

PROGRESO GENÉTICO DE MAÍZ EN ARGENTINA: EFECTO DE LA FECHA DE SIEMBRA

Alfredo G. Cirilo y María E. Otegui

1- Tendencias y requerimientos de rendimiento en maíz

El maíz es uno de los principales cereales que sustenta la alimentación humana a nivel mundial (FAO, 2015). El rendimiento en grano (RG) en esta especie a nivel mundial aumentó de manera sostenida en los últimos 50 años (Fig. 1a), estimándose una tasa de ganancia global (incluye mejoras genéticas y de manejo agronómico) de 1,6% anual (Ray et al., 2013). Si bien esta ganancia es la más alta entre los principales cultivos extensivos para grano, la brecha respecto al incremento requerido para satisfacer la demanda mundial hacia el 2050 (2,4% por año; Ray et al., 2013) es muy grande, siendo difícil imaginar una mejora tal que permita acortarla (Hall y Richards, 2013). En este sentido, la adopción de cultivos transgénicos sólo contribuyó a sostener el porcentaje de ganancia, ya que el mismo tiende a declinar a medida que el rendimiento medio aumenta (Otegui et al., 2015). En consecuencia, los aumentos requeridos de producción deberán venir de la mano de aumentos sustanciales del RG, tanto producto del mejoramiento genético como de mejoras en las prácticas de manejo (Tilman et al., 2011), con el fin de optimizar el uso de la tierra hoy destinada a la agricultura si no se quiere continuar avanzando la frontera agrícola hacia ambientes considerados frágiles (Viglizzo et al. 2007). Este último aspecto conlleva tanto la intensificación de la producción como también el logro de mayor estabilidad interanual en los rendimientos, especialmente tendiente a evitar años con fuertes disminuciones.

En el caso de Argentina se ha registrado un aumento sostenido en el RG del cultivo de maíz, con valores medios de $117 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (2,58% anual) para el período 1970-2015. Esta tendencia, sin embargo, no fue uniforme. Se registraron aumentos ($63\text{-}198 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, según el período) hasta el año 2005, momento a partir del cual se verificó un marcado estancamiento en el RG (Fig. 1b). Esta respuesta coincide con una fuerte adopción de maíces de siembra tardía en las principales provincias productoras de este cereal (Fig. 1c y 1d). Se busca así aprovechar la mayor estabilidad de RG de estas siembras asociada a un balance hídrico más favorable (Mercau y Otegui, 2014), a pesar de su menor potencial rendimiento (Cirilo y Andrade, 1994; Otegui et al., 1995).

2- Mejoramiento genético: ganancia de rendimiento y efecto sobre rasgos secundarios

Los programas de mejoramiento genético de maíz han puesto énfasis en la evaluación de germoplasma en redes amplias de ensayo con el objetivo de seleccionar materiales con mayor tolerancia general al estrés abiótico (Tollenaar y Lee, 2002), principalmente por déficit hídrico (Cooper et al., 2014). En la zona núcleo Pampeana (i.e. norte de Buenos Aires y sur de Santa Fe), donde se asientan los programas de mejora genética de las empresas con mayor participación en el mercado local, dichos esfuerzos se orientaron a la obtención de híbridos con comportamiento superior en fechas de siembra tempranas (Septiembre-Octubre). Para estas condiciones, los estudios de ganancia genética estimaron valores entre 105 y $249 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$

(Eyhérabide et al., 1992; Eyhérabide y Damilano, 2001). Hasta la aparición en 1997 de maíces transgénicos con protección contra insectos, la siembra anticipada de maíz buscó escapar al déficit hídrico estival adelantando la floración y evitar la incidencia de plagas animales que se acrecienta con el retraso de la siembra (Andrade et al., 1996). La introducción de la tecnología Bt eliminó esta última restricción, habilitando la fuerte adopción de siembras tardías que permiten al cultivo explorar los mejores balances hídricos ya mencionados (Mercau y Otegui, 2014).

