



MANEJO DE LA ESTRUCTURA DEL CULTIVO DE MAÍZ EN AMBIENTES MARGINALES DE LA ARGENTINA

Gustavo A. Maddonni^{1, 2*}, Martín Parco¹ y Diego H. Rotili^{1, 2}

¹ Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, Departamento de Producción Vegetal, Cátedra de Cerealicultura, Buenos Aires, Argentina

* E-mail: maddonni@agro.uba.ar

² Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Instituto de Investigaciones Fisiológicas y Ecológicas Vinculadas a la Agricultura (IFEVA), Buenos Aires, Argentina

Recibido: 06/05/2021

Aceptado: 29/06/2021

RESUMEN

La producción maíz en la Argentina se triplicó en la última década debido a la expansión del área cosechada. En regiones consideradas marginales para la producción de maíz, el manejo de la estructura del cultivo, basado en fechas de siembra tardías y bajas densidades poblacionales, ha permitido obtener rendimientos estables y rentables. En este trabajo caracterizamos las zonas marginales para la producción del cultivo de maíz en la Argentina, interpretamos las bases funcionales del manejo adoptado en estas zonas y proponemos prácticas de manejo relacionadas con la estructura y nutrición del cultivo, que permiten reducir las brechas de rendimiento originadas por las limitantes ambientales. Para ello, se realizó una revisión de las publicaciones relacionadas con la temática y generadas por el grupo maíz de la Cátedra de Cerealicultura de FA-UBA y el Grupo de Estudio y Trabajo "Red de Ultra Baja Densidad de Maíz" (<https://www.agro.uba.ar/GET/reduba-demaiz>). Nuestros estudios permiten interpretar desde un marco eco-fisiológico y funcional, el impacto de la fecha de siembra, la densidad y la utilización de híbridos con plasticidad vegetativo-reproductiva sobre la economía del agua del cultivo, y la relación entre la producción de espigas múltiples con el rendimiento en bajas densidades. Estos mecanismos permitirían subir los pisos de rendimiento.

Palabras clave: maíz tardío, baja densidad, prolificidad, macollaje, plasticidad reproductiva.

MAIZE CROP STRUCTURE IN MARGINAL ENVIRONMENTS OF THE ARGENTINA

SUMMARY

Annual maize production in the Argentina tripled in the last decade due to a drastic and unprecedented expansion of the harvested area. This expansion occupied regions considered marginal for maize production, where the management of crop structure based on late sowing dates and low plant densities has allowed obtaining stable and economically profitable yields. In this work, we characterize the environmental limitations of the marginal zones for maize production in the Argentina, we interpret the functional bases of the most adopted management practices, and we propose management practices related to crop structure and nutrient supply, which make it possible to reduce the yield gaps caused by the main environmental constraints. We review the publications related to these objectives and generated by the maize group of the Vegetal production department (FA-UBA) and recently by the Study and Work Group "Network of Ultra-Low Density Corn" (<https://www.agro.uba.ar/GET/reduba-demaiz>). Our studies allow us to interpret from an eco-physiological and functional framework, the impact of late sowing date, low plant density and the use of hybrids with vegetative-reproductive plasticity on the crop water economy, and the relationship between the production of multiple ears and yield at low densities. These mechanisms would allow raising and stabilizing maize yields.

Key Words: late sowing date, low density, prolificacy, tillering, reproductive plasticity.

INTRODUCCIÓN

Durante varias décadas, la producción de maíz en la Argentina se concentró en la subregión más productiva de las Pampas, es decir, la Pampa Ondulada (32° a 36° S y 58° a 63° O) (Hall *et al.*, 1992). Esta área húmeda (aproximadamente, 950 mm año^{-1}) y templada (temperatura media anual de 16°C , período libre de heladas de 240 días) presenta el menor número de restricciones climáticas para la producción de los cultivos de granos y los suelos más fértiles (Argiudoles y Hapludoles típicos, Soil Survey Staff, 2010).

Los favorables precios internacionales de los productos agrícolas durante los primeros diez años del siglo actual (<http://www.fao.org/es/esc/prices>), junto con los cambios en las tendencias climáticas, e.g. incrementos en las precipitaciones hasta el 50% en algunas áreas de las Pampas (Barros, 2008), promovieron la expansión de la agricultura hacia regiones previamente caracterizadas como semiáridas (menos de 700 mm año^{-1} , temperatura media anual de 16°C y un período libre de heladas de 220 días), es decir hacia el oeste y suroeste de la Pampa ondulada, la Pampa interior, donde el pastoreo era el uso predominante de la tierra (Soriano, 1991). De manera similar, la frontera agrícola se desplazó hacia el norte de la Pampa Ondulada luego de la deforestación de los bosques nativos (Dirección de Bosques, 2007). Adicionalmente, la amplia adopción del cultivo de maíz tardío durante los últimos diez años especialmente en las regiones marginales (Figura 1) con el uso de híbridos con protección para lepidópteros (actualmente el 98% de la superficie), incrementó la superficie nacional dedicada a este cultivo. Así, en este período, esta superficie pasó de 3 a más de 7 millones ha (Figura 2a), impactando sobre la ganancia anual de la producción (ca. $0,25 \text{ millones t año}^{-1}$ entre las décadas del 1960 y del 2000 vs $4 \text{ millones t año}^{-1}$ durante la década del 2010; Figura 2b).

En consecuencia, previo al 2010, los cambios en la producción nacional de maíz estuvieron asociados a las variaciones en los rendimientos alcanzados (Figura 2c), mientras que posteriormente al 2010, la expansión de la producción del cultivo por fuera de la tradicional zona de producción permitió alcanzar 57 millones t cosechadas contrarrestando el declive (1960-2000) o estabilización (2000-2010) de la superficie dedicada a este cultivo (Figura 2a).

En estas nuevas zonas productivas, se alcanzan rendimientos medios ($<7 \text{ t ha}^{-1}$) inferiores a los de la zona núcleo maicera ($9\text{-}10 \text{ t ha}^{-1}$), con brechas cercanas al

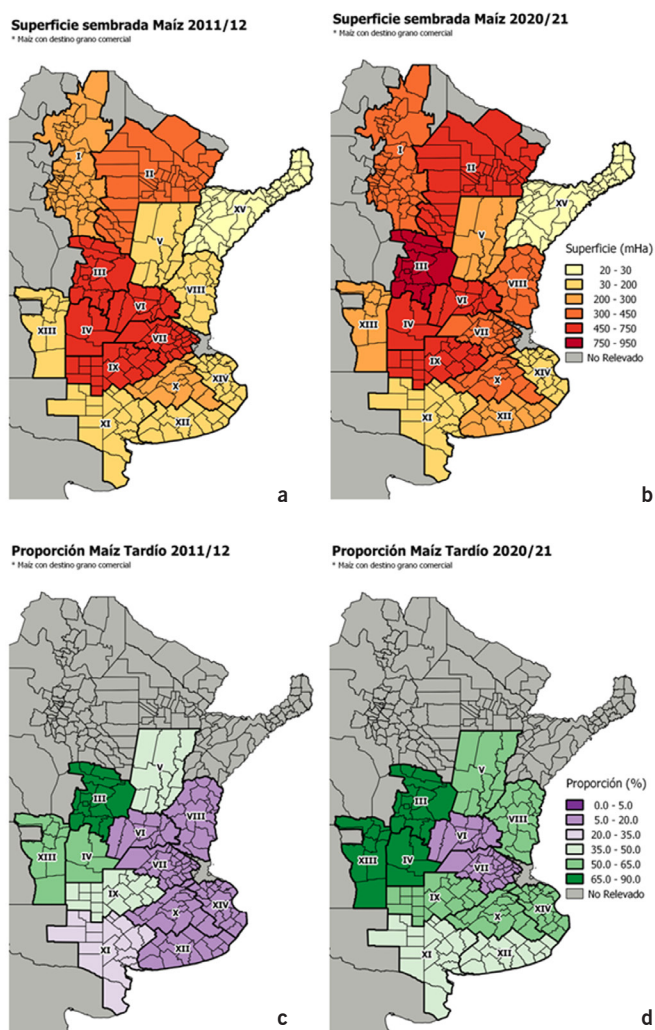


Figura 1. Superficie sembrada con maíz (a, b) y proporción de la superficie con maíz tardío (c, d) en la Argentina en la campaña 2011/12 (a, c) y 2020/21 (b, d). Fuente: Departamento de Estimaciones Agrícolas, Bolsa de Cereales de Buenos Aires.

40-70% del rinde máximo alcanzable en secano (Figura 3), derivadas de las restricciones climáticas y edafológicas.

Dadas estas restricciones, en estos ambientes se han implementado cambios en el manejo de la estructura del cultivo tendientes a un ajuste defensivo. La estructura del cultivo es uno de los principales determinantes de la capacidad de un cultivo para capturar recursos y producir rendimiento, por lo que ha recibido mucha atención de productores, agrónomos e investigadores y está bajo control de los agricultores en la mayoría de los sistemas de cultivo.

La estructura de un cultivo es un atributo complejo, determinado por el genotipo y sus características arquitectónicas, la fecha de siembra, la densidad de siembra, el arreglo espacial de las plantas y sus interacciones con el ambiente (Satorre y Maddonni, 2018).

