



## La mejora del rendimiento de maíz en la región Central de Argentina: análisis ecofisiológico sobre los aportes recientes de la genética y el manejo

*Maize grain yield improvement in the Central region of Argentina:  
ecophysiological analysis of recent breeding and genetic contributions*

Maria Elena Otegui<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria, Argentina.

<sup>2</sup>FAUBA-CONICET-INTA

Disertación en la ceremonia de ingreso a la ANAV

ID Autor: <https://orcid.org/0000-0001-9670-0316>

**Autor para correspondencia:**

Correo electrónico: [otegui@agro.uba.ar](mailto:otegui@agro.uba.ar)

### Resumen

El mejoramiento, tanto de la genética como del manejo de maíz, contribuyó a sostener la ganancia global de rendimiento necesaria para garantizar la demanda de una población mundial creciente. La correcta cuantificación de cada componente es crucial para evitar estancamientos de esa ganancia. En base a información generada durante más de 20 años en INTA Pergamino (Argentina), se estableció que el mejoramiento genético contribuyó con 48% a la ganancia global desde 1970. Esa contribución disminuyó a 39% cuando sólo se consideraron híbridos simples, que dominaron el mercado a partir de la década de 1990. Tal disminución no impactó negativamente en la ganancia global pues las mejoras de manejo sostuvieron la tasa de ganancia. Respecto al manejo, varias prácticas cobraron importancia a partir de 1998, promovidas por otro hito de la genética: la introducción de eventos transgénicos. El más importante en maíz fue el *Bt* para protección contra lepidópteros, que además de disminuir las pérdidas por estas plagas permitió ampliar el período de siembra en toda la región templada Central. En la actualidad, la superficie de maíz se distribuye 50-50% entre siembras tempranas y tardías. Las últimas adecuan mejor las etapas reproductivas con una buena oferta hídrica, mejorando el rendimiento en secano en el 80% de los años.

**Palabras clave:** Ganancia Global de Rendimiento, Progreso Genético, Manejo del Cultivo, Fecha de siembra.

### Abstract

Improved genetics and management contributed to hold the high global yield gain of maize necessary to satisfy the demand of an increasing population. The correct quantification of each component is crucial to avoid global gain stagnation. Based on research produced during more than 20 years at INTA Pergamino (Argentina), the estimated genetic contribution to global yield gain has been 48% since 1970. This contribution declined to 39% when only F1 hybrids were considered, i.e. those that dominated the market since the 1990s. Mentioned decline had no negative effect on global gain because improved crop management contributed to hold gain rates high. Different management practices that became important since 1998 were linked to another genetic milestone: the introduction of transgenic events. The most important in maize was the *Bt* event against Lepidoptera. This event reduced yield losses caused by insects of this group and allowed the extension of the sowing date period across the whole temperate Central region. Currently, land cropped to maize has a 50-50% distribution between early and delayed sowings. The latter improved the match between the reproductive phases and adequate water availability, resulting in yield benefits under dryland farming in 80% of the years.

**Keywords:** Global Yield Gain, Genetic Progress, Crop Management, Sowing Date.

## Introducción

Desde la publicación en 1798 del trabajo de Malthus, “*An essay on the principle of population*”, se estableció un interés científico permanente en la capacidad de la Humanidad para satisfacer sus necesidades de recursos, principalmente alimenticios. Esto promovió el desarrollo de métodos para cuantificar de manera precisa tanto la demografía como la producción de alimentos. Hasta promediar el siglo XX, esa producción dependió casi exclusivamente del aumento de la superficie destinada a la agricultura. Recién a partir de entonces se hizo evidente la mejora sustancial del rendimiento (i.e. producción por unidad de superficie) de los cultivos más importantes (Chavas, 2011). Respecto a dichos cultivos, el 50% del aporte de calorías a nuestras dietas se sustenta directa o indirectamente en tres cereales (Fischer & Edmeades, 2010): arroz (*Oryza sativa* L.), trigo (*Triticum aestivum* L.) y maíz (*Zea mays* L.). Sin embargo, mientras las superficies destinadas al trigo (ca. 217 mill has) y el arroz (ca. 158 mill has) se han mantenido relativamente constantes en los últimos 20 años, la de maíz tuvo un aumento drástico entre 2002 y 2017, pasando de 145 a 198 mill de has. Así, el aumento de la producción de trigo y arroz ha dependido exclusivamente del aumento del rendimiento en grano, en tanto que el del maíz se sustentó además en el incremento de área. Este incremento significó la incorporación de regiones otrora consideradas marginales (e.g. ambientes semiáridos) o frágiles (e.g. selvas en la zona inter-tropicales) para la agricultura, principalmente en Argentina y Brasil (Viglizzo & Jobbágy, 2012).