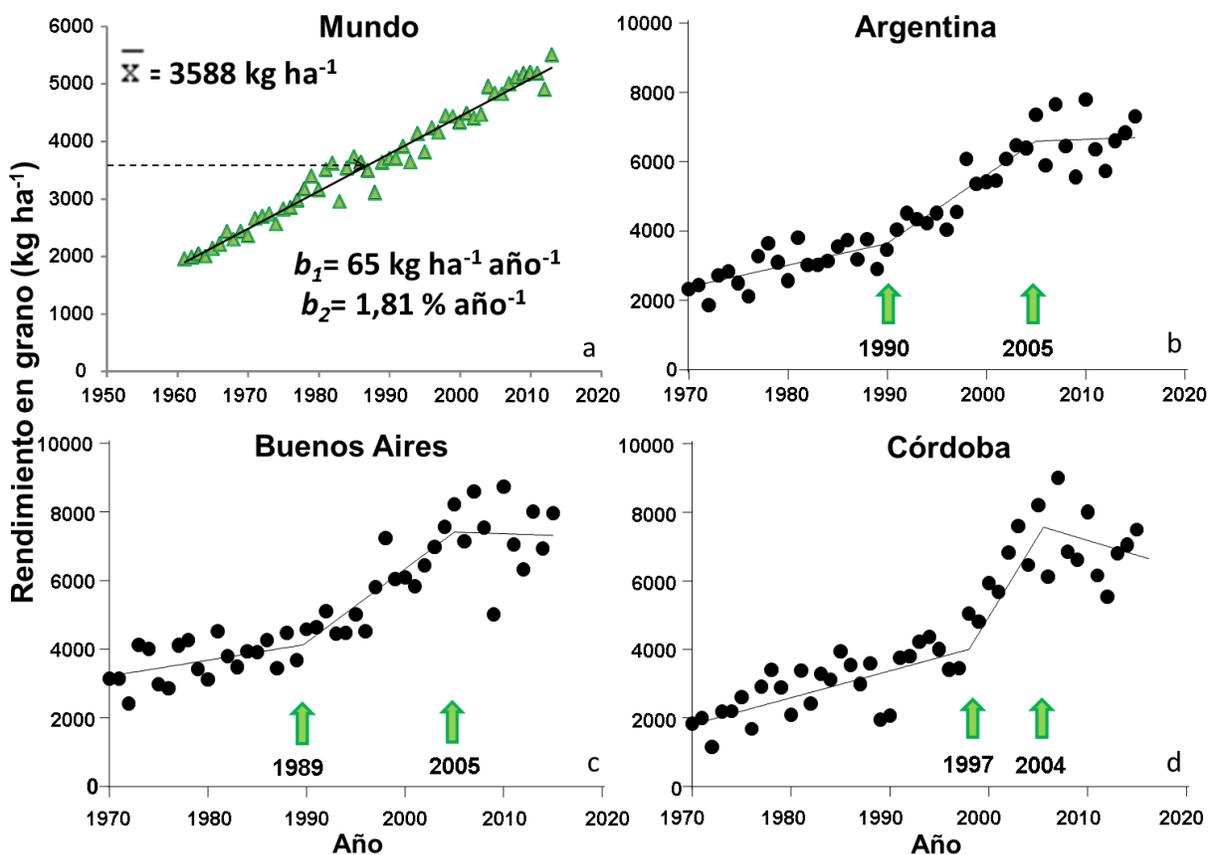


Figura 1. Evolución del rendimiento en grano de maíz a nivel mundial (a), en Argentina (b) y en las principales provincias productoras de Argentina (c-d). En la figura (a) se indica el valor promedio y la ganancia global del período considerado, tanto en términos absolutos (b_1) como porcentuales ($b_2 = b_1 \times 100 / \bar{x}$). Las flechas en b-d indican los años en que se registró un cambio en la pendiente según los modelos tri-lineales ajustados. Los valores de pendiente en cada fase fueron 63, 198 y 11 kg ha⁻¹año⁻¹ en (b), 46, 214 y -10 kg ha⁻¹año⁻¹ en (c), y 78, 473 y -86 kg ha⁻¹año⁻¹ en (d). Datos obtenidos de (a) FAO (2015), y (b-d) Minagri (2015).

Cuando se analizan los efectos del mejoramiento genético tanto sobre el RG como sobre sus determinantes fisiológicos y componentes numéricos (Tabla 1), se observa que el mismo provocó aumentos en la producción de biomasa total, el índice de cosecha (proporción de la biomasa total aérea que es cosechada como granos) y el número de granos por unidad de

superficie, sin cambios en el peso individual del grano. Un aspecto destacado es el menor progreso genético que se registra tanto para el RG como para la mayoría de los rasgos secundarios evaluados cuando en el análisis sólo se incluyen los híbridos simples (i.e. comparando genotipos con similar nivel de vigor híbrido), que predominan en el mercado desde la década del 2000.

