

PESO FINAL DEL GRANO: PARÁMETROS DETERMINANTES EN DOS HÍBRIDOS CONTRASTANTES

Michelin C.I.^{1,2}; Novelli L.E.^{1,2,3}; Maltese N.E.⁴; Caviglia O.P.^{1,2}

¹Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Entre Ríos, Ruta 11, Km. 10.5 (3101), Oro Verde, Entre Ríos, Argentina. cintia.michelin@uner.edu.ar; leonardo.novelli@uner.edu.ar; octavio.caviglia@uner.edu.ar

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

³Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agropecuaria Paraná, Ruta 11, Km. 12.5 (3101), Oro Verde, Entre Ríos, Argentina.

⁴Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Estación Experimental "Dr. Alberto Boerger", Ruta 50, km 11, Colonia, Uruguay. nmaltese@inia.org.uy

FINAL KERNEL WEIGHT: DETERMINING PARAMETERS IN TWO CONTRASTING HYBRIDS

Abstract

Several new maize hybrids have a higher potential kernel weight (KW) than those released decades before. In highly variable environments, where low plant densities are often adopted as a defensive strategy, these hybrids could capture any improvement in resource availability and translate it into yield gains. Therefore, it is relevant to identify which grain growth parameters are involved in these KW differences. Two hybrids, characterized by contrasting potential KW (BRV8472, low, and BRV8380, high), were evaluated under two plant densities (3 and 6 plants m⁻²) during two contrasting growing seasons in Entre Ríos, Argentina. Dry matter accumulation and kernel water content were measured weekly to estimate: i) the maximum water content, ii) the growth rates and duration of the lag phase, iii) the growth rates and duration of the effective filling phase, and iv) the final KW. BRV8380 and the low plant density showed higher maximum water content and KW in both experiments. This advantage was mainly associated with a longer duration of effective grain filling, rather than with a higher growth rate.

Palabras claves: fase lag, fase de llenado efectivo, contenido de agua, maíz

Keywords: lag phase, effective grain filling phase, water content, maize

Introducción

El rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) está compuesto por el número de granos por unidad de superficie y su peso individual (PG). Aunque el número de granos sigue siendo el principal componente del rendimiento (Amas *et al.*, 2024; Early *et al.*, 1967; Fischer, 1975), en los híbridos actuales, el PG explica una fracción creciente de la variación del rendimiento (e.g. Borrás y Gambín, 2010). En efecto, los programas de mejoramiento se han enfocado principalmente en el número de granos, aunque el incremento de PG explica gran parte de la ganancia genética en los últimos años en algunos países (Amas *et al.*, 2022; Fernández *et al.*, 2022).

El crecimiento del grano y su peso final son definidos en etapas sucesivas (Bewley y Black, 1985), con sus correspondientes tasas y duraciones. La primera, denominada fase lag, ocurre inmediatamente después de la fecundación y se caracteriza por una lenta acumulación de materia seca, acompañada por una activa división celular. Durante esta etapa se establece el número de células que posteriormente determinarán la

capacidad potencial de almacenamiento de almidón, por lo que se considera un período crítico en la definición del PG potencial (Jones *et al.*, 1985). La segunda etapa corresponde al llenado efectivo del grano, donde ocurre la mayor acumulación de materia seca a una tasa aproximadamente lineal. Finalmente, durante la tercera etapa cesa la acumulación de biomasa y los granos pierden agua hasta alcanzar la madurez fisiológica.

Las relaciones hídricas del grano durante el llenado son muy importantes para comprender estos procesos, debido a que la acumulación de agua precede a la acumulación de biomasa y ambas están estrechamente relacionadas (Borrás *et al.*, 2003; Borrás *et al.*, 2010; Gambín *et al.*, 2007). El contenido máximo de agua alcanzado por el grano constituye un buen indicador del PG potencial (Borrás *et al.*, 2003; Saini y Westgate, 1999), ya que se encuentra asociado a la tasa de crecimiento del grano durante su llenado efectivo (Melchiori y Caviglia, 2008).