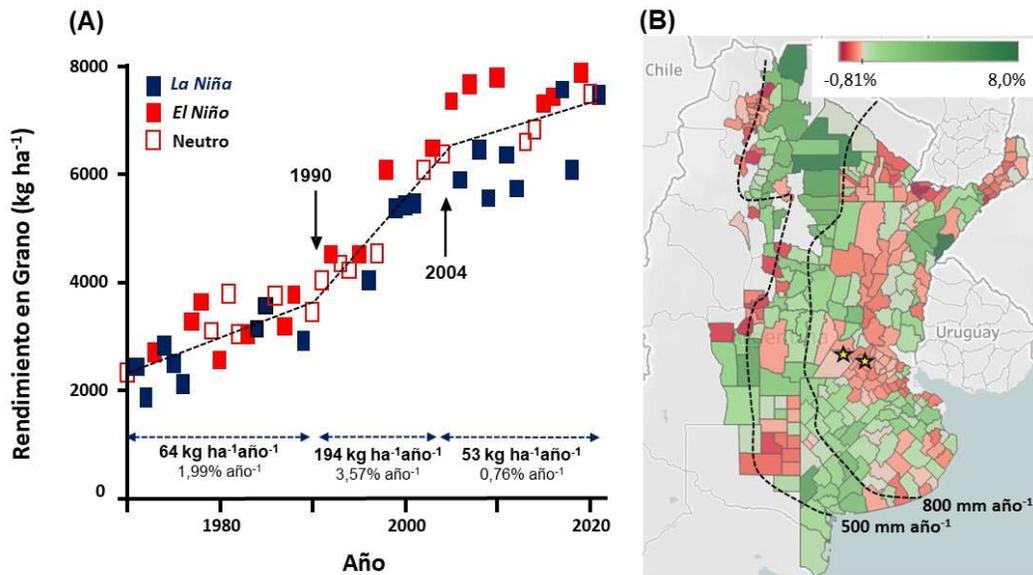
Según cálculos basados en la información disponible a nivel mundial (FAOSTAT, 2022) ha sido posible sostener una ganancia global de rendimiento del orden de 1,48% (arroz) a 1,73% (maíz) ó 1,72% anual (trigo) durante el período 1961-2020. Estas ganancias son el resultado del mejoramiento sostenido y simultáneo de la genética y el manejo (Tollenaar & Lee, 2002), por lo que la cuantificación correcta de la contribución de cada fuente ha sido siempre objeto de estudio para evitar estancamientos de la ganancia global. Más aún, estos valores deberían crecer al 2,4% anual durante 2008-2050 a fin de satisfacer la demanda estimada para 2050 y así evitar incorporar nueva superficie a la producción (Ray et al., 2013). Éste es un objetivo muy complejo de lograr, ya que la conversión de la ganancia absoluta ( $\text{kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) en ganancia porcentual disminuye a medida que el rendimiento medio aumenta (Ray et al., 2013), estableciendo así un desafío cada vez mayor a la mejora del mismo (Hall & Richards, 2013; Otegui et al., 2015).

De los tres cereales, el trigo y el maíz constituyen cultivos relevantes de la producción agropecuaria argentina y consecuentemente de la economía local y mundial, dada la condición netamente exportadora del país (7mo exportador mundial de trigo y 2do de maíz en 2020). En Argentina existen actualmente unas 40 mill de hectáreas implantadas

con algún cultivo anual de importancia alimenticia (SAGyP, 2022), de las cuales 9,74 mill correspondieron al maíz (25,4% del área) en la campaña 2020-2021, convirtiéndolo en la 2da. especie más cultivada después de la soja (43,4% del área). Dada su relevancia local y los desafíos globales comentados para incrementar su producción, en esta presentación se analizará la mejora del rendimiento de maíz en Argentina, cuantificando la contribución de la ganancia genética a la ganancia global del rendimiento y analizando los cambios más trascendentes asociados al manejo agronómico en los últimos años.

### **La ganancia global de rendimiento de maíz en Argentina**

Utilizando los registros públicos disponibles para el período 1970-2021 (SAGyP, 2022), se puede distinguir tres etapas en la evolución del rendimiento de maíz en Argentina (Figura 1A). La primera etapa, que se extendió hasta el año 1990, se caracterizó por un rendimiento medio de 3209 kg ha<sup>-1</sup> y una ganancia global de 63,9 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, equivalente a 1,99 % anual. Esta etapa estuvo dominada por el uso de híbridos de cuatro y tres vías (Luque et al., 2006), predominantemente de tipo colorado duro o *flint*, un laboreo tradicional del suelo (Nocelli Pac, 2018) y reducido uso de fertilizantes (Grasso & Gonzalez Sanjuan, 2018). La segunda etapa, que tuvo lugar entre 1990 y 2004, fue la de máximo incremento del rendimiento, alcanzando una ganancia global de 3,57 % anual (194 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y rendimiento medio de 5440 kg ha<sup>-1</sup>). A lo largo de esta etapa tuvo lugar una fuerte adopción de híbridos simples, con inclusión de eventos transgénicos (Trigo, 2011) y germoplasma dentado, y un aumento importante de la siembra directa (Nocelli Pac, 2018) y el uso de fertilizantes (Grasso & Gonzalez Sanjuan, 2018). Finalmente, a partir del año 2004 se registró una desaceleración del aumento de rendimiento a sólo 52,7 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, que redujo la ganancia porcentual a 0,76% anual respecto a un valor medio para el período de 6914 kg ha<sup>-1</sup>. Entre los aspectos distintivos de esta última etapa se encuentra la fuerte expansión en área del cultivo de maíz a partir del año 2010, principalmente en áreas por fuera de la zona núcleo tradicional ubicada en la región húmeda templada Central (Figura 1B). Esta expansión estuvo acompañada de un aumento de la ocurrencia de fases *La Niña* (i.e. lluvias por debajo del promedio en la zona central de Argentina) del fenómeno *El Niño Oscilación del Sur* (ENOS) y de la superficie destinada a maíz de siembra tardía (Otegui et al., 2021; Otegui & Mercau, 2018).