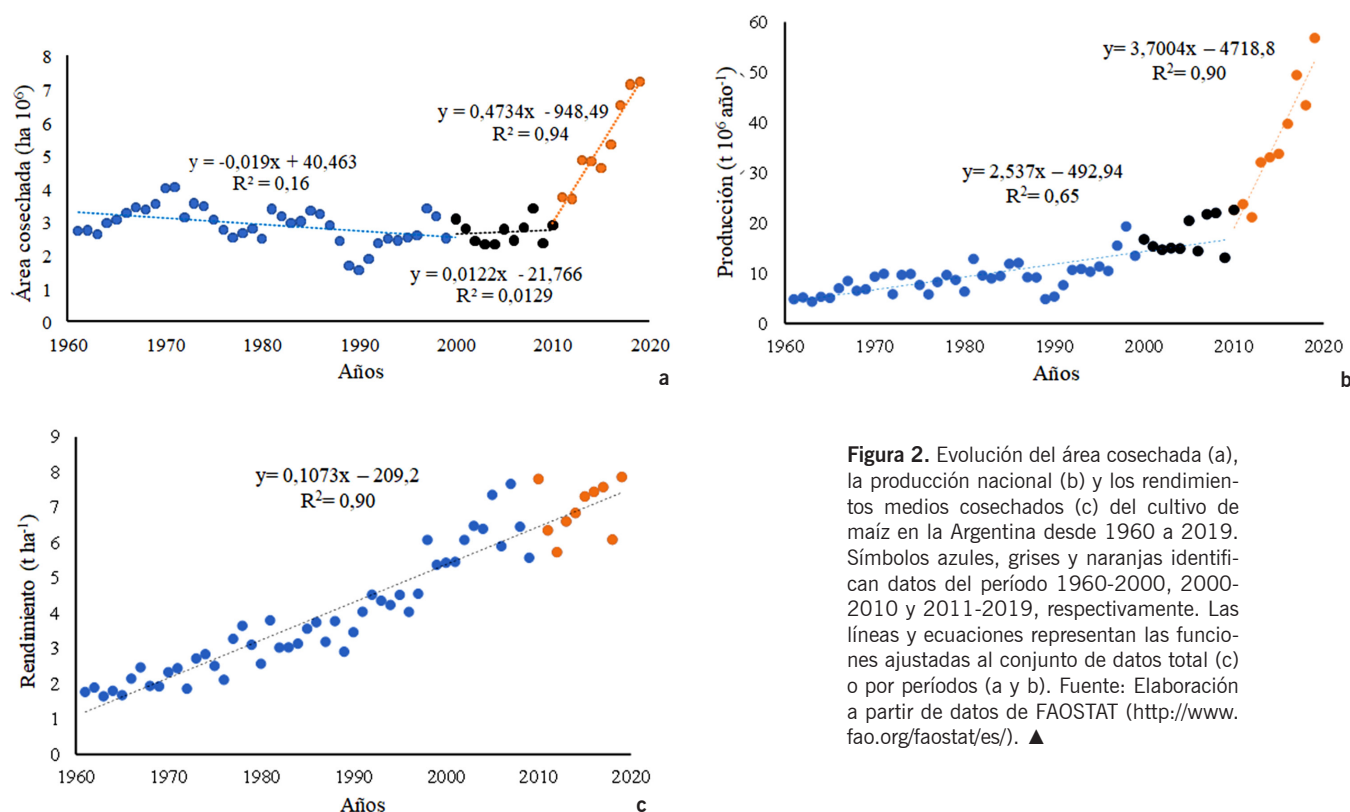


Figura 2. Evolución del área cosechada (a), la producción nacional (b) y los rendimientos medios cosechados (c) del cultivo de maíz en la Argentina desde 1960 a 2019. Símbolos azules, grises y naranjas identifican datos del período 1960-2000, 2000-2010 y 2011-2019, respectivamente. Las líneas y ecuaciones representan las funciones ajustadas al conjunto de datos total (c) o por períodos (a y b). Fuente: Elaboración a partir de datos de FAOSTAT (<http://www.fao.org/faostat/es/>). ▲

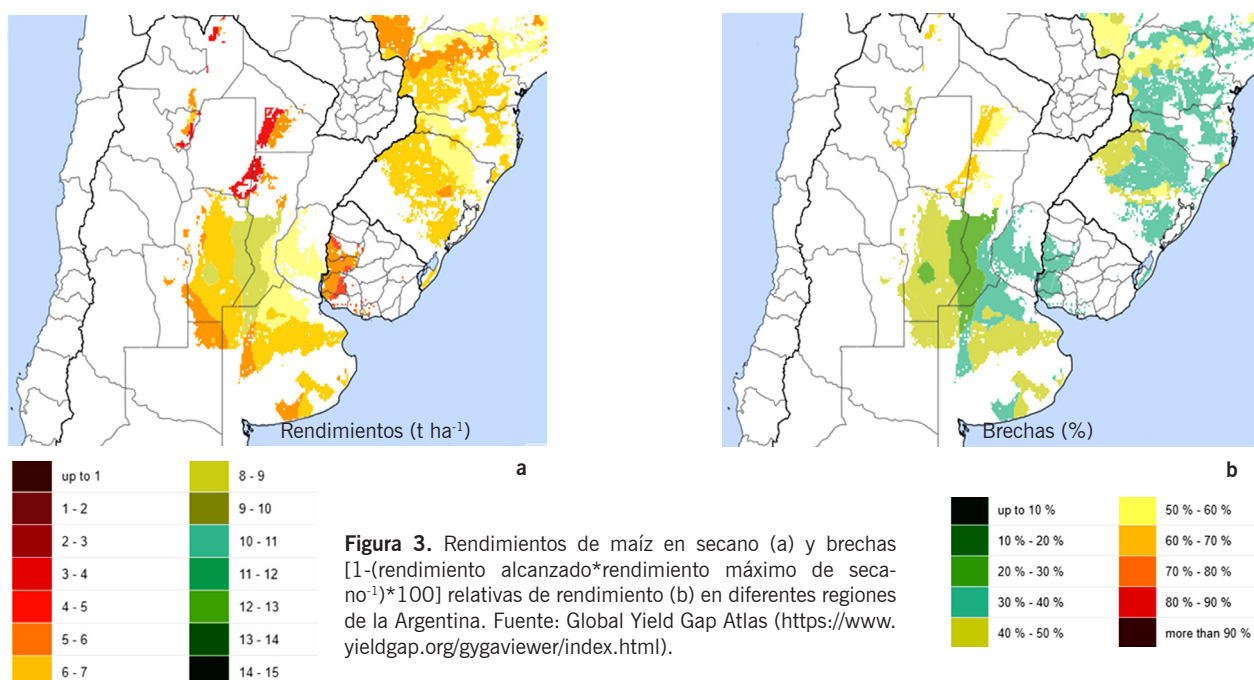


Figura 3. Rendimientos de maíz en secano (a) y brechas $[1-(\text{rendimiento alcanzado} \cdot \text{rendimiento máximo de secano}^{-1}) \cdot 100]$ relativas de rendimiento (b) en diferentes regiones de la Argentina. Fuente: Global Yield Gap Atlas (<https://www.yieldgap.org/gygaviewer/index.html>).

Particularmente, el rendimiento en grano responde de forma parabólica a la densidad de siembra en maíz, con una densidad óptima por sobre la cual el rendimiento disminuye, debido a la presencia de plantas estériles o con baja fijación de granos (Vega y Sadras, 2003). La densidad óptima y el rendimiento alcanzable aumentan ante mejoras en la provisión de recursos del ambiente

(Figura 4). Así, en ambientes de mayor potencialidad (e.g. zona núcleo) se busca maximizar la captura de recursos y la fijación de granos por unidad de superficie, principal componente del rendimiento con densidades de siembra superiores a 7,5 pl m⁻² y niveles de rendimiento superiores a los 90 q ha⁻¹. Por el contrario, en ambientes restrictivos (ambientes marginales), los

agricultores reducen la densidad de siembra ($\leq 6,5$ pl m^{-2}) con el objetivo de no penalizar el rendimiento ($50-90$ q ha^{-1}) (Figura 5).

En este trabajo (i) caracterizaremos la aptitud y las limitantes ambientales de las zonas marginales para la producción del cultivo de maíz en la Argentina, (ii) interpretaremos las bases funcionales de la adopción de las prácticas de manejo que han permitido la expansión del cultivo en estas zonas y (iii) propondremos prácticas de

manejo relacionadas con la estructura del cultivo y la oferta de nutrientes, que permitan reducir las brechas de rendimiento originadas por las principales limitantes ambientales. Para cumplir con estos objetivos se realizará una revisión de las publicaciones relacionadas con la temática y generadas por el grupo maíz de la Cátedra de Cerealicultura de FA-UBA y recientemente por el Grupo de Estudio y Trabajo "Red de Ultra Baja Densidad de Maíz" (<https://www.agro.uba.ar/GET/reduba-demaiz>).

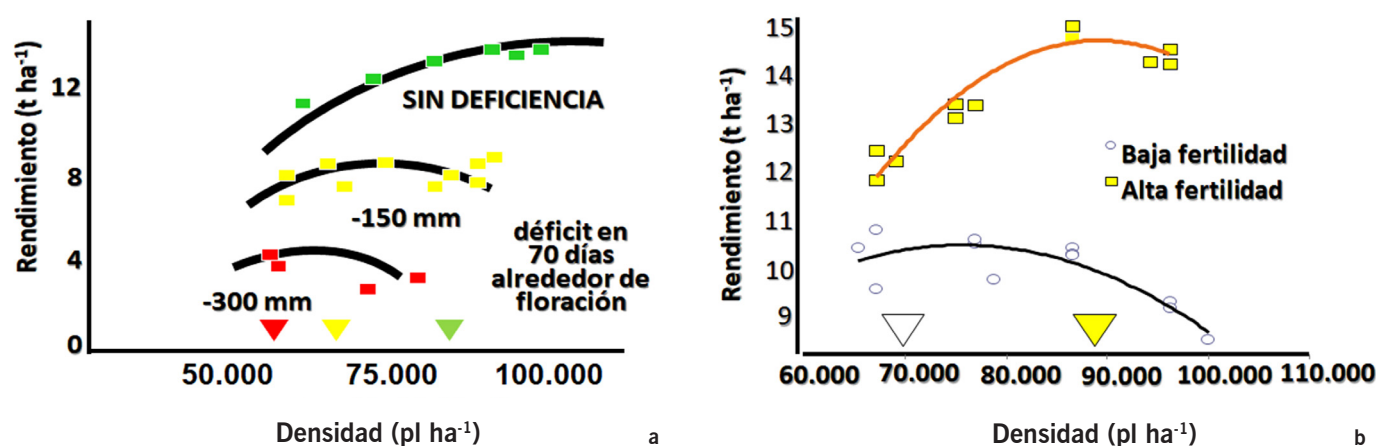
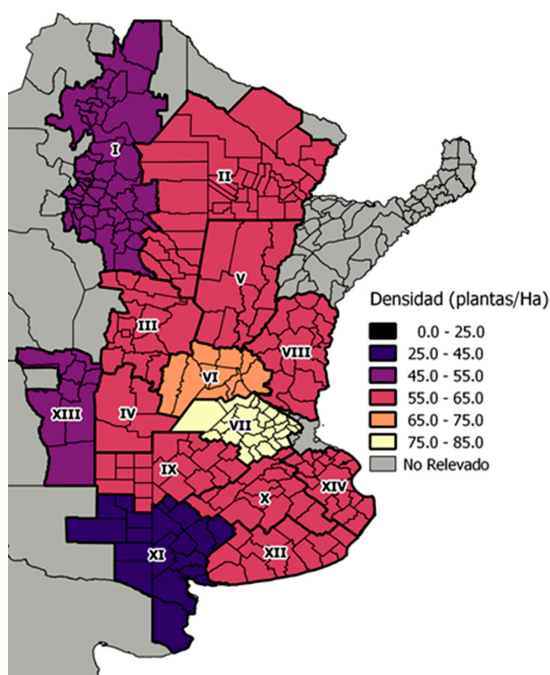


Figura 4. Respuesta del rendimiento del cultivo de maíz a la densidad de siembra, en ambientes con distinto grado de restricción hídrica (a) o nutricional (b). Fuente: Andrade *et al.* (1996) (a) y Fernández (Comunicación personal) (b).