Tabla 1. Progreso genético estimado para el rendimiento en grano de maíz, sus componentes numéricos (número y peso individual del grano) y sus determinantes fisiológicos (biomasa a madurez e índice de cosecha) para un conjunto de híbridos de maíz liberados entre 1965 y 2012. La estimación incluye todos los híbridos evaluados (n= 29; Progreso genético 1) o sólo los híbridos simples (n= 19: Progreso genético 2) incluidos en los experimentos de Luque et al. (2006), D'Andrea et al. (2008) y Policastro Basallo et al. (2016).

Rasgos	Progreso genético 1	Progreso genético 2
Rendimiento en grano	1,04% año ⁻¹ , r ² = 0,607***	0,80% año ⁻¹ , r ² = 0,581***
Número de granos por m²	1,13% año ⁻¹ , r ² = 0,417***	0,94% año ⁻¹ , r ² = 0,294*
Peso individual del grano	-0,12% año ⁻¹ , r ² = 0,019 (ns)	-0,21% año ⁻¹ , r ² = 0,042 (ns)
Biomasa total a madurez	0,45% año ⁻¹ , r ² = 0,449***	0,80% año ⁻¹ , r ² = 0,581***
Índice de cosecha	0,61% año ⁻¹ , r ² = 0,457***	0,46% año ⁻¹ , r ² = 0,302***

*, **, *** indica $P \leq 0.05$, 0.01 y 0.001, respectivamente. ns: no significativo.

Considerando el conjunto de todos los híbridos evaluados, el progreso genético (1,04 % anual) representa un 40% de la mejora total de rendimiento. Pero si sólo se tiene en cuenta los híbridos simples, dicho progreso representa el 31%. El resto sería atribuible a mejoras de manejo y a interacciones Genética x Manejo.

3- Mejoramiento genético y fecha de siembra

Los resultados comentados (Tabla 1) corresponden a cultivos creciendo en condiciones potenciales (siembras tempranas, sin restricciones abióticas ni bióticas). Se desconoce, sin embargo, el efecto del mejoramiento genético para los ambientes que exploran las siembras tardías. En INTA Pergamino se están conduciendo actualmente trabajos que incluyen híbridos simples de una misma empresa, representativos de diferentes épocas del mejoramiento (liberados desde 1980), creciendo bajo riego en un rango amplio de densidades (60000-120000 plantas ha⁻¹) y en épocas de siembra contrastantes (Octubre y Diciembre). Los resultados preliminares indican que el efecto de la mejora genética para RG es reducido para híbridos simples en siembras tempranas (0,57 % año⁻¹), en concordancia con los antecedentes ya

comentados (Tabla 1). Cabe destacar que esta mejora se verifica exclusivamente al utilizar densidades de siembra altas (Fig. 2a). El efecto del mejoramiento se torna nulo en siembras tardías, independientemente de la densidad de siembra evaluada (Fig. 2b).

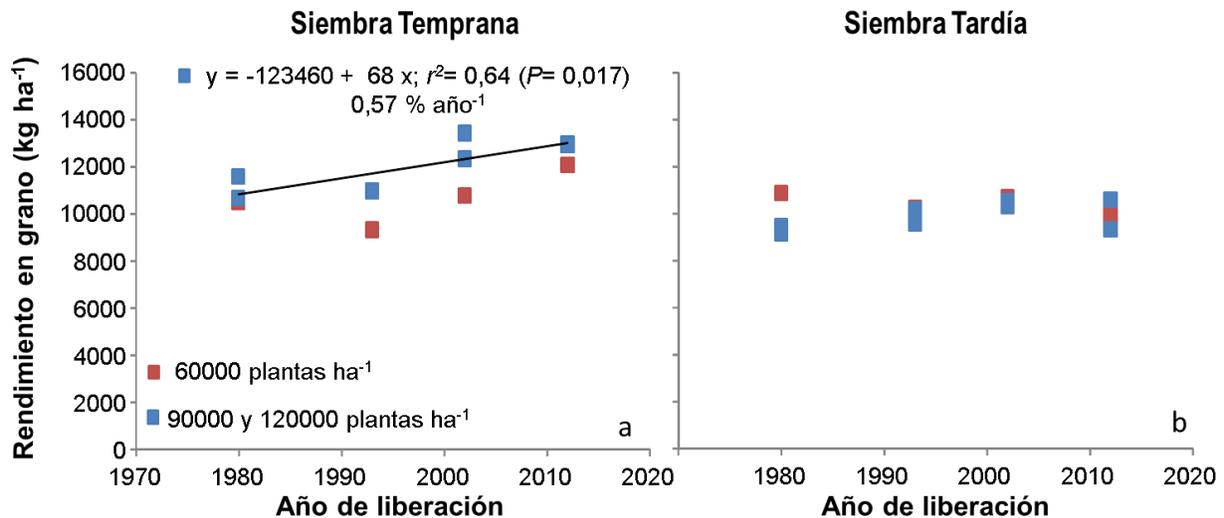


Figura 2. Efecto del mejoramiento genético para rendimiento en grano de maíz cultivado bajo riego en Pergamino en siembras tempranas (a) y tardías (b). En cada fecha de siembra se evaluaron tres densidades de plantas.