**Figura 1.**

(A) Evolución del rendimiento del cultivo de maíz en Argentina. Los valores bajo las flechas horizontales indican las pendientes correspondientes a los tres subperíodos identificados por el modelo tri-lineal ajustado ( $R^2=0,92$ ;  $P < 0,001$ ). Los colores de los puntos distinguen la ocurrencia de una de las tres fases del fenómeno *El Niño Oscilación del Sur* (ENOS) según: [https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php) Datos en base a <http://www.fao.org/faostat/en/#home>.

(B) Variación porcentual del área sembrada con maíz por partido entre los promedios correspondientes a las décadas pre y post 2010, según registros oficiales disponibles en <http://datosestimaciones.magyp.gov.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones> Las líneas negras punteadas representan las isoyetas de 500 y 800 mm. Las estrellas indican la ubicación de los criaderos correspondientes a los principales programas de mejoramiento genético de maíz en Argentina. Mapa disponible en <https://public.tableau.com/profile/maria.elena.otegui#!/>

### **Contribución del mejoramiento genético a la ganancia global de rendimiento de maíz en Argentina**

Numerosos trabajos llevados a cabo en distintos países han buscado cuantificar la contribución de la ganancia genética a la ganancia global de rendimiento de maíz, con estimaciones muy variables (<10% a >70%) según la fuente consultada (Derieux et al., 1987; Duvick, 2005; Eyhérabide et al., 1994; Eyhérabide & Damilano, 2001; Mella et al., 1984; Rizzo et al., 2022; Smith et al., 2015; Zhang et al., 2021). Aunque la mayoría de los autores utiliza la aproximación clásica de evaluar simultáneamente un conjunto de cultivares en función de su año de liberación al mercado, la variación en el nivel estimado de contribución es alta por diversas razones; por ejemplo, distintos trabajos incluyen híbridos de diferente nivel de heterosis (e.g. dobles, simples), las condiciones de crecimiento no son comparables (e.g. ensayos muy distantes en el tiempo y/o con manejo muy contrastante), el ambiente del

estudio no es exactamente el ambiente objetivo del programa de mejoramiento de los híbridos evaluados, etc.

Para evitar las distorsiones antes mencionadas en este tipo de estudios, en el presente análisis se optó por recopilar la información generada por el grupo de Ecofisiología de INTA Pergamino en el mismo sitio experimental entre 1996-1997 y 2016-2017 (Cuadro 1), utilizando sólo los ensayos regados de siembras tempranas (Octubre) y estandarizando los resultados de cada uno por su correspondiente valor medio para analizarlos en forma conjunta (Curin et al., 2020). Tomando como referencia el año 1993, el mejoramiento genético produjo un progreso del rendimiento de 1,14% anual entre 1965 y 2015 (Figura 2A). La ganancia genética no difirió (1,12% anual) al considerar sólo los híbridos simples (Figura 2B), aunque tuvo lugar recién a partir de 1982. En ambos casos, la ganancia estuvo acompañada de efectos positivos del mejoramiento sobre el número de granos y la biomasa total aérea que alcanzan la madurez, sin compensación negativa por parte del peso individual del grano (Curin et al., 2021). Las mejoras en la producción de biomasa serían atribuibles tanto a cambios en la arquitectura del cultivo que modificaron la distribución de luz a través del canopeo (Lacasa et al., 2022) como a un aumento de la capacidad de fijar carbono en las hojas próximas a la espiga (Cagnola et al., 2021).

**Cuadro 1.** Características de los híbridos y las campañas en que fueron evaluados.

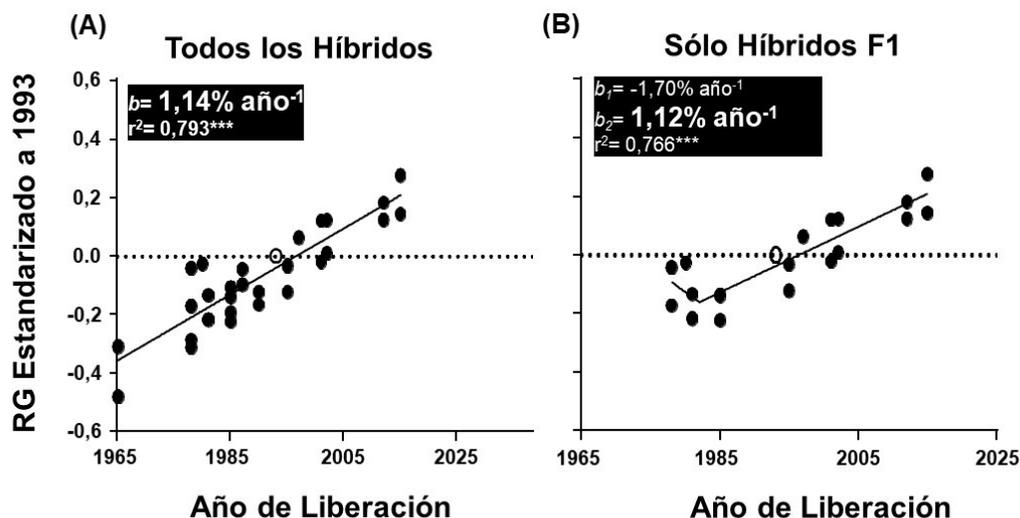
Híbrido	ADL <sup>a</sup>	Empresa	Tipo de Cruza	Tipo de grano	Campaña de evaluación <sup>b</sup>					
					1996	1997	2001	2002	2014	2016
F880	1965	Dekalb	Doble	Flint	X	X				
M400	1978	Morgan	Doble	Flint	X	X				
DK 2F10	1978	Dekalb	Simple	Flint			X	X	X	
AX 252	1981	Nidera	Simple	Flint			X	X		
Maizal 86	1985	Cargill	Simple	Flint	X	X				
DK 4F37	1985	Dekalb	Doble	Flint	X	X				
DK 3F24	1987	Dekalb	Tres vías	Flint			X	X		
AX 258	1990	Nidera	Tres vías	F × D			X	X		
DK 752	1993	Dekalb	Simple	F × D	X	X	X	X	X	
DK 664	1993	Dekalb	Simple	F × D						X
C 280	1995	Cargill	Simple	F × D	X	X				
DK 757	1997	Dekalb	Simple	F × D		X				
AX 889	2001	Nidera	Simple	Dent			X	X		
AW 190*	2002	Dekalb	Simple	Dent					X	X
DK 72-10*	2012	Dekalb	Simple	Dent					X	X
DK 70-20*	2015	Dekalb	Simple	Dent						X
DK 73-20*	2015	Dekalb	Simple	Dent						X