Densidad de siembra Maíz 2019/20

* Maíz con destino grano comercial



Rendimiento Maíz 2019/20

* Maíz con destino grano comercial

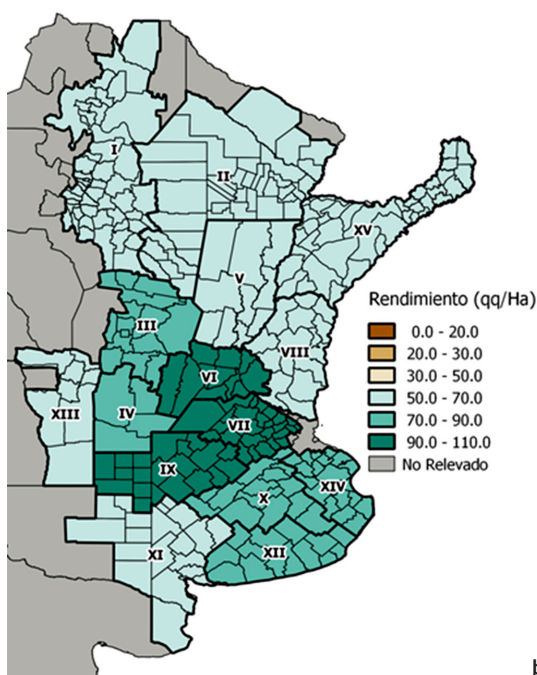


Figura 5. Densidad de siembra (a) y rendimiento medio (b) de maíz en la Argentina en la campaña 2019-2020. Fuente: Departamento de Estimaciones Agrícolas, Bolsa de Cereales de Buenos Aires.

Análisis de la aptitud y las limitantes ambientales para la producción de maíz de secano en ambientes marginales

Los cultivos de maíz experimentan diferentes condiciones hídricas y térmicas durante su ciclo que condicionan la expresión de su rinde (Figura 6). Por ejemplo, en las áreas marginales se observa la ocurrencia de lluvias inferiores a 700 mm año⁻¹, con menos de 80 episodios de lluvias al año, y temperaturas más frías o más cálidas que las de la zona núcleo maicera.

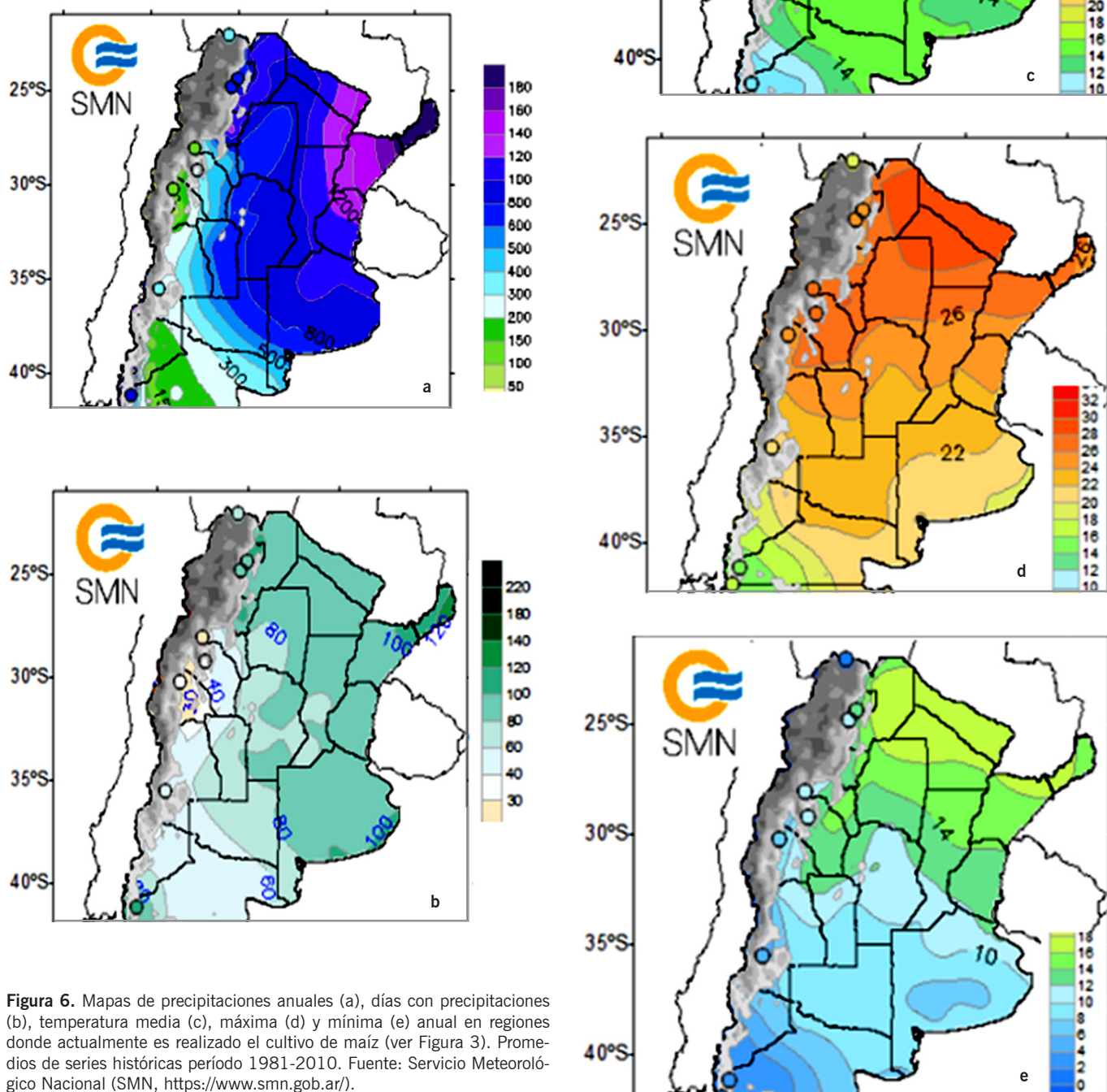


Figura 6. Mapas de precipitaciones anuales (a), días con precipitaciones (b), temperatura media (c), máxima (d) y mínima (e) anual en regiones donde actualmente es realizado el cultivo de maíz (ver Figura 3). Promedios de series históricas período 1981-2010. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional (SMN, <https://www.smn.gob.ar/>).

Sin embargo, esta información no describe las variaciones interanuales de los eventos hídricos y térmicos y los cambios de estos registros a lo largo del año o su coincidencia con los períodos más críticos del cultivo. En especial, tampoco contempla cómo se modifica la ocurrencia de estas variables ante cambios en la fecha de siembra del cultivo. El cultivo de maíz es sensible a heladas durante todo su ciclo, siendo drástico su efecto a partir del inicio de la elongación de los tallos (Otegui *et al.*, 1996). Las bajas temperaturas a la siembra y los bajos contenidos de humedad demoran y desincronizan la emergencia de las plántulas, atentando sobre el logro del stand de plantas (Liu *et al.*, 2004; Pommel y Bonhomme, 1998; Pommel *et al.*, 2002; Andrade y Abbate, 2005). La incidencia de estrés hídrico o térmico resulta crítica para el rendimiento cuando tiene lugar durante el período centrado en la floración femenina, afectando la fijación de granos y, en menor medida, el peso de los granos si estos estreses acontecen durante el llenado de los granos (Figura 7). Es por ello que Maddonni (2012) propuso un método de análisis sencillo para caracterizar el impacto de las condiciones climáticas de una amplia región de la Argentina (de 27° 05' S a 35° 48' S, de 61° 5' O a 64° 21' O) sobre el rinde potencial de maíces tempranos y tardíos y, en particular, sobre la ocurrencia de diversas limitaciones climáticas a lo largo del ciclo (bajas temperaturas y bajo contenido de agua del suelo a la siembra, heladas tardías y tempranas, estrés por sequía a floración y estrés por calor a floración y durante el llenado de los granos).

El análisis se basó en estudios previos de eco-fisiología del cultivo de maíz y el uso de series históricas de registros climáticos diarios (temperaturas mínimas y máximas, radiación solar y precipitaciones) de seis localidades de la región maicera argentina. Los resultados se analizaron mediante un método probabilístico, y luego se organizaron como una lista de verificación a considerar al momento de decidir la fecha de siembra en una determinada localidad. Por lo tanto, para cada escenario de producción (combinación de localidad y fecha de siembra), los agricultores tendrían una herramienta que les permitiría prestar especial atención a las restricciones climáticas con mayor probabilidad de ocurrencia, para incluir algunas prácticas culturales que permitan evitar o mitigar la restricción climática más severa para la producción del maíz. A continuación, se presenta las listas de verificación para dos localidades: Las Breñas, Chaco (27°05' S, 61°05' O) y Pehuajó, Buenos Aires (35°48' S, 61°54' O) (Cuadro 1). En Las Breñas, el bajo

contenido de humedad en la profundidad de siembra y el balance hídrico restrictivo durante el período crítico centrado en floración, serían las limitaciones más severas en fechas de siembra tempranas, seguidas de una alta probabilidad de bajas temperaturas a la siembra que prolongarían la emergencia y, en consecuencia, afectarían el logro y la uniformidad del stand de plantas. Las fechas de noviembre y diciembre reducen estos riesgos, pero incrementan los riesgos de estrés térmico tanto alrededor de floración como durante el llenado.

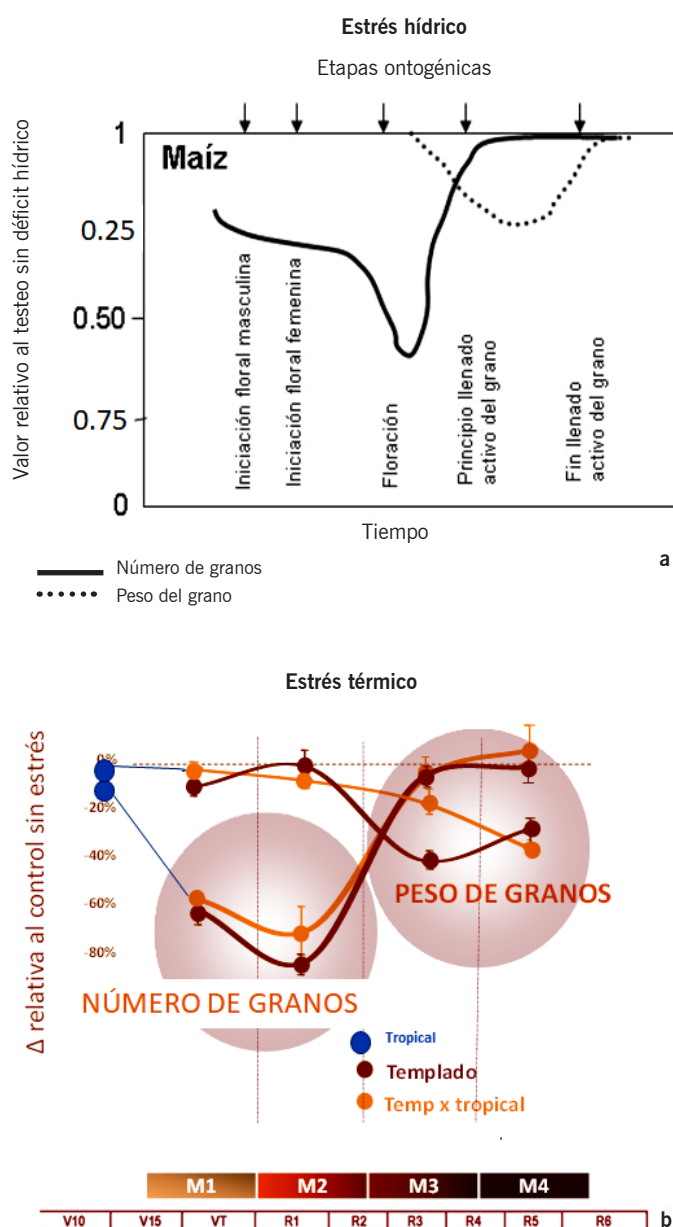


Figura 7. Incidencia de un episodio de estrés hídrico (a) o térmico (b) sobre el número y peso de los granos de maíz, según el momento del ciclo del cultivo. Para el estrés térmico se presenta información de un genotipo de sangre/germoplasma templado/o, tropical y templado/o x tropical. Fuente: Adaptado de Hall *et al.* (1981); Rattalino *et al.* (2011); Mayer *et al.* (2014) y Navarrete Sánchez (2017).

