.

En los ambientes de productividad media (6.301 – 9.200 kg ha⁻¹), el rendimiento medio del flex sube 710 kg ha⁻¹ al pasar de densidad baja a media (de 7.006 ± 1.261 a 7.716 ± 1.384 kg ha⁻¹) y acumula un incremento total de 1.505 kg ha⁻¹ al posicionarse en densidades altas (8.511 ± 1.715 kg ha⁻¹). Cuando se examina el comportamiento defensivo en bajas densidades (< 3,5 pl m⁻²), el fenotipo prolífico

sostiene su ventaja vs al flex, sin embargo en densidades intermedias y altas todos los fenotipos alcanzan similares valores de rendimiento (medianas cercanas a cero). Finalmente en los ambientes de alta productividad ($9.201 - 13.309 \text{ kg ha}^{-1}$), el fenotipo flex expresa saltos de rendimiento considerables al aumentar la población, incrementando en 1.792 kg ha^{-1} al pasar de densidades bajas a medias (de 8.689 ± 632 a $10.481 \pm 1.637 \text{ kg ha}^{-1}$) y en 2.622 kg ha^{-1} al alcanzar densidades altas ($11.311 \pm 1.591 \text{ kg ha}^{-1}$). No obstante, cuando el productor opta por una densidad baja preventiva ($< 3,5 \text{ pl m}^{-2}$), los tres fenotipos plásticos superan al flex: el fenotipo prolífico, el macollador y, fundamentalmente, la combinación de ambos, logran ventajas de rendimiento que promedian y superan los 1.000 kg ha^{-1} respecto al flex, llegando en sus cuartiles superiores a equiparar o superar los 1.500 kg ha^{-1} de ganancia neta. Esto demuestra que en ambientes de alto potencial donde la densidad quedó subóptima por razones de manejo defensivo, la plasticidad de los fenotipos compensa de forma contundente más del 60% del rendimiento que se habría ganado subiendo la densidad a niveles medios. Al ponderar que la intensificación en densidades altas con materiales macolladores sufre penalizaciones reales por competencia intraespecífica, la combinación de baja densidad y plasticidad (prolífico + macollador) emerge como la opción de máxima eficiencia técnica y económica, capturando los techos de rendimiento del ambiente sin incurrir en los costos y riesgos de una sobrepoblación de plantas.

Conclusiones

El análisis integral de los resultados obtenidos por la Red UBA de Maíz demuestra que frente a la profunda transformación territorial y la expansión del cultivo hacia regiones productivas marginales en Argentina, caracterizadas por severas restricciones hídricas, térmicas y edáficas, la optimización del manejo agronómico resulta indispensable para mitigar el riesgo productivo y cerrar las brechas de rendimiento existentes en sistemas de secano con potenciales inferiores a 8 t ha^{-1} . En estos escenarios de alta variabilidad espacial y temporal, la estabilización del margen bruto y la protección de los pisos económicos de las empresas agropecuarias se logran mediante la implementación de siembras tardías combinadas con bajas densidades de plantas, una decisión de manejo predictiva que reduce el costo del insumo semilla. Lejos de limitar el potencial del cultivo, esta estructura poblacional reducida favorece la expresión de mecanismos de plasticidad fenotípica vegetal y reproductiva, tales como la prolificidad y el macollaje, los cuales actúan de manera complementaria para maximizar la captura de recursos variables, transformando a la plasticidad vegetativas y/o reproductiva en una herramienta ecofisiológica eficiente que resguarda la productividad global del sistema sin resignar la captura de los techos de rendimiento ante condiciones interanuales favorables.

Literatura citada

- Andrade, F. H., Echarte, L., Rizzalli, R., Della Maggiora, A. y Casanovas, M. (2002). Kernel number prediction in maize under nitrogen or water stress. *Crop Science*, 42(4), 1173–1179. doi.org
- Damiano, F., Taboada, M.A.. 2000. Predicción del agua disponible usando funciones de pedotransferencia en suelos agrícolas de la región pampeana. *Ciencia del Suelo* 18(2): 77-88.
- Espelet, F.; Rotili, D.H; D'Andrea, K.E.; Maddonni, G.A. 2025. Critical periods for the expression of vegetative-reproductive plasticity in maize crops. *Field Crops Res.* <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2025.109907>