<sup>a</sup> Abreviaturas: ADL, año de liberación; D, dentado; F, Flint.

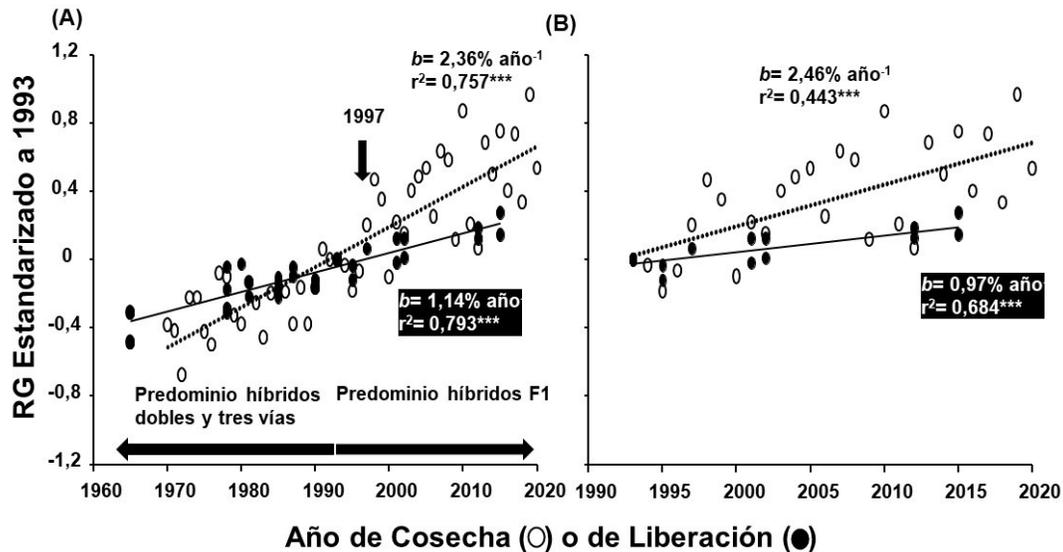
<sup>b</sup> Se indica el año de siembra

Un aspecto importante para estimar la participación de la ganancia genética en la ganancia global es definir el principal ambiente objetivo del plan de mejoramiento, buscando maximizar la representatividad de los datos (Figura 1B). Por este motivo el cálculo se efectuó tomando como referencia el rendimiento en grano del partido de Pergamino, tanto para el

conjunto representado por todos los híbridos (Figura 3A) como para el representado sólo por híbridos simples (Figura 2B). En este último caso se limitó el análisis a aquellos liberados a partir de 1993 pues (i) era muy bajo el uso de híbridos simples por parte de los productores antes de ese año, y (ii) la comparación no confundía el efecto del tipo de grano más utilizado antes de 1993 (*flint* respecto a los predominantemente *dent* posteriores). En función de estos elementos, la contribución del mejoramiento genético a la ganancia global sería de un 48% durante el período 1970-2020 y considerando todos los híbridos. Del mismo modo, dicha contribución caería al 39% cuando sólo se consideran los híbridos simples y el período post 1993. Por un lado, la caída es esperable considerando que a partir de 1993 ya no tuvo lugar un aporte atribuible al aumento de heterosis del tipo que existió en años previos ni al potencial asociado al tipo de endosperma (*dent* > *flint*). Por otro lado, la disminución en la participación de la genética no significó un detrimento para la ganancia global, lo cual implica que debió ser compensada por las mejoras ocurridas en el manejo del cultivo.



**Figura 2.** Progreso genético (en % año<sup>-1</sup>) para el rendimiento en grano (RG) de (A) todos los híbridos del Cuadro 1, y (B) sólo los híbridos simples. El punto vacío representa los datos correspondientes a 1993, utilizado para estandarizar. Las líneas llenas representan los modelos ajustados. Se indican las pendientes de dichos modelos ( $b$ ) y también el coeficiente de determinación ( $R^2$ ). El símbolo \*\*\* implica  $P \leq 0,001$ .



**Figura 3.** Rendimiento en grano (RG) estandarizado correspondiente a (i) el partido de Pergamino (círculos blancos), y (ii) los experimentos incluidos en el presente trabajo (círculos negros). Los datos para Pergamino corresponden a la serie histórica desde 1970 a la actualidad (A) o desde 1993 a la actualidad (B). Los datos experimentales corresponden a (a) todos los híbridos evaluados en todos los experimentos ( $n = 34$ ), o (b) sólo a híbridos simples liberados desde 1993 ( $n = 17$ ). Las líneas (punteadas para el partido de Pergamino y llenas para los experimentos) representan los modelos lineales ajustados a cada conjunto de datos, de los cuales se indica la pendiente ( $b$ ) y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ). La flecha vertical en (a) señala el lanzamiento al mercado de híbridos genéticamente modificados (1997) y las flechas horizontales destacan el tipo de híbrido predominante en el mercado. \*\*\* implica  $P \leq 0,001$ .