Cuadro 1. Listas de verificación sobre restricciones climáticas para la producción de maíz en Las Breñas (Chaco) y Pehuajó (Buenos Aires), en maíces tempranos y tardíos. Fuente: Adaptado de Maddonni (2012).

Limitación climática	Las Breñas					
	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero
Heladas						
Demora en emergencia						
Poca agua en cama de siembra						
Poca reserva de agua en el perfil						
Déficit hídrico en período crítico						
Golpes de calor en floración						
Golpes de calor en llenado						

Limitación climática	Pehuajó			
	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Heladas				
Demora en emergencia				
Poca agua en cama de siembra				
Poca reserva de agua en el perfil				
Déficit hídrico en período crítico				
Golpes de calor en floración				
Golpes de calor en llenado				

0
 0-0.25
 0.25-0.50
 0.50-0,75
 0.75-1

Por lo tanto, los agricultores de Las Breñas podrían considerar algunas estrategias o decisiones para mitigar estas limitaciones como, por ejemplo, la elección de fechas de siembra tardías demorándola hasta principios de enero debido al prolongado período libre de heladas de esta localidad. En particular, las siembras de enero posicionarían a la floración ante una mejor condición hídrica que en las demás fechas de siembra. Además, las siembras de enero presentarían las menores frecuencias de episodios de golpes de calor tanto durante la floración como durante el llenado de los granos (Figura 8). El uso de materiales tolerantes a elevadas temperaturas podría también ser contemplado para mitigar los efectos térmicos (Figura 7b).

La lista de verificación para Pehuajó demostraría la alta incidencia de las bajas temperaturas y del bajo contenido de humedad para la implantación de los cultivos hasta principios de noviembre, mientras que el riesgo de heladas tardías afectaría las etapas tempranas de los maíces de septiembre y octubre. El riesgo de heladas tempranas sería mayor durante el llenado de los granos de los maíces de diciembre. Además, Pehuajó presenta alta incidencia de déficit hídrico durante la floración para todas las fechas de siembra analizadas. En particular, si se contrasta la necesidad de agua durante el período crítico de los maíces de octubre (considerando diferentes contenidos de agua útil a la siembra) con la de los tardíos de diciembre (alta probabilidad de comenzar el

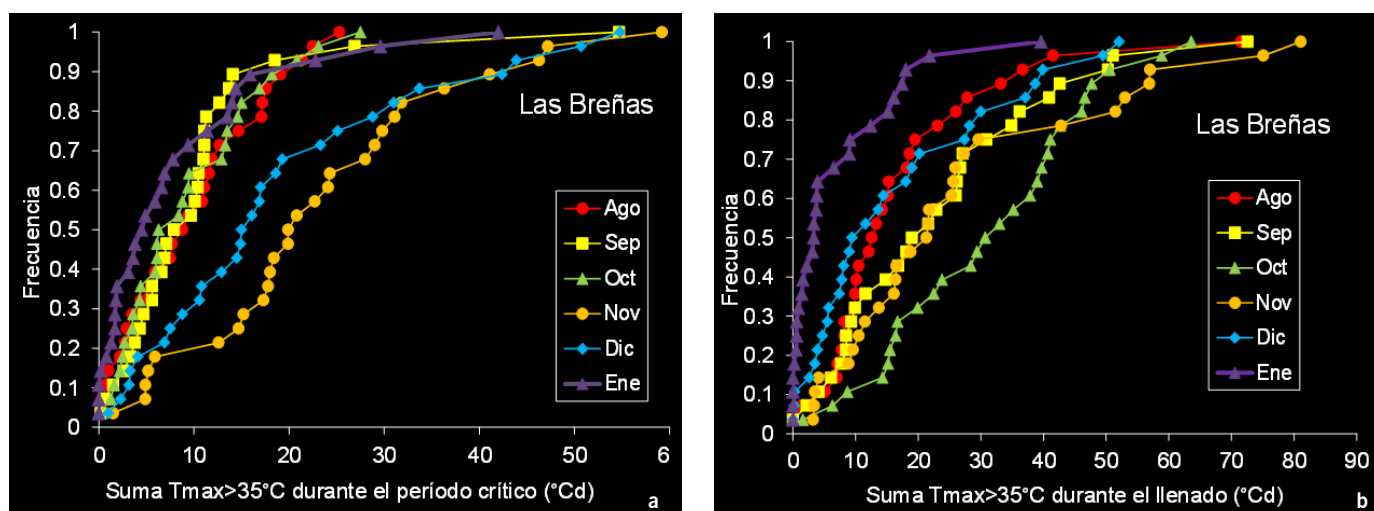


Figura 8. Frecuencias de episodios de golpes de calor (suma térmica de las temperaturas máximas diarias por encima de 35°C) para 6 fechas de siembra de maíz en Las Breñas, Chaco, durante el período centrado en la floración femenina (a) y el llenado de los granos (b). Fuente: Adaptado de Maddonni (2012).

ciclo del cultivo con el perfil cargado de agua), en años secos los maíces de diciembre presentarían la menor necesidad de agua. En años medios o con registros de precipitaciones por encima de la media (húmedos), los maíces de octubre sembrados con un contenido de agua útil inicial igual o superior a los 175 mm presentarían una similar o menor necesidad de agua que los de diciembre (Figura 9). En consecuencia, el pronóstico de año (seco, medio o húmedo) y el contenido de agua útil del perfil a principios de octubre serían herramientas que permitirían en esta localidad decidir o no un retraso en la fecha de siembra de los cultivos de maíz. En el caso de realizar un maíz tardío de diciembre, la elección

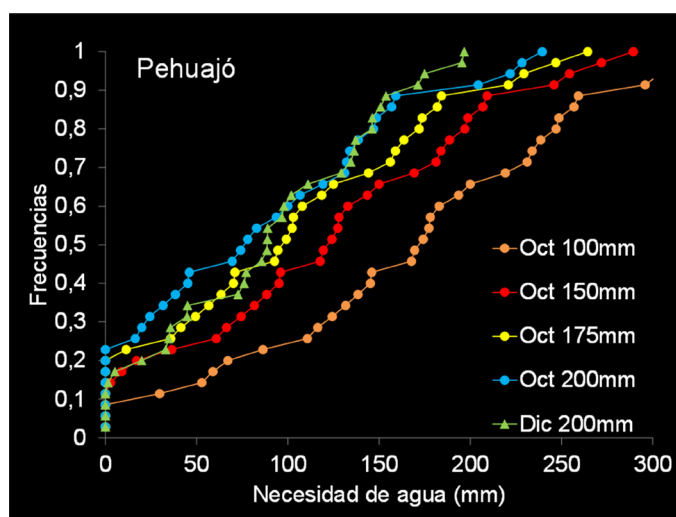


Figura 9. Frecuencias de necesidad de agua durante el período crítico (floración) de maíces cultivados en Pehuajó en dos fechas de siembra, octubre (temprana) con 4 contenidos de agua útil del perfil a la siembra, y diciembre (tardía) con un contenido de agua útil de 200 mm. La necesidad de agua fue estimada como la cantidad (mm) de agua necesaria para que el contenido de agua útil del perfil no resulte inferior al 50% del agua útil total durante el período crítico. Fuente: Elaborado a partir de Maddonni (2012).

de un híbrido con un ciclo más corto sería suficiente para reducir el riesgo de daños por heladas durante el llenado de los granos.

Recientemente, Rotili *et al.* (2021a) caracterizaron los distintos escenarios hídricos para maíces tardíos, en tres localidades del SO de Buenos Aires, donde el registro anual de lluvias es menor que el de Pehuajó (ca. 950 mm). En el SO de Buenos Aires, las lluvias anuales disminuyen de los 800 mm en el este a menos de 600 mm en el oeste, y presentan una alta variabilidad interanual. Para ello, utilizaron el modelo de simulación APSIM (Holzworth *et al.*, 2014), y con el método descrito en Hammer *et al.* (2014), identificaron para cada localidad cinco tipos de estrés, Tipo 1= limitación de agua muy baja, Tipo 2= limitación de agua baja después del cuaje de los granos (sequía terminal leve), Tipo 3= limitación severa de agua alrededor de la floración (e.g. sequía estacional) con una recuperación después del cuaje, Tipo 4= sequía terminal severa que comienza antes de la floración, y Tipo 5= sequía terminal severa que comienza después del cuaje. Así, la frecuencia simulada de ambientes sin limitación de agua (Tipo 1) fue baja en todas las localidades (<20%), y mayor para Tipo 1+Tipo 2 (10% al 44%) y Tipo 3 (20-36%) (Figura 10).

También hubo diferencias en los patrones de estrés entre localidades. Estos patrones describen la condición marginal de estas localidades para la producción de maíz, debido a las altas frecuencias de sequía estacional durante la floración (Tipo 3) y extendiéndose durante el llenado (Tipo 4) (en Bordenave y Barrow), o la alta variabilidad interanual de los diferentes tipos de estrés presente en Coronel Suárez.

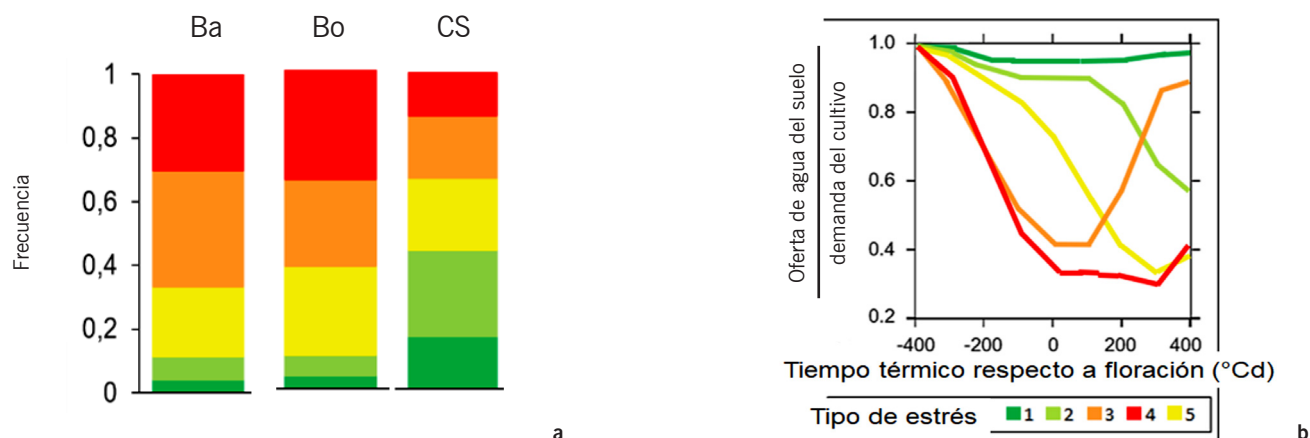


Figura 10. (a) Frecuencia de 5 tipos de estrés en tres localidades (Ba: Barrow, Bo: Bordenave y CS: Coronel Suárez) del SO de Buenos Aires. (b) Ejemplo de los 5 tipos de estrés según su ocurrencia a lo largo del ciclo de maíz y su intensidad. Tipo 1 sin estrés, Tipo 2, Tipo 5 y Tipo 4, sequía terminal con menor a mayor intensidad y ocurrencia más tardía o temprana en el ciclo y Tipo 3 sequía estacional alrededor de floración. Fuente: Extraído de Rotili *et al.* (2021a).