- Espelet, F., Rotili, D. Dándrea, K. Maddonni. G.A. 2026a. Carbon economy in maize phenotypes with different vegetative- reproductive plasticity mechanisms. *Field Crops Res.* <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2025.110173>.
- Espelet, F.; Palmero, F.; Hernández, C.; Rotili, D.H. ; D'Andrea, K.E.; Giorno, A.; Granieri, L.; Sörenson, F.; Ermácora, M.; Carabaca, L.S.; Furlani, C.; Micheloud, J.R.; García, G.; Barraco, M.R.; Girón, P.; Duarte, G.; Ross, J.E.; Diaz-Zorita, M.; Melchiori, R.J.M; Astiz, V.; Maltese, N.E.; Carabajal, N.G.; Valdez Naval, G.; Neiff, N.; Galdeano, M.J.; Leguizamón, G.; Paz, J.; Ciampitti, I.A.; Maddonni, G.A. 2026b. Multi-environment trials identifying crop plasticity and grain yield for maize grown across a wide range of yield-environments. *Field Crops Res (FIELD-D-25-03199)*
- Kettler, B.A., Nalli Sonzogni, F.D., Neiff, N., Boscarino, S., Maddonni, G. A. 2025. Climatic constraints for rainfed maize production in the Northeastern subtropical region of Argentina. *Theor Appl Climatol* 156, 313 2025. <https://doi.org/10.1007/s00704-025-05530-y>
- Maddonni, G.A.; Otegui, M.E.; Andrieu, B.; Chelle, M.; Casal, J. J. 2002. Maize leaves turn away from neighbors. *Plant Physiology* 130: 1181-1189.
- Maddonni, G. A.; Parco, M.; Rotili, D. H. 2021. Manejo de la estructura del cultivo de maíz en ambientes marginales de argentina. *Agronomía y Ambiente.* 41:90-105
- Mejía Álvarez, C.A; Rotili, D.H.; D'Andrea, K.E.; Ciampitti, I.A.; Abeledo, L.G.; Maddonni, G.Á. 2024. Tillering and N economy of low-density maize crops. *Field Crops Res.* <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109310>
- Mejía Álvarez, C.A; Rotili, D.H.; Espelet, F.; D'Andrea, K.E.; Ciampitti, I.A.; Maddonni, G.Á. 2025. Relevancy of nitrogen nutrition status in low-density tillered maize crops. *Plant and Soil.* <https://doi.org/10.1007/s11104-025-07980-9>
- Maltese, N., Maddonni, G. A.; Melchiori, R., Ferreyra, M, Caviglia, O. 2020. Crop nitrogen status of early- and late-sown maize at different plant densities. *Field Crops Res.* <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107965>.
- Parco, M.; Ciampitti, I.; D'Andrea, K. Maddonni. G. A. 2020. Prolificacy and nitrogen internal efficiency in maize crops. *Field Crops Res.* <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107912>
- Rotili, D.H.; Abeledo L. G.; deVoild, P.; Rodríguez, D.; Maddonni, G. A. 2020. Exploring the effect of tillers on the water economy, plant growth and kernel set of low-density maize crops. *Agric. Water. Manag.* <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106424>sown maize crops *Field Crops Res.* <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108216>.
- Rotili, D.H.; Giorno, A.; Tognetti, P.; Maddonni. G.A. 2019. Expansion of maize production in a semi-arid region of Argentina: climatic and edaphic constraints and their implications on crop management. *Agric. Water Manag.* <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105761>
- Rotili, D.H.; Micheloud, J.R.; Ross, F.; Abeledo, L.G.; Maddonni, G.A. 2024. Does tillering affect the grain yield of maize crops? A quantitative review. *Crop & Pasture Science. Crop & Pasture Science* 75, CP24064 <https://doi.org/10.1071/CP24064>.
- Satorre, E. H. y Andrade, J. F. (2023). El maíz en los sistemas productivos de Argentina: un análisis global y regional de su desarrollo reciente. En F. Andrade, M. E. Otegui, A. Cirilo y S. Uhart (Eds.), *Ecofisiología y manejo del cultivo de maíz* (pp. 25-49). MAIZAR.
- Satorre, E.H.; Maddonni, G. A. 2018. Spatial Crop Structure in Agricultural Systems. En: *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology.* R. A. Meyers (ed). Springer. 1-17.