### Contribuciones recientes del manejo agronómico a la ganancia de rendimiento en maíz

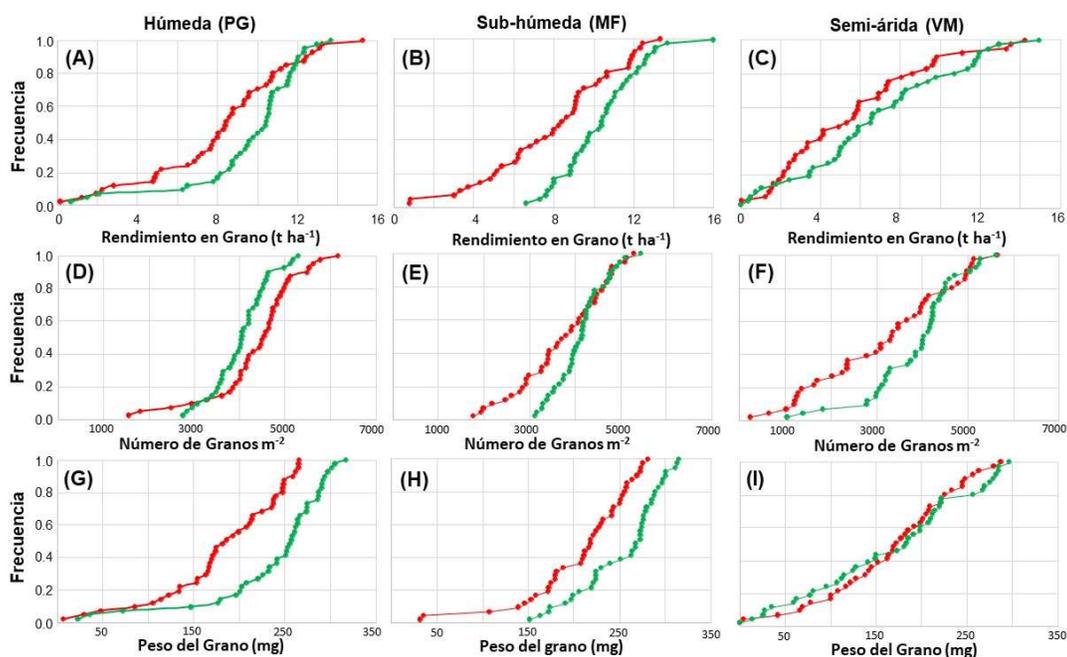
La amplia difusión en el mercado argentino de híbridos simples de maíz significó el fin del aumento de rendimiento por aumento significativo de la explotación de la heterosis, con el consecuente riesgo de estancamiento de la ganancia global. Sin embargo, en poco tiempo esta tendencia estuvo acompañada por otro gran hito de la genética: la inclusión de eventos transgénicos orientados al manejo de restricciones bióticas. Así, en 1998 se aprueba en Argentina el maíz *Bt* (por *Bacillus thuringiensis*), que le otorgó al cultivo resistencia a lepidópteros. Si bien esta condición no implicaba *per se* una mejora del rendimiento, sí significaba aumentos del mismo a través de una reducción de las mermas causadas por dichas plagas, principalmente el barrenador del tallo (*Diatraea saccharalis* Fab.) y la oruga de la espiga (*Helicoverpa zea* Boddie). También representaba la posibilidad de introducir otros cambios en el manejo del cultivo que la incidencia de esos insectos no permitía, como atrasar la fecha de siembra sin el aumento de costos asociados los controles químicos requeridos. En la región templada Central, el manejo de la fecha de siembra, en combinación con la elección del híbrido, fue siempre la herramienta utilizada para ajustar el ciclo del

cultivo a la oferta hídrica, teniendo como premisa lograr el mayor escape posible del período crítico de floración al déficit hídrico estival (Hall, 1984; Hall et al., 1992; Totis de Zeljkovich & Rebella, 1980) con el menor sacrificio posible en la duración del ciclo. Antes del lanzamiento al mercado del maíz *Bt*, el cumplimiento de esta premisa sólo era posible adelantando la fecha de siembra tanto como las heladas tardías de primavera y la temperatura del suelo a la siembra lo hacían posible sin riesgo de pérdida del cultivo. En la zona núcleo estas condiciones se dan recién durante el mes de Septiembre; siembras en ese mes permiten maximizar los rendimientos potenciales (Otegui et al., 1995, 1996).