Ante estos escenarios, los agricultores asumen estrategias defensivas, tal como fue documentado por Rotili *et al.* (2020) para ambientes marginales de producción de maíz en Australia. Comparando los manejos defensivos frente a otras estrategias, los rendimientos obtenidos en los sitios más húmedos que apliquen una estrategia de aversión al riesgo (e.g. manejo defensivo con baja densidad de siembra, $\leq 3 \text{ pl m}^{-2}$) serían inferiores en el 75% de los años a los de las otras estrategias (e.g. aumento en la densidad de siembra, $>4,5 \text{ pl m}^{-2}$), mientras que, en los sitios más secos, los rendimientos de la estrategia de aversión al riesgo tendieron a superar a las otras estrategias en más del 60% de los años. En la próxima sección analizaremos las bases ecofisiológicas que sustentan las prácticas de manejo en ambientes marginales de la Argentina.

Bases funcionales de la adopción de las prácticas de manejo que han permitido la expansión del cultivo en ambientes marginales

En esta sección, en primer lugar, se tomará como ejemplo al SO de la provincia de Buenos Aires. En esta región entre 2008 y 2015, la superficie de maíz aumentó de 50.000 a 250.000 ha con una tasa de incremento de $17.881 \text{ ha año}^{-1}$. La estrategia de manejo del cultivo de maíz en esta región cambió de un manejo ofensivo (fecha de siembra temprana y alta densidad de siembra) aplicada en los ambientes de mayor potencialidad (minoritarios), a un manejo defensivo (fecha de siembra tardía y baja densidad de siembra) que ha permitido expandir la superficie con este cultivo hacia los ambientes menos productivos (mayoritarios). Así, durante este período, se registró un retraso de 30 días en la fecha media de siembra (de mediados de octubre a mediados

de noviembre) y una reducción de la densidad media de plantas (ca. $0,5 \text{ pl m}^{-2} \text{ año}^{-1}$) pasando de $7,2 \text{ pl m}^{-2}$ a $3,4 \text{ pl m}^{-2}$ o incluso menores. Como consecuencia se lograron rendimientos más estables en el tiempo y entre ambientes (diferencias en el régimen hídrico de las localidades y en la profundidad de la tosca), principalmente aumentando los pisos de rendimientos en los ambientes de menor productividad (percentil 30; Figura 11 y Cuadro 2).

Recientemente, el uso de modelos de simulación agronómica permitió contextualizar las ventajas de la demora en la fecha de siembra y de la reducción en la densidad de siembra, en términos de la economía del agua, para tres localidades el SO de la provincia de Buenos Aires, con distinta profundidad efectiva del suelo

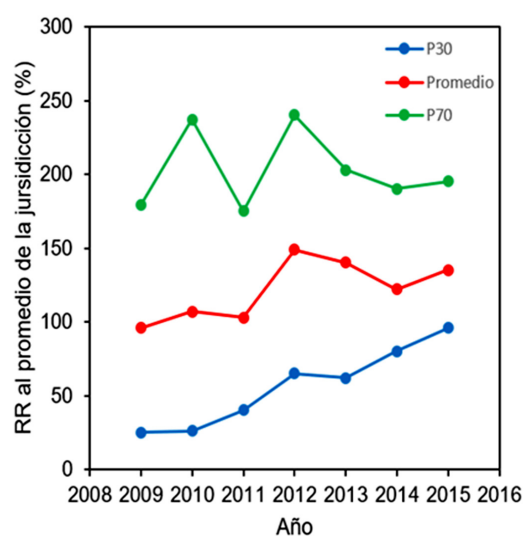


Figura 11. Rendimientos relativos medios de maíz (●) y del percentil 70 (●) y percentil 30 (●) respecto al promedio de la jurisdicción en el que se encontraban los lotes analizados del grupo de productores de la región CREA Sudoeste que adaptaron el manejo defensivo del cultivo de maíz durante el período 2008-2016. Fuente: elaborado a partir de datos inéditos del GEA-SO (Grupo Experimental Agrícola del Sudoeste).

Cuadro 2. Rendimientos medios, desvíos estándar y rendimientos máximos en maíces de siembra temprana y tardía del GEASO en suelos someros y profundos.

	Rendimiento (kg ha ⁻¹)		
	Promedio	Desvío	Máximo
Tardía	7.564	1.452	11.951
Profundo	7.671	1.416	11.951
Somero	7.130	1.521	11.675
Temprana	6.191	2.804	15.340
Profundo	6.289	2.507	12.652
Riego	11.993	2.034	15.340
Somero	4.784	2.092	8.687
Total general	6.791	2.409	15.340

según la presencia de tosca (Rotili *et al.*, 2019). La evapotranspiración del cultivo durante el ciclo (ETc ciclo) disminuyó ligeramente (ca. 3-32 mm más bajo) con el retraso de la fecha de siembra, pero los cultivos de siembra tardía derivaron una mayor proporción de la ETc total a los períodos reproductivos (ETc reproductivo ETc ciclo⁻¹) que los de siembra temprana. Las diferencias entre las fechas de siembra de esta relación (ETc reproductivo ETc ciclo⁻¹) fueron mayores en Barrow (0,40 vs 0,31 y 0,37 vs 0,31 para siembra tardía vs temprana en suelos someros y profundos, respectivamente) que en Bordenave (0,34 vs 0,28 y 0,34 vs 0,29 para tardía vs siembra temprana en suelos someros y profundos, respectivamente). Para Coronel Suárez se simularon pequeñas

diferencias entre fechas de siembra y profundidades de suelo (0,40 vs. 0,38 y 0,42 vs. 0,40 para siembra tardía vs temprana en suelos poco profundos y profundos, respectivamente). En suelos superficiales y profundos de Barrow y Bordenave, los valores de ETc reproductivo ETc ciclo⁻¹ resultaron inferiores a 0,10 en el 25% de los años para los cultivos de maíz de siembra temprana. Para estos escenarios, las simulaciones indicaron un cese del crecimiento de los granos durante las primeras etapas del llenado efectivo debido a la baja disponibilidad de agua del suelo. La ETc ciclo en siembras tardías no varió por la disminución en la cantidad de plantas (para un rango entre 2 y 6 pl m⁻²), pero la transpiración por planta aumentó con la disminución de la densidad en mayor proporción en los suelos profundos. Interesantemente, los impactos de la fecha de siembra y de la densidad sobre la economía del agua en esta región no variaron entre las fases del ENSO, desestimando el uso del pronóstico de las fases del ENSO como criterio para decidir fecha y densidad de siembra del cultivo de maíz. En consecuencia, la mejora en la economía del agua en las etapas reproductivas de maíces de siembra tardía, en conjunto con la baja densidad de siembra, permitirían que, en estos ambientes restrictivos, las plantas del estándar alcancen tasas de crecimiento alrededor de floración lo suficientemente elevadas para lograr la fijación de granos y se evite la esterilidad de plantas en años con oferta ambiental promedio o inferior al promedio.

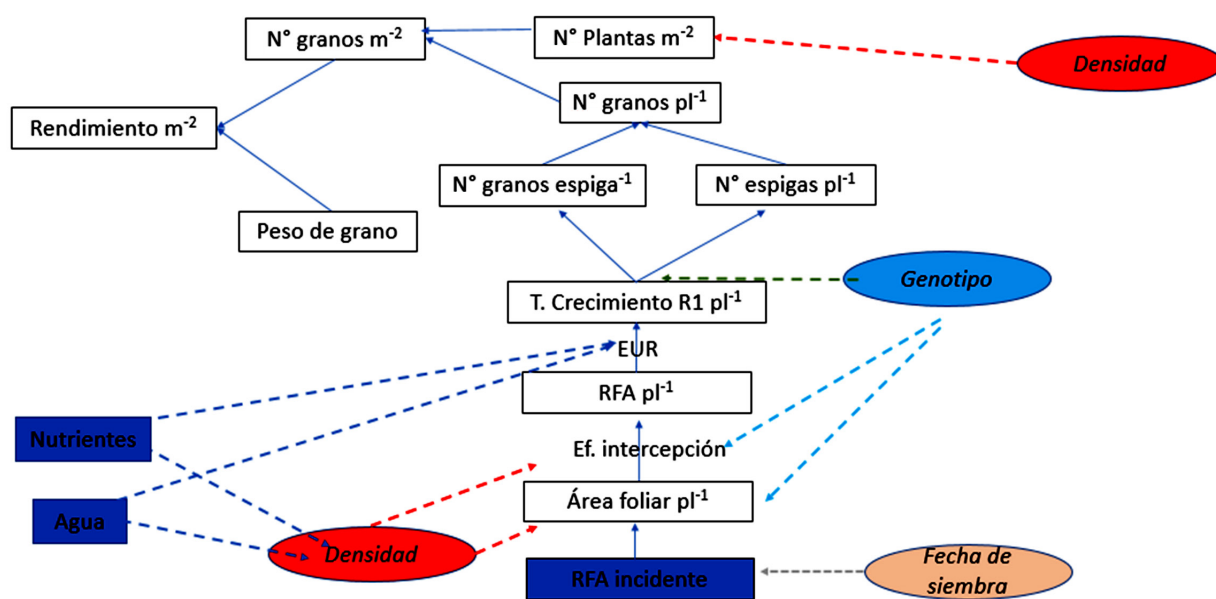


Figura 12. Marco conceptual de los efectos de la densidad de siembra, fecha de siembra, genotipo y oferta nutricional e hídrica sobre el rendimiento de un cultivo de maíz. Las flechas con líneas continuas identifican el flujo de carbono desde la radiación fotosintéticamente activa (RFA) incidente hasta el número de granos por planta. El flujo de carbono hacia el peso de los granos no está detallado. Las flechas con líneas punteadas indican flujos de información o de afectación de algunas de las variables regulatorias del flujo de carbono, e.g. eficiencia de intercepción (Ef. intercepción), eficiencia en el uso de la radiación (EUR). T. Crecimiento R1 planta⁻¹: tasa de crecimiento de la planta en el período de 30 días centrado en la floración femenina (R1).

Asimismo, en años con oferta ambiental superior al promedio, la fecha tardía y la baja densidad de siembra permitirían a las plantas alcanzar elevadas tasas de crecimiento alrededor de floración, obteniendo una máxima fijación de granos por espiga y más de una espiga por planta, en aquellos genotipos caracterizados como prolíficos (Figura 12).