El análisis de los rasgos secundarios asociados a las tendencias observadas en RG para este conjunto acotado de híbridos reveló que se sostiene la tendencia a un aumento en el número de granos por m² como consecuencia del mejoramiento genético (Fig. 3a). Sin embargo, las mejoras del número de granos estuvieron acompañadas por una tendencia negativa en el peso individual del grano en siembras tardías (Fig. 3b). Esta compensación entre ambos componentes numéricos explicaría la ausencia de cambios en el RG entre híbridos de diferente época del mejoramiento al atrasar la fecha de siembra (Fig. 2b). Estos resultados sugieren una insuficiente capacidad del cultivo para atender el llenado de los granos en las condiciones de oferta ambiental declinante propia de las siembras tardías (Cirilo y Andrade, 1996; Borrás et al., 2004). Estos indicios alertan sobre la necesidad de atender esta deficiencia en los programas de mejoramiento para la obtención de híbridos adaptados a las siembras tardías.

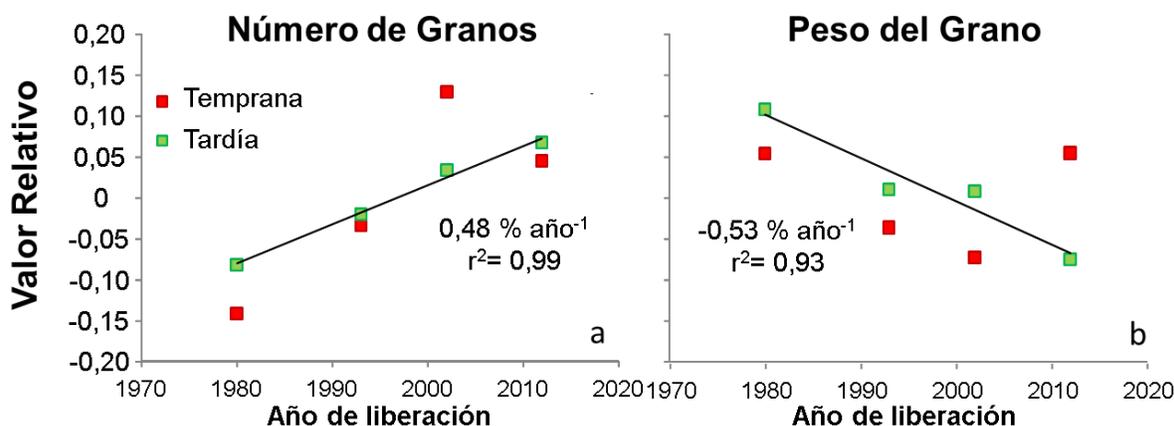


Figura 3. Efecto del mejoramiento genético sobre (a) el número de granos por m², y (b) el peso individual del grano. Los datos corresponden a híbridos simples de maíz cultivados en Pergamino en siembra temprana y tardía. Los valores están expresados en términos relativos al valor medio de cada experimento para una densidad de 9 plantas m⁻². Los modelos ajustados ($P < 0.05$) corresponden a la siembra tardía.

4- Conclusiones

La ganancia global de rendimiento en grano del cultivo de maíz en Argentina ha sido en promedio de 117 kg ha⁻¹ año⁻¹ (2,58% anual) para el período 1970-2015, pero la mejora registrada en la última década fue casi nula (0,16% anual). Si bien la tendencia descrita no fue uniforme en todo el país, las principales provincias productoras (Buenos Aires y Córdoba) definieron el patrón general. Este cambio coincide con la fuerte adopción de maíz tardío.

Los estudios de progreso genético conducidos en Pergamino indican una mejora de 1,04% anual para híbridos liberados entre 1965 y 2012, que disminuye a 0,80% anual cuando sólo se consideran híbridos simples. Estas mejoras representan 40% y 31%, respectivamente, de la ganancia global de rendimiento de maíz en Argentina.