Pese a la posibilidad de cambio en la fecha de siembra para optimizar el uso del recurso usualmente más limitante en la producción de secano (el agua), dicha estrategia no tuvo lugar hasta más de una década después del lanzamiento del maíz *Bt* en la región templada Central. Esta demora se fundamenta en más de una causa. Por un lado, la difusión de la nueva tecnología por parte de las empresas semilleras no contempló la posibilidad de atraso en la fecha de siembra. Esto se debió, en gran medida, a que tal cambio no formaba parte del objetivo original de adopción del producto en los EEUU, donde la época de siembra del maíz en la principal región productora se extiende por no más de dos meses (Choi et al., 2017) y siempre con efectos negativos del atraso sobre el rendimiento (Kucharik, 2008). Por otro lado, un cambio drástico de fecha de siembra significaba contradecir los paradigmas predominantes sobre el manejo del cultivo de maíz para maximizar el rendimiento (Andrade et al., 1996), que sostenían los beneficios de una siembra tan temprana como fuera posible. Así, aunque ya en 2002 se generó el conocimiento necesario para estimar probabilísticamente el rendimiento esperable en siembras tardías y el beneficio de las mismas en condiciones de secano (Otegui et al., 2002), no fue hasta después del año 2008 que comenzó su adopción generalizada (Otegui et al., 2021). Este cambio obedeció tanto a cuestiones coyunturales de precios relativos de los principales cultivos (el trigo dejó de ser un buen negocio por el aumento de retenciones) como a condiciones climáticas muy desfavorables por mayor incidencia de fases *La Niña* del fenómeno ENSO en forma consecutiva (Figura 1A). A partir del año 2008 el crecimiento en la adopción de siembras tardías en toda la región Central fue constante, hasta llegar en la actualidad a cubrir una superficie igual a la siembra temprana. Este aumento se dio principalmente en ambientes por fuera de la zona núcleo maicera tradicional y acompañando al aumento de superficie ocupada por maíz que se discutió al principio de este trabajo (Figura 1B). En esos ambientes, más alejados de puertos, buena parte de la cosecha de maíz se utiliza localmente (e.g. silaje, biocombustibles).

El beneficio de rendimiento con el atraso en la fecha de siembra en condiciones de secano se verifica tanto en los ambientes húmedos de la región Central (e.g. Pergamino; 33° 56' S, 60° 33' O, 76 msnm) como en los subhúmedos (e.g. Manfredi; 31°51' S, 63°45' O, 282

msnm) y semiáridos (e.g. Villa Mercedes; 33°40' S, 65°27' O, 512 msnm) de similar latitud (Figura 4 A-C). En todos ellos, en al menos un 80% de los años se obtendría mayor rendimiento con siembras tardías que con tempranas. Sin embargo, no existe un patrón uniforme en cuanto al componente del rendimiento más determinante de esta tendencia. Hacia el Este, generalmente se espera que el número de granos por unidad de superficie sea superior en siembras tempranas (Figura 4D) pues el período crítico de floración suele escapar al balance hídrico negativo del mes de enero, pero éste afecta desfavorablemente al peso individual del grano (Figura 4G). Ya en la zona subhúmeda, en cambio, las deficiencias hídricas durante el período crítico penalizan al número de granos en siembras tempranas en un 60% de los años (Figura 4E), mientras el peso individual del grano es siempre inferior en ellas producto de deficiencias hídricas (Figura 4H). Finalmente, en la zona semiárida, en el 80% de los años habrá una penalización del número de granos por deficiencias hídricas en siembras tempranas (Figura 4F), pero las diferencias entre fechas de siembra no serán categóricas para el peso del grano (Figura 4I). Esto último es atribuible a que el período libre de heladas es más corto que en las otras zonas y las heladas tempranas pueden interrumpir el llenado del grano en siembras tardías.



**Figura 4.** Rendimiento en grano (A-C), número de granos m<sup>-2</sup> (D-F) y peso individual del grano (G-I) para dos fechas de siembra contrastantes (temprana en rojo y tardía en verde) en tres sitios representativos de un gradiente hídrico entre (A) la región húmeda (PG: Pergamino), (B) la sub-húmeda (MF: Manfredi), y (C) la semi-árida (VM: Villa Mercedes) de la región central de Argentina. Los datos representan las frecuencias acumuladas de cada variable a partir de la simulación de una serie histórica de 41 años de datos climáticos para (i) siembras tempranas del 20-Sep en PG, 15-Oct en MF y 30-Oct en VM, con todo el perfil de suelo a capacidad de campo (CC) en PG y a CC hasta 0,6 m y con 30% de agua útil en el resto del perfil para MF y VM, y (ii) siembra del 10-Dic con todo el perfil a CC en todos los sitios. Las simulaciones fueron efectuadas con el modelo CERES-Maize (Jones & Kiniry, 1986).

## Conclusiones

La ganancia global de rendimiento de maíz en Argentina ha declinado pronunciadamente desde el año 2004 respecto al período previo (0,76 % vs 3,57 % anual, respectivamente). Sin embargo, esta tendencia no se verificó en uno de los ambientes más representativos de la zona núcleo maicera (Pergamino), que es además uno de los principales ambientes objetivo de los programas de mejoramiento del país más importantes. Considerando dicho ambiente, se pudo establecer una disminución de la contribución genética a la ganancia global del 48% al 39% según el período considerado (1970-2021 y 1993-2021, respectivamente.) Por un lado, la caída es esperable dada la disminución en progreso genético cuando se excluyen del análisis tanto el aumento de heterosis (i.e. pasar de híbridos dobles y de tres vías a simples) como el aumento de potencial de rendimiento según el tipo de endosperma (i.e. pasar de híbridos *flint* a *dent*). Por otro lado, la caída no se trasladó a una merma de la ganancia global, indicando una mejora sustancial de la ganancia asociada a la mejora en el manejo del cultivo. Si bien esta última reconoce seguramente muchas más fuentes que las analizadas en esta presentación, la mejor adecuación de las etapas del ciclo más determinantes del rendimiento a la disponibilidad hídrica en condiciones de secano ha sido un aspecto relevante de la última década. Esta adecuación fue posible gracias a contar con cultivares transgénicos protegidos contra insectos desde 1998, lo cual amplió la ventana de siembra del cultivo de sólo dos (Septiembre-Octubre) a cuatro meses (Septiembre-Diciembre) en muchos ambientes de la región templada. En la agricultura de secano de Argentina, la posibilidad de ampliar la toma de decisión referida a la fecha de siembra puede significar una mejora del rendimiento en el 80% de los años. Este beneficio, sin embargo, no responde a un patrón común de determinación del rendimiento a través de los diversos ambientes evaluados, entre los que se incluyó alguno representativo de las regiones más recientemente incorporadas al área destinada a maíz, como la semiárida. Esto constituye un desafío relevante para los programas locales de mejoramiento de maíz templado.