Por lo tanto, las bajas densidades de siembra empleadas determinan la producción de espigas múltiples, no sólo aportadas por el vástago principal (generalmente no más de dos espigas por vástago), sino también por las espigas de macollos, que logran su mayor expresión en suelos profundos (Figura 13 y Foto 1).

Esta manifestación de espigas múltiples de ambas fuentes de plasticidad puede comprenderse a partir de las relaciones funcionales entre la fijación de granos y el crecimiento de las plantas alrededor de floración, en híbridos con diferente grado de prolificidad (Ciancio *et al.*, 2016) y en híbridos macolladores (Rotili *et al.*, 2021). En genotipos no prolíficos el número de granos planta⁻¹ aumenta asintóticamente con la tasa de crecimiento de la planta, hasta una tasa umbral por encima del cual se máxima el número de granos de la única espiga y se satura la respuesta. En genotipos prolíficos, el número de granos planta⁻¹ se relaciona más linealmente con la tasa de crecimiento de la planta alrededor de la floración debido a la contribución de granos de la espiga sub-apical, en plantas con tasas mayores a 4 a 6 g pl d⁻¹. Para los genotipos macolladores, la relación entre el número de granos planta⁻¹ y la tasa de crecimiento de la planta resultaría lineal, e incluiría granos establecidos en espigas de macollos a mayores tasas de crecimiento de las plantas que aquellas que expresan la prolificidad (Figura 14).

Las densidades utilizadas en los ambientes marginales permitirían alcanzar altas tasas de crecimiento de las plantas alrededor de floración, permitiendo expresar los mecanismos de plasticidad mencionados, y minimizar la respuesta del rendimiento a la densidad de siembra, por un mayor rinde en bajas densidades (Ross *et al.*, 2019). Por ejemplo, comparando la respuesta del rendimiento en maíces tempranos vs tardíos en esta región, se sugiere densidades óptimas de siembra no mayores a 2,5 pl m⁻² en siembras tempranas y cercanas a las 4 pl m⁻² en siembras tardías, con diferencias genotípicas en los rindes alcanzados en densidades óptimas de siembra según los ambientes (Figura 15).

Sin embargo, el mayor crecimiento vegetativo de plantas con macollos podría comprometer el balance hídrico durante las etapas reproductivas y con ello la

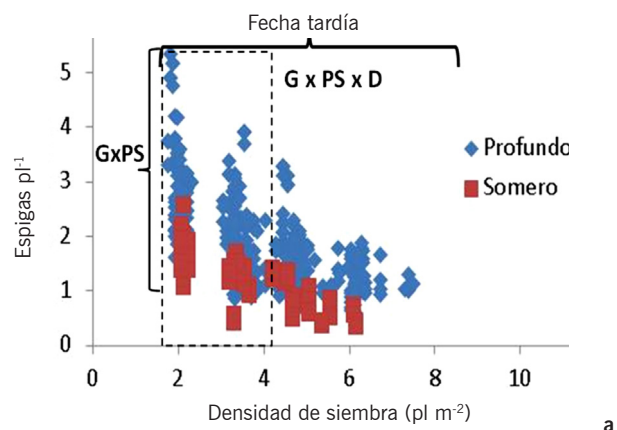


Figura 13. Expresión de espigas múltiples (espigas pl⁻¹) de diversos genotipos en función de la densidad de siembra, en fecha de siembra tardía en suelos someros y profundos del SO de Buenos Aires. G: genotipo, D: densidad, PS: profundidad de suelo, somero entre 40-60 cm y profundo mayor a 110 cm.



Foto 1. Foto de un cultivo con espigas múltiples. Fuente: Elaborado a partir de datos inéditos del GEASO (Grupo Experimental Agrícola del Sudoeste).

fijación de granos. Esta pregunta fue recientemente respondida (Rotili *et al.*, 2021a) mediante la combinación de modelos de simulación y funciones de fijación de granos obtenidas experimentalmente para un híbrido macollador vs plantas del mismo híbrido sin macollos.

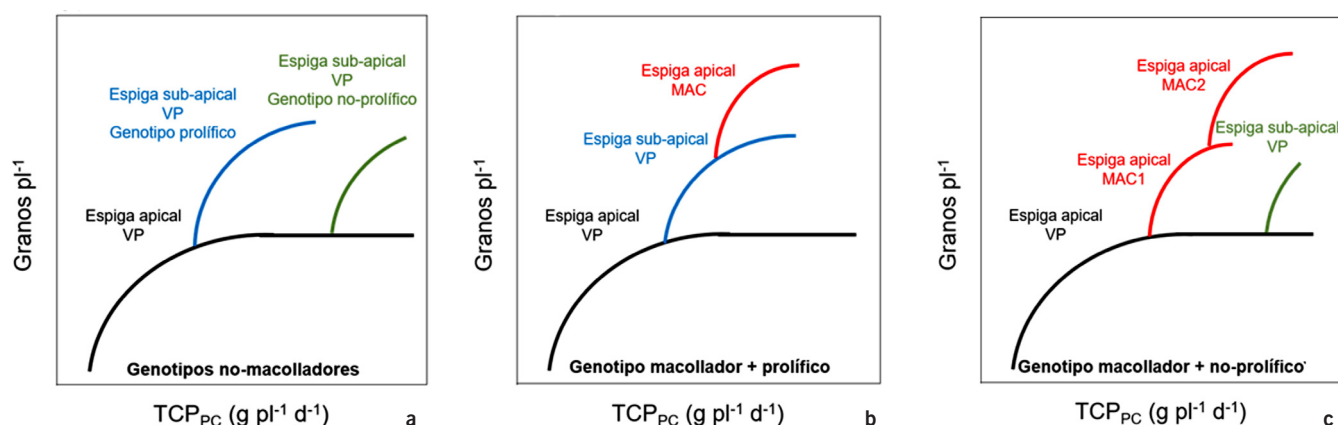


Figura 14. Relaciones entre la fijación de granos planta⁻¹ y la tasa de crecimiento de las plantas alrededor de floración (TCP_{PC}) en híbridos con diferente grado de prolificidad sin (a) y con (b, c) aporte de espigas de macollos. Fuente: Extraído de Rotili *et al.* (2021b).

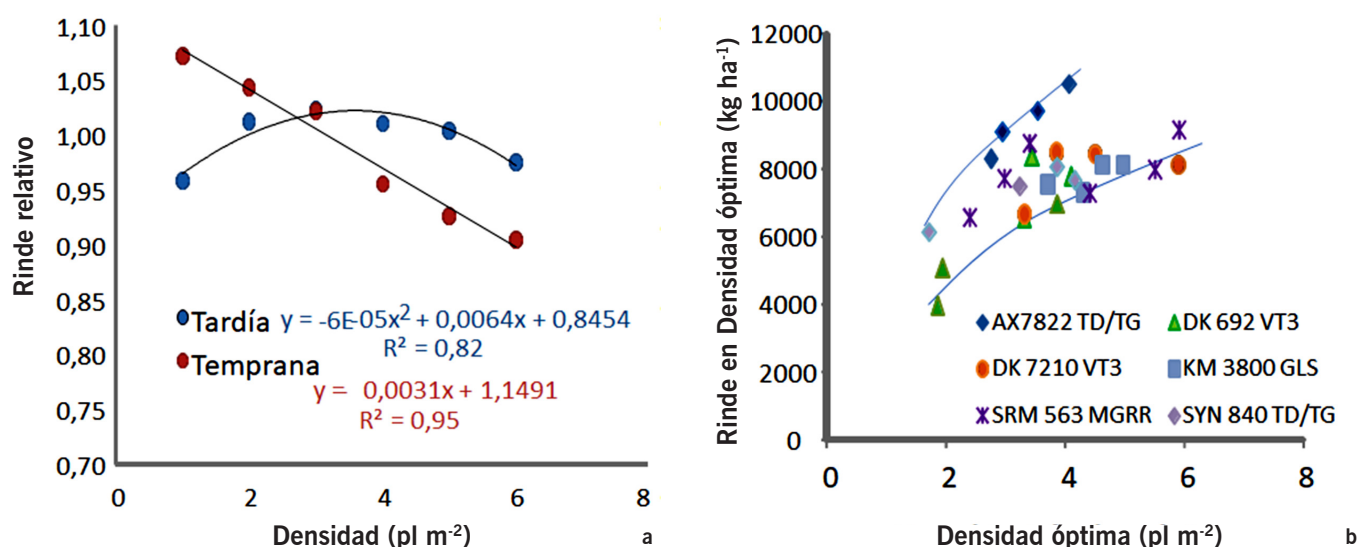


Figura 15. Respuesta del rendimiento (relativo al promedio de cada ambiente) medio de maíces tempranos y tardíos a la densidad de siembra (a) y rendimiento de 6 híbridos de maíz para la densidad óptima de siembra en 5 diferentes ambientes del SO de la Buenos Aires. Las líneas indican al ajuste para el conjunto de datos en siembra temprana o tardía (izquierda), o para el AX7822TD/TG y los demás híbridos (mano alzada) (b). Fuente: Elaborado a partir de datos inéditos del GEASO (Grupo Experimental Agrícola del Sudoeste).

En los ambientes más secos del SO de Buenos Aires, la fijación de granos simulada para los cultivos sin macollos superó a los de los cultivos macollados en la mayoría de los años, mientras que en los ambientes más húmedos la respuesta fue la contraria. Datos experimentales recientes confirman esta información para ambientes del SO de Buenos Aires con bajo régimen pluviométrico en suelos someros (Rotili *et al.*, 2021b). En localidades con precipitaciones intermedias y muy variables, los cultivos que macollaron tuvieron una fijación de granos simulada más alta que los no macollados, aproximadamente en la mitad de los años, y los beneficios del macollaje en años húmedos sobre la fijación de granos fueron mayores que las pérdidas simuladas en años secos. En consecuencia, este mecanismo de plasticidad reproductiva podría resultar más o menos ventajoso,

según el ambiente y la oferta de recursos en etapas vegetativas y reproductivas del cultivo. Asimismo, la expresión de la prolificidad ha estado siempre asociada a las altas tasas de crecimiento de las plantas en genotipos prolíficos, originadas por el uso de bajas densidades de siembra, pero por primera vez se ha documentado el efecto del N como regulador de este proceso independientemente de la tasa de crecimiento por planta en baja densidad (Parco, 2020) (Figura 16). En consecuencia, en ambientes marginales no sólo la oferta de agua sino también la nutricional deberían ser consideradas para lograr la producción de espigas múltiples, que permitan incrementar los rindes logrados en bajas densidades. Sin embargo, estos recursos dependerán también de la localidad, el tipo de suelo y de las variaciones interanuales de los registros climatológicos y la oferta