Tanto los determinantes fisiológicos del rendimiento como sus componentes numéricos registraron mejoras genéticas en siembras tempranas. En estudios recientes, con híbridos simples liberados desde 1980, el progreso genético cae a niveles casi nulos en siembras tardías, debido a que la reducción en el peso individual del grano que se registra en estas siembras compensa la mejora del número de granos.

5- Bibliografía

- Andrade F.H., Cirilo, A.G., Uhart, S., Otegui, M.E., 1996. Ecofisiología del Cultivo de Maíz. Editorial La Barrosa-EEA Balcarce, CERBAS, INTA-FCA, UNMP (Eds.). Dekalb Press. Buenos Aires. 292 pp.
- Borrás, L., Slafer, G.A., Otegui, M.E., 2004. Seed dry weight response to source-sink manipulations in wheat, maize and soybean. A quantitative reappraisal. Field Crops Res. 83, 131-146.

- Cirilo, A.G., Andrade F.H., 1994. Sowing date and maize productivity. I. Crop growth and dry matter partitioning. *Crop Sci.* 34, 1039-1043.
- Cirilo, A.G., Andrade F.H., 1996. Sowing date and kernel weight in maize. *Crop Sci.* 36, 325-331.
- Cooper, M., Gho, C., Leafgren, R., Tang, T., Messina, C., 2014. Breeding drought-tolerant maize hybrids for the US corn-belt: discovery to product. *J.Exp.Bot.* 65, 6191-6204.
- D'Andrea, K.E., Otegui, M.E., Cirilo, G.A., 2008. Kernel number determination differs among maize hybrids in response to nitrogen. *Field Crops Res.* 105, 228-239.
- Eyhérabide, G., Damilano, A., Colazo, J., Van Becelaere, A.F., Sans, R., 1992. Ganancia genética en rendimiento de grano de maíz en Argentina desde 1979 hasta 1991. En: *Asoc. Ing. Agr. del Norte de la Prov. de Buenos Aires (Eds.), Actas V Congreso Nacional de Maíz.* Pergamino, Argentina, pp. 70–78.
- Eyhérabide, G., Damilano, A., 2001. Evolución de la ganancia genética en rendimiento de grano de maíz en Argentina entre 1979 y 1998. En: *Asoc. Ing. Agr. del Norte de la Prov. de Buenos Aires (Eds.), Actas VII Congreso Nacional de Maíz.* Pergamino, Argentina, p. 45.
- FAO, 2015. <http://www.fao.org>
- Hall, A.J., Richards, R.A., 2013. Prognosis for genetic improvement of yield potential and water-limited yield of major grain crops. *Field Crops Res.* 143, 18–33.
- 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 Res.* 95, 383-397.
- Mercau, J.L., Otegui, M.E., 2014. A modeling approach to explore water management strategies for late-sown maize and double-cropped wheat-maize in the rain-fed Pampas region of Argentina. En: *Lajpat Ahuja, Liwang Ma, Robert Lascano (Eds.), 'Advances in Agricultural Systems Modeling'.* ASA-CSSA-SSSA, Baltimore, EEUU. pp. 351-374.
- Minagri, 2015. <http://www.agroindustria.gob.ar/sitio/>
- Otegui, M.E., Nicolini, M.G., Ruiz, R.A., Dodds, P., 1995. Sowing date effects on grain yield components for different maize genotypes. *Agron. J.* 87, 29-33.
- Otegui, M.E., Borrás, L., Maddonni, G.A., 2015. Crop phenotyping for physiological breeding in grain crops: a case study for maize. En: *V.O. Sadras, D.F. Calderini (Eds.), 'Crop Physiology: Applications for Genetic Improvement, Agronomy and Farming Systems'.* Elsevier, Netherlands. pp. 375-393.
- Policastro Basallo, F., D'Andrea, K., Cirilo, A., Otegui, M.E., 2016. Progreso genético en maíz: análisis del rendimiento en grano y sus determinantes fisiológicos. *Actas XXXI Reunión Argentina de Fisiología Vegetal.* Corrientes, Argentina. p. 91.
- 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, 1–8.
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., Befort, B.L., 2011. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *PNAS* 108, 20260-20264.
- Tollenaar, M., Lee, E.A., 2002. Yield potential, yield stability and stress tolerance in maize. *Field Crops Res.* 75, 161–169.
- Viglizzo, E., 2007. Producción agropecuaria y medio ambiente. Propuestas compartidas para su sustentabilidad. *Fundación Vida Silvestre, Argentina,* 55 pp.