## Agradecimientos

Agradezco a todas aquellas personas que contribuyeron de muy diferentes maneras a mi desarrollo personal y profesional. Muchas gracias familia, amigos, colegas, compañeros de trabajo y estudiantes. Sin el apoyo de ustedes hoy no podría agradecer a la Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria mi nombramiento como Académica de Número. También un agradecimiento a todas las instituciones que contribuyeron a mi desempeño como investigadora y docente, especialmente la Facultad de Agronomía de la UBA, el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas y el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Finalmente, mi muy especial agradecimiento a las numerosas empresas e instituciones que financiaron las investigaciones. El progreso científico depende enormemente de contar con suficientes recursos económicos. Espero haber contribuido a dicho progreso.

## Literatura citada

- Andrade, F. H., Cirilo, A. G., Uhart, S. A., & Otegui, M. E. (1996). *Ecofisiología del cultivo de maíz* (p. 292). Dekalb Press.
- Cagnola, J. I., Parco, M., Rotili, D. H., Ploschuk, E. L., Curin, F., Amas, J. I., Luque, S. F., Maddonni, G. A., Otegui, M. E., & Casal, J. J. (2021). Artificial selection for grain yield has increased net CO<sub>2</sub> exchange of the ear leaf in maize crops. *Journal of Experimental Botany*. <https://doi.org/10.1093/jxb/erab119>
- Chavas, J. P. (2011). Agricultural policy in an uncertain world. *European Review of Agricultural Economics*, 38(3), 383–407. <https://doi.org/10.1093/erae/jbr023>
- Choi, Y. S., Gim, H. J., Ho, C. H., Jeong, S. J., Park, S. K., & Hayes, M. J. (2017). Climatic influence on corn sowing date in the Midwestern United States. *International Journal of Climatology*, 37(3), 1595–1602. <https://doi.org/10.1002/joc.4799>
- Curin, F., D'Andrea, K. E., Luque, S. F., Cirilo, A. G., & Otegui, M. E. (2021). Mejoramiento de maíz en la Argentina: efecto sobre el progreso genético del rendimiento en grano y sus determinantes fisiológicos. *Agronomía y Ambiente*, 41(2), 59–68.
- Curin, F., Severini, A. D., González, F. G., & Otegui, M. E. (2020). Water and radiation use efficiencies in maize: Breeding effects on single-cross Argentine hybrids released between 1980 and 2012. *Field Crops Research*, 246, 107683. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107683>
- Derieux, M., Darrigrand, M., Gallais, A., Barriere, Y., Bloc, D., & Montalant, Y. (1987). Estimation du progrès génétique réalisé chez le maïs grain en France entre 1950 et 1985. *Agronomie*, 7(1), 1–11. <https://doi.org/10.1051/agro:19870101>
- Duvick, D. N. (2005). The Contribution of Breeding to Yield Advances in maize (*Zea mays* L.). *Advance in Agronomy*, 86, 83–145. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(05\)86002-X](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(05)86002-X)

- Eyhérabide, G. H., & Damilano, A. L. (2001). Comparison of genetic gain for grain yield of maize between the 1980s and 1990s in Argentina. *Maydica*, *46*, 277–281.
- Eyhérabide, G. H., Damilano, A. L., & Colazo, J. C. (1994). Genetic gain for grain yield of maize in Argentina. *Maydica*, *39*(3), 207–211.
- FAOSTAT. (2022). *FAOSTAT*. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>
- Fischer, R. A., & Edmeades, G. O. (2010). Breeding and cereal yield progress. *Crop Science*, *50*(April), S-85-S-98. <https://doi.org/10.2135/cropsci2009.10.0564>
- Grasso, A. A., & Gonzalez Sanjuan, M. F. (2018). Fertilizantes en Argentina-Análisis del Consumo. *Horizonte A*, *10*. <https://horizonteadigital.com/fertilizantes-en-argentina-analisis-del-consumo-por-andres-a-grasso-y-maria-fernanda-gonzalez-sanjuan/#:~:text=Evolución del consumo de fertilizantes,el máximo registro de consumo.>
- Hall, A. J. (1984). Tolerancia a estrés hídrico en maíz: bases fisiológicas y morfológicas. In A.I.A.N.B.A. (Ed.), *III Congreso Nacional de Maíz* (pp. 11–23). A.I.A.N.B.A.
- Hall, A. J., Rebella, C. M., Ghera, C. M., & Culot, J. P. (1992). Field-crop systems of the Pampas. In *Ecosystems of the World* (p. 18).
- Hall, A. J., & Richards, R. A. (2013). Prognosis for genetic improvement of yield potential and water-limited yield of major grain crops. *Field Crops Research*, *143*, 18–33. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.05.014>
- Jones, C. A., & Kiniry, J. R. (1986). *CERES-Maize. A simulation model of maize growth and development*. Texas A&M University Pres.
- Kucharik, C. J. (2008). Contribution of planting date trends to increased maize yields in the central United States. *Agronomy Journal*, *100*(2), 328–336. <https://doi.org/10.2134/agronj2007.0145>
- Lacasa, J., Ciampitti, I. A., Amas, J. I., Curín, F., Luque, S. F., & Otegui, M. E. (2022). Breeding effects on canopy light attenuation in maize: A retrospective and prospective analysis. *Journal of Experimental Botany*, *73*(5), 1301–1311. <https://doi.org/10.1093/jxb/erab503>
- Luque, S. F., Cirilo, A. G., & Otegui, M. E. (2006). Genetic gains in grain yield and related physiological attributes in Argentine maize hybrids. *Field Crops Research*, *95*(2–3), 383–397. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.04.007>
- Malthus, T. (2017). An Essay on the Principle of Population (1798). In *The Future of Nature* (pp. 15–30). Yale University Press. <https://doi.org/10.12987/9780300188479-004>
- Mella, R., Nider, F., & Sanguinetti, A. (1984). Evolución de la ganancia genética en el rendimiento, prolificidad y quebrado del tallo de veintidós cultivares comerciales de maíz (1949-1984). In A.I.A.N.B.A. (Ed.), *Actas del III Congreso Nacional de Maíz*. A.I.A.N.B.A.
- Nocelli Pac, S. (2018). Evolución y retos de la Siembra Directa en Argentina (AAPRESID). *Revista Red de Innovadores*, *162*, 12–15.
- Otegui, M. E., Borrás, L., & Maddonni, G. A. (2015). Crop phenotyping for