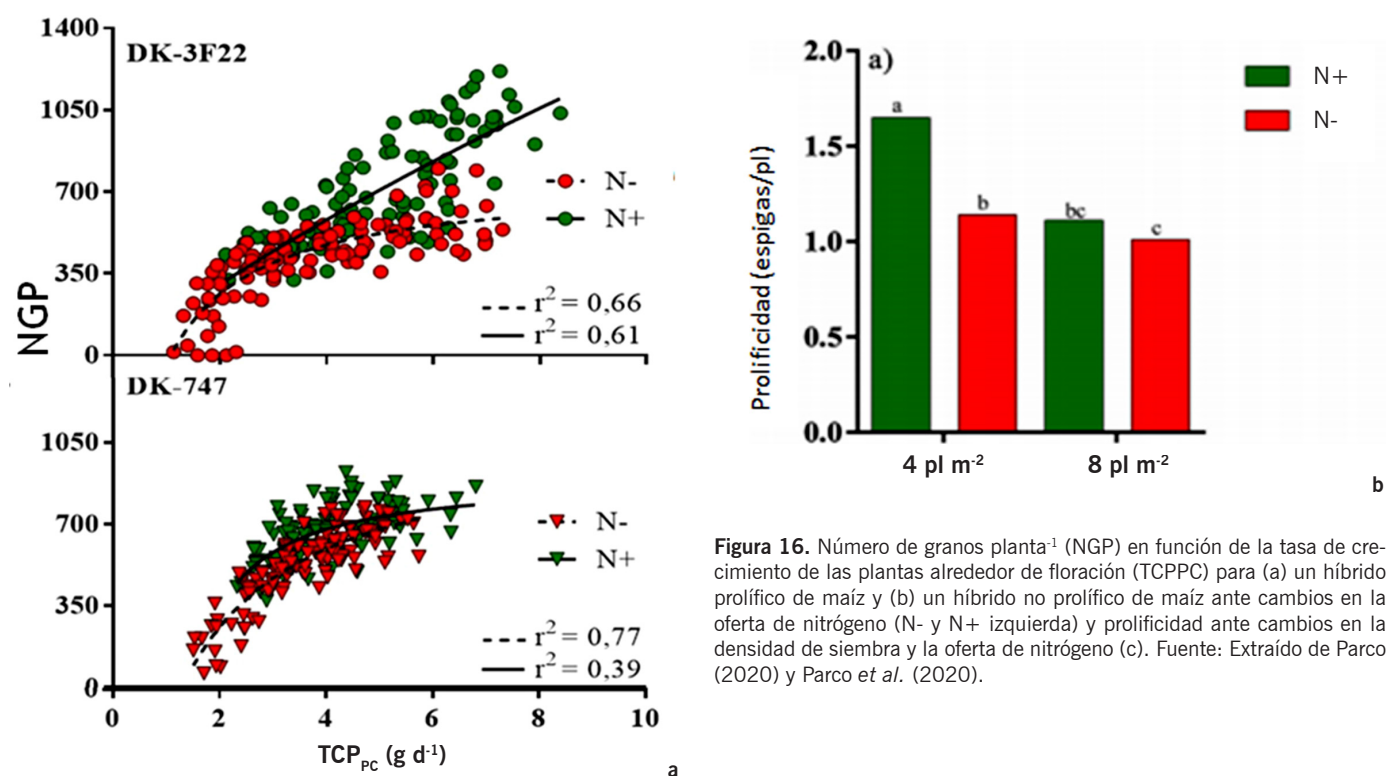


Figura 16. Número de granos planta⁻¹ (NGP) en función de la tasa de crecimiento de las plantas alrededor de floración (TCP_{pc}) para (a) un híbrido prolífico de maíz y (b) un híbrido no prolífico de maíz ante cambios en la oferta de nitrógeno (N- y N+ izquierda) y prolificidad ante cambios en la densidad de siembra y la oferta de nitrógeno (c). Fuente: Extraído de Parco (2020) y Parco et al. (2020).

de nutrientes (e.g. nutrientes disponibles de la materia orgánica del suelo).

A partir de estas observaciones y bases teóricas, *El Grupo de estudio y trabajo Red de ultra baja densidad de maíz* (GET RED UBA de MAÍZ; <https://www.agro.uba.ar/GET/reduba-demaiz>), diseñó una red experimental, que abarca las zonas marginales de producción de maíz, por restricciones climáticas (principalmente régimen pluviométrico, temperaturas máximas) y edafológicas (suelos con texturas gruesas, o muy finas, limitaciones de profundidad efectiva por presencia de horizontes endurecidos con carbonato de calcio; tosca; o por suelos thapo, lotes con alta variabilidad intra-lote), en las cuales los cultivos se plantean en fecha de siembra principalmente tardía, en baja densidad, empleando híbridos comerciales adaptados a cada región que expresan mecanismos de plasticidad reproductiva o vegetativo-reproductiva y un material sin mecanismos de plasticidad pero con alta fijación de granos (e.g. *flex*). Las localidades evaluadas (más de 20) se encuentran ubicadas en el NOA y NEA, en los suelos pesados del centro y NE de Entre Ríos y del N de Buenos Aires, en el O, SO y SE de Buenos Aires y en el Este de La Pampa. El objetivo general del GET RED UBA de MAÍZ es generar conocimiento y formar RRHH focalizado en las prácticas de manejo del cultivo de maíz en ambientes marginales. Entre los diversos objetivos particulares, nos proponemos estudiar (i) la expresión de la plastici-

dad vegetativo-reproductiva en híbridos comerciales de maíz y la funcionalidad de estos procesos ante cambios en la densidad de siembra en interacción con el ambiente y (ii) la contribución de la producción de espigas múltiples por planta al rendimiento ante cambios en la densidad de siembra.

Para el conjunto de datos de la red, se puede (i) observar la diferente expresión de los rasgos de plasticidad entre fenotipos, (ii) la contribución de espigas sub-apicales y/o de macollos al rendimiento, y (iii) el incremento de los pisos y techos de rendimiento atribuido a la producción de espigas sub-apicales (híbridos prolífico y prolífico+macollador) y de macollos (híbrido macollador) (Figura 17).

De manera de poder describir a través de los ambientes el comportamiento de los híbridos con plasticidad vs el híbrido sin mecanismos de plasticidad, pero con alta fijación de granos (denominado comercialmente híbrido *flex*), se compararon en cada sitio y densidad las diferencias de rendimientos de estos materiales (Figura 18). Los híbridos con plasticidad resultaron ventajosos en términos de rendimiento vs el híbrido poco plástico (*flex*) en ambientes inferiores a los 8.000 kg ha⁻¹, en los cuales se utilizaron densidades de siembra inferiores a las 45.000 pl ha⁻¹. En particular en ambientes entre 2.000-4.000 kg ha⁻¹ se destaca el rendimiento del híbrido macollador por sobre los demás fenotipos. Estos mecanismos destacan la importancia del

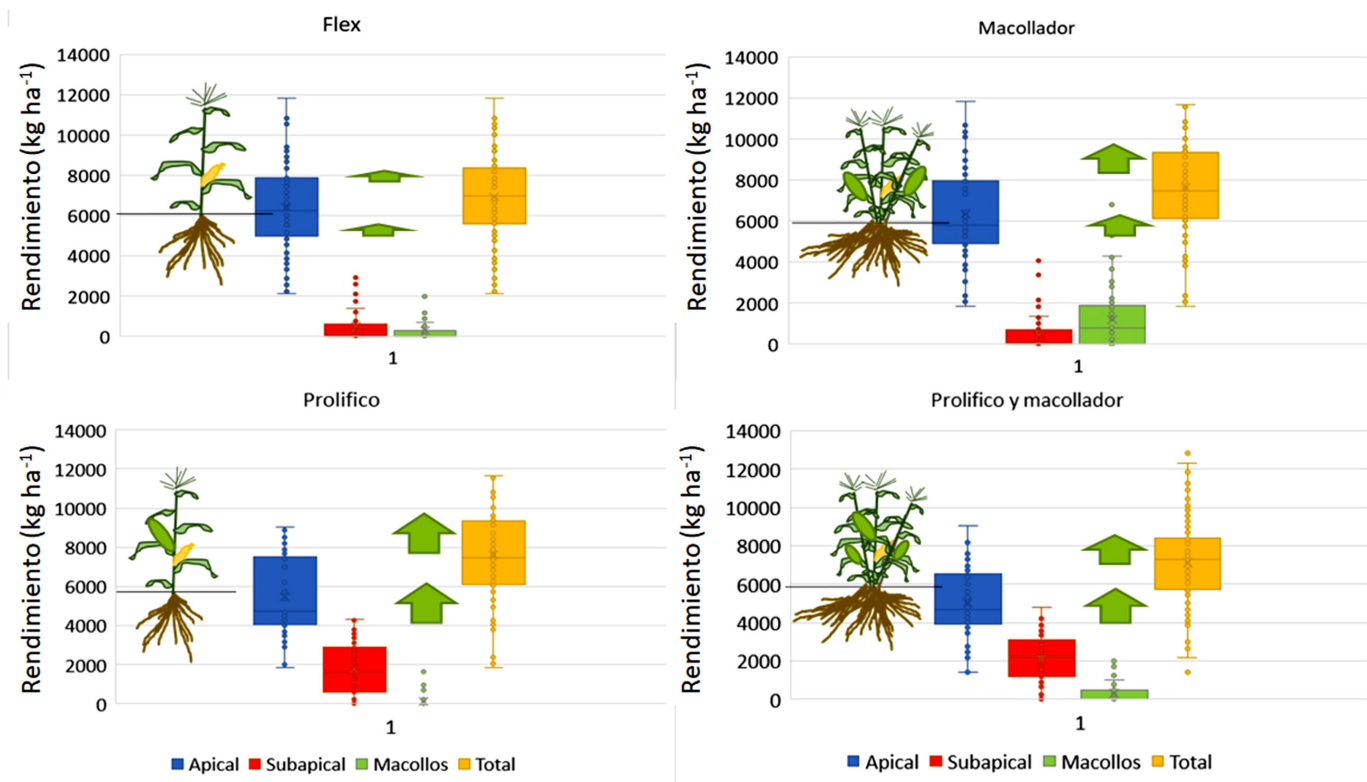


Figura 17. Composición del rendimiento de 4 fenotipos de maíz en 12 experimentos realizados durante 2019-2020. Las flechas indican los incrementos de los valores menores y mayores de rendimiento alcanzados con la espiga apical, atribuibles al rendimiento de espigas sub-apicales y/o de macollos según el fenotipo. Fuente: Elaboración a partir de datos de la red experimental del GET RED UBA de MAÍZ.

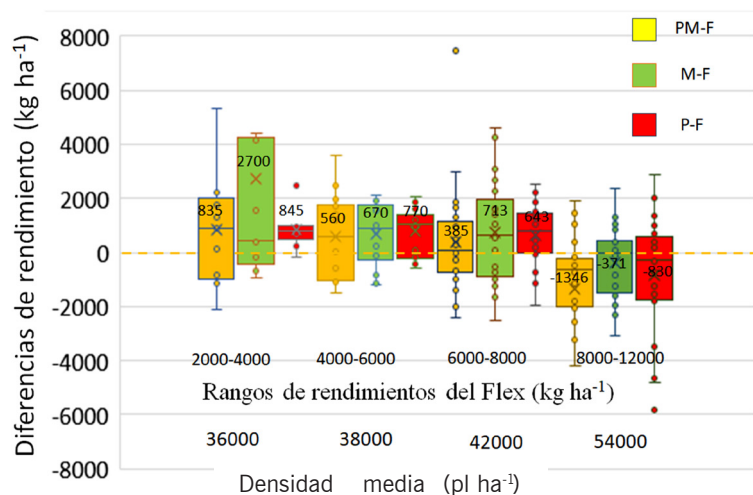


Figura 18. Diferencias y variabilidad de los rendimientos de un híbrido prolífico (P), prolífico-macollador (PM) y macollador (M) con el rendimiento de un híbrido *flex* (F), para un rango de ambientes (2.000 a 12.000 kg ha⁻¹) cuantificados a través del rendimiento del híbrido *flex*. El valor dentro de cada caja señala la diferencia media de cada fenotipo para cada rango de ambientes. Fuente: Elaboración a partir de datos de la red experimental del GET RED UBA de MAÍZ.

componente espigas por planta y por unidad de área sobre la composición del rendimiento de maíz en ambientes marginales (Figura 19). En estos manejos defensivos (densidades ≤ 60.000 pl ha⁻¹), la plasticidad reproductiva (espigas sub-apicales y de macollos) explica a partir del número logrado de espigas por unidad de área casi el 60% de la variabilidad de los rendimientos a través de los ambientes.