- physiological breeding in grain crops: A case study for maize. In *Crop Physiology* (pp. 375–396). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417104-6.00015-7>
- Otegui, M. E., & Mercau, J. L. (2018). Fecha de siembra y rendimiento de maíz en ambientes con provisión hídrica contrastante de la región central de Argentina. *Anales de La Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria*, *71*, 150–160.  
[http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/127399/Documento\\_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/127399/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Otegui, M. E., Mercau, J. L., & Menéndez, F. J. (2002). Estrategias de manejo para la producción de maíz tardío y de segunda. In E. H. Satorre (Ed.), *Guía Dekalb del Cultivo de Maíz* (pp. 171–186). Dekalb Press.
- Otegui, M. E., Nicolini, M. G., Ruiz, R. A., & Dodds, P. (1995). Sowing Date Effects on Grain Yield Components for Different Maize Genotypes. *Agronomy Journal*, *87*(1), 29–33. <https://doi.org/10.2134/agronj1995.00021962008700010006x>
- Otegui, M. E., Riglos, M., & Mercau, J. L. (2021). Genetically modified maize hybrids and delayed sowing reduced drought effects across a rainfall gradient in temperate Argentina. *Journal of Experimental Botany*, 1–9.  
<https://doi.org/10.1093/jxb/erab139>
- Otegui, M. E., Ruiz, R. A., & Petrucci, D. (1996). Modeling hybrid and sowing date effects on potential grain yield of maize in a humid temperate region. *Field Crops Res.*, *47*(2–3), 167–174. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(96\)00031-7](https://doi.org/10.1016/0378-4290(96)00031-7)
- 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*(6).  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0066428>
- Rizzo, G., Pablo Monzon, J., Tenorio, F. A., Howard, R., Cassman, K. G., & Grassini, P. (2022). Climate and agronomy, not genetics, underpin recent maize yield gains in favorable environments. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *119*(4).  
<https://doi.org/10.1073/pnas.2113629119>
- SAGyP. (2022). *Estimaciones Agrícolas*.  
<https://datosestimaciones.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones>
- Smith, S., Cooper, M., Gogerty, J., Löffler, C., Borchering, D., & Wright, K. (2015). Maize. In *Yield Gains in Major U.S. Field Crops* (Vol. 50063, pp. 125–171).  
<https://doi.org/10.2135/cssaspecpub33.c6>
- Tollenaar, M., & Lee, E. A. (2002). Yield potential, yield stability and stress tolerance in maize. *Field Crops Research*, *75*(2–3), 161–169.  
[https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(02\)00024-2](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(02)00024-2)
- Totis de Zeljkovich, L., & Rebella, C. (1980). Necesidades de agua de un cultivo de maíz en la región de Pergamino. In A.I.A.N.B.A. (Ed.), *Actas del 2do. Congreso Nacional de Maíz* (pp. 211–219). A.I.A.N.B.A.
- Trigo, E. J. (2011). Fifteen Years of Genetically Modified Crops in Argentine Agriculture. *ArgenBio*, *December*, 1–49.

[http://argenbio.org/adc/uploads/pdf/15\\_YEARS\\_OF\\_GM\\_CROPS\\_IN\\_ARGENTINE\\_AGRICULTURE.pdf](http://argenbio.org/adc/uploads/pdf/15_YEARS_OF_GM_CROPS_IN_ARGENTINE_AGRICULTURE.pdf)

- Viglizzo, E. F., & Jobbágy, E. (2012). Expansión de la frontera agropecuaria en Argentina y su impacto ecológico-ambiental. In E. F. Viglizzo & E. Jobbágy (Eds.), *Expansión de la Frontera Agropecuaria en Argentina y su Impacto Ecológico-Ambiental*. INTA.
- Zhang, H., Jing, W., Zhao, B., Wang, W., Xu, Y., Zhang, W., Gu, J., Liu, L., Wang, Z., & Yang, J. (2021). Alternative fertilizer and irrigation practices improve rice yield and resource use efficiency by regulating source-sink relationships. *Field Crops Research*, 265(October 2020), 108124.  
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108124>