Nuestros trabajos actuales están centrados en describir

los ambientes de la red mediante patrones de estrés hídrico similares a los de la Figura 10, redefinir los períodos críticos de maíz para híbridos con y sin mecanismos de plasticidad reproductiva, interpretar la expresión de los mecanismos de plasticidad en función de los ambientes y los períodos críticos de estos mecanismos y ajustar tecnologías como el manejo de la nutrición de manera de no comprometer la expresión del mecanismo de plasticidad más exitoso para un ambiente.

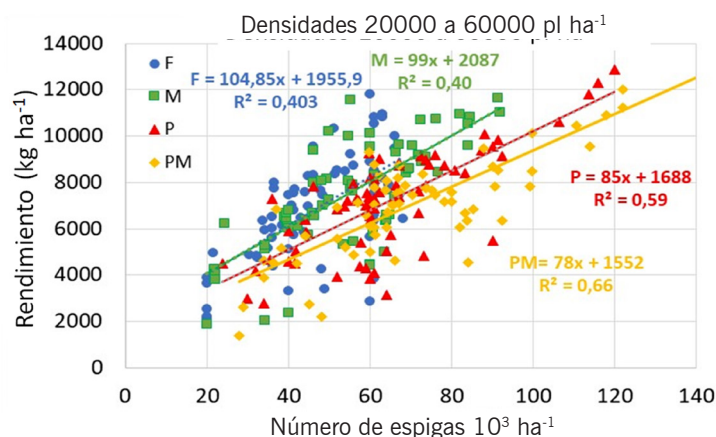


Figura 19. Rendimiento de un híbrido prolífico (P), prolífico-macollador (PM), macollador (M) y flex (F), en función del número de espigas por unidad de área, para un rango de densidades entre 20.000 y 60.000 pl ha⁻¹. Fuente: Elaboración a partir de datos de la red experimental del GET RED UBA de MAÍZ.

CONCLUSIONES

La gran expansión del área con cultivo de maíz durante los últimos 10 años ha contribuido a triplicar la producción nacional de maíz. Dicha expansión por fuera de la tradicional zona núcleo maicera se sustenta sobre el uso de manejos defensivos, debido a un régimen hídrico restrictivo con oscilaciones impredecibles, altas probabilidades de estrés térmico, limitaciones edáficas e incluso, en algunas localidades, débiles señales del fenómeno ENSO. Tres son las prácticas de manejo que hacen a la estructura del cultivo y que han resultado exitosas en términos de productividad: el uso de fechas de siembras tardías que exponen a los períodos reproductivos a menores frecuencias de incidencias de estrés abióticos (hídrico y térmico), la siembra de híbridos con eventos genéticos destacados (como protección ante lepidópteros y tolerancia a herbicidas, no analizados en este trabajo), y el uso de bajas densidades de siembra. Estudios previos sustentan las ventajas de estas decisiones, sin embargo, nuestros estudios recientes permiten

interpretar desde un marco ecofisiológico y funcional, el impacto de la fecha de siembra, densidad y producción de macollos sobre la economía del agua del cultivo, los efectos del manejo nutricional sobre la producción de segundas espigas (o prolificidad) y la relación entre la producción de espigas múltiples y el rendimiento en bajas densidades. Estos mecanismos son buscados por los agricultores como un reaseguro ante imprevistas mejoras del ambiente que les permitiría subir los pisos de rendimiento versus el riesgo de utilizar una mayor densidad de siembra.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo queremos agradecer a todos los integrantes del GET "Red de Ultra Baja Densidad de Maíz" que hacen posible la generación de información y el intercambio de ideas y proyectos para ajustar tecnologías de manejo de maíz en ambientes marginales.

BIBLIOGRAFÍA

- Andrade, F. H. y Abbate, P. E. (2005) Response of maize and soybean to variability in stand uniformity. *Agronomy Journal*, 97, 1263-1269. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0006>
- Andrade, F. H., Cirilo, A. G., Uhart, S.A y Otegui, M. E. (1996). *Ecofisiología del cultivo de maíz*. Editorial La Barrosay Dekalb, 292 pp.
- Barros, V. A. (2008). Adaptation to climatic trends: lessons from the Argentine experience. En: N. Leary, I. Burton, J. Adejuwon, V. Barros, R. Lasco, y J. I. Kulkarni (eds.). *Climate change and adaptation*. London: Earthscan, pp 296-350.
- Ciancio, N., Parco, M., Incógnito, S. J. P. y Maddonni, G. A. (2016). Kernel setting at the apical and sub-apical ear of older and newer Argentinean maize hybrids. *Field Crops Research*, 191, 101-110. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.02.021>
- Dirección de bosques. 2007. Informe sobre deforestación en Argentina. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación, 10 pp.
- Hall, A. J., Lemcoff, J. y Trápani, N. (1981). Water stress before and during flowering in maize and its effects on yield, its components and determinants. *Maydica*, 26, 19-38.
- Hall, A. J., Rebella, C. M., Ghera, C. M. y Cullot, J. P. (1992). Field-Crop Systems of the Pampas. En: C. J. Pearson (ed.). *Ecosystems of the world*. Field Crops Ecosystems. Amsterdam-Londres-Nueva York-Tokio: Elsevier Scientific, pp 413-450.
- Hammer, G. L., McLean, G., Chapman, S., Zheng, B., Doherty, A., Harrison, M. T., van Oosterom, E. y Jordan, D. (2014). Crop design for specific adaptation in variable dryland production environments. *Crop and Pasture Science*, 65, 614-626. <https://doi.org/10.1071/CP14088>
- Holzworth, D. P., Huth, N. I., deVoil, P. G. et al. (2014). APSIM-Evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. *Environ.*

- Modell. *Softw*, 62, 327-350. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.07.009>
- Liu, W., Tollenaar, M., Stewart, G. y Deen, W. (2004). Response of corn grain yield to spatial and temporal variability in emergence. *Crop Science*, 44, 847-854. <https://doi.org/10.2135/cropsci2004.8470>
- Maddonni, G. A. (2012). Analysis of the climatic constraints to maize production in the current agricultural region of Argentina, a probabilistic approach. *Theoretical and Applied Climatology*, 107, 325-345. <https://doi.org/10.1007/s00704-011-0478-9>
- Mayer, L. I., Rattalino Edreira, J. I. y Maddonni, G. A. (2014). Oil yield components of maize crops exposed to heat stress during early and late grain-filling stages. *Crop Science*, 54, 1-15. <https://doi.org/10.2135/cropsci2013.11.0795>
- Navarrete Sánchez, R. A. (2017). *Comportamiento de dos híbridos tropicales y tres líneas de maíz (Zea mays, L.) ante cambios en la alimentación hídrica y el régimen térmico en la etapa previa a la floración* [Tesis doctoral]. Escuela para Graduados, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
- Otegui, M. E., Ruiz, R. A. y Petrucci, D. (1996). Modeling hybrid and sowing date effects on potential grain yield of maize in a humid temperate region. *Field Crops Research*, 47, 167-174. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(96\)00031-7](https://doi.org/10.1016/0378-4290(96)00031-7)
- Parco, M. (2020). *Fijación de granos en espigas apicales y sub-apicales en híbridos argentinos de maíz (Zea mays L.) de las últimas cuatro décadas ante cambios en la densidad de siembra y la oferta nutricional* [Tesis doctoral]. Escuela para Graduados, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
- Parco, M., Ciampitti, I., D'Andrea, K. y Maddonni, G. A. (2020). Prolificacy and nitrogen internal efficiency in maize crops. *Field Crops Research*. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107912>
- Pommel B. and Bonhomme, R. (1998). Variations in the vegetative and reproductive systems in individual plants of and heterogeneous maize crop. *European Journal of Agronomy*, 8, 39-49. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(97\)00012-9](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(97)00012-9)
- Pommel, B., Mouraux, D., Cappellen, O. y Ledent, J. F. (2002). Influence of delayed emergence and canopy skips on the growth and development of maize plants: a plant scale approach with CERES-Maize. *European Journal of Agronomy*, 16, 263-277. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(01\)00130-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(01)00130-7)
- Ross, F., Di Matteo, J. y Cerrudo, A. A. (2020). Maize prolificacy: a source of reproductive plasticity that contributes to yield stability when plant population varies in drought-prone environments. *Field Crops Research*. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107699>
- Rotili, D. H., Giorno, A. y Maddonni, G. A. (2019). Expansion of maize production in a semiarid region of Argentina: climatic and edaphic constraints and their implications on crop management. *Agricultural and Water Management*, 225, 105761.
- Rotili, D. H., Eyre, J., deVoil, P., Serafin, L., Aisthorpe, D., Maddonni, G. y Rodríguez, D. (2020). Untangling genotype x management interactions in multi-environment on-farm Experimentation. *Field Crops Research*. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107900>
- Rotili, D. H., Abeledo, L. G., deVoil, P., Rodríguez, D. y Maddonni, G. A. (2021a). Exploring the effect of tillers on the water economy, plant growth and kernel set of low-density maize crops. *Agric. Agricultural and Water Management*, 243, 106424.
- Rotili, D. H., Sadras, V., Abeledo, G. y Maddonni, G. A. (2021b). Impacts of vegetative and reproductive plasticity associated with tillering in maize crops in low-yielding environments: A physiological framework. *Field Crops Research*. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108107>
- Rattalino Edreira, J. I., Budakli Carpici, B., Sammarro, D. y Otegui, M. E. (2011). Heat stress effects around flowering on kernel set of temperate and tropical maize hybrids. *Field Crops Research*. Doi: 10.1016/j.fcr.2011.04.015
- Satorre, E. H. y Maddonni, G. A. (2018). Spatial crop structure in agricultural systems. En: R. A. Meyers, (ed.). *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*. Nueva York: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2493-6_223-3
- Soil Survey Staff. (2010). *Keys to Soil Taxonomy*. 11ª ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- Soriano, A. (1991). Río de la Plata grasslands. En: R. T. Coupland (ed.). *Ecosystems of the world. Natural grasslands*. Amsterdam: Elsevier Scientific, pp. 367-407.
- Vega, C. R. C. y Sadras, V. (2003). Size-dependent growth and the development of inequality in maize, sunflower and soybean. *Annals of Botany*, 91, 1-11.