En maíz, se ha demostrado que la reducción de la densidad de plantas contribuye a alcanzar mayores PG (Borrás *et al.*, 2003), al incrementar la disponibilidad de recursos por planta, hasta un umbral donde incrementos de la relación fuente-destino no se traducen en mayores PG (Borrás y Otegui, 2001, Borrás *et al.*, 2004). Asimismo, actualmente existen híbridos que, creciendo bajo las mismas condiciones, alcanzan un mayor PG. Esto sugiere que las diferencias de PG podrían no depender únicamente de la oferta de recursos, sino también de procesos internos del grano que regulan su capacidad de crecimiento.

En regiones como Entre Ríos, caracterizadas por una gran variabilidad ambiental, principalmente asociado a condiciones de estrés hídrico y presencia de suelos arcillosos (que poseen una menor capacidad de almacenaje de agua comparado a la mayor parte de la región pampeana), es común la adopción de estrategias de manejo defensivas. Estas se basan en el uso de bajas densidades de plantas, con el objetivo de estabilizar y elevar pisos de rendimiento. En este contexto, la utilización de híbridos con mayor PG potencial podría contribuir a capturar una mejora en la oferta ambiental, mejorando el rendimiento. Sin embargo, aún no está suficientemente claro cuáles son los procesos fisiológicos del crecimiento del grano que determinan las diferencias de PG entre híbridos con distinto PG potencial. En este trabajo se evaluaron los principales parámetros del crecimiento del grano para identificar aquellos asociados con un mayor PG.

Materiales y métodos

Se realizaron dos experimentos (2022/23 y 2024/25; Exp₁ y Exp₂) en secano en Sauce Pinto, Entre Ríos, Argentina (31° 50' S, 60° 24' O), evaluando dos híbridos: BRV8472PWUN y BRV8380PWUE (identificado *a priori* con mayor PG potencial), y dos densidades de plantas: 3 y 6 pl m⁻² (de ahora en más baja y alta densidad, respectivamente). Se aplicaron manualmente 100 kg N ha⁻¹ en total, como nitrato de amonio calcáreo (27-0-0). La siembra se realizó con 6 pl m⁻² y en V2 (Ritchie y Hanway, 1982) se redujo a la mitad en los tratamientos de baja densidad. A la siembra se fertilizó con 23-24 kg P ha⁻¹. Se utilizó un diseño en bloques completos al azar (DBCA) con tres repeticiones, y las parcelas contaron con siete hileras de 20 m separadas a 0.52 m por parcela.

Entre R1 y R1+2 días se marcaron 25-30 espigas primarias con sus estigmas expuestos, por parcela, para garantizar la sincronidad de la polinización. Desde los 7 días post-polinización y hasta R6 se cosecharon semanalmente tres espigas por parcela (excepto en el Exp₁ donde a partir del día R1+21d se hizo cada 14 días). Se tomaron 20 granos del tercio medio por espiga (60 granos por parcela), que se pesaron en fresco y en seco, luego de 96 h en estufa con aire forzado.

El contenido de agua del grano se calculó como la diferencia entre peso fresco y seco, y el contenido de humedad (H, %) como la relación entre el contenido de agua del grano y su peso fresco. Se ajustó una función cúbica entre contenido de agua y H de acuerdo con Melchiori y Caviglia (2008):

$$\text{Contenido de agua} = a + bH + cH^2 + dH^3$$

donde a es la intersección en el eje Y, mientras b, c y d son parámetros del modelo. Se obtuvo la primera derivada de la ecuación y se la igualó a cero, obteniendo el contenido de humedad en el que el contenido de agua en el grano alcanzó su máximo valor. Por lo tanto, ese valor de humedad se reemplazó luego en la función para estimar el contenido máximo de agua del grano (CMAG).

Se ajustó un modelo trilineal entre PG y el tiempo térmico post-floración (TTPF, °C d, base 0°C; Muchow, 1990) según Edreira *et al.* (2014):

$$PG = TCG_{lag} * TTPF, \text{ for } TTPF \leq D_{lag}$$

$$PG = TCG_{lag} * D_{lag} + TCG_{LEG} * (TTPF - D_{lag}), \text{ for } D_{LG} \geq TTPF > D_{lag}$$

$$PG = TCG_{lag} * D_{lag} + TCG_{LEG} (D_{LG} - D_{lag}), \text{ for } TTPF > D_{LG}$$

donde TCG_{lag} es la tasa de crecimiento del grano durante la fase lag (mg grano⁻¹ °C d⁻¹), D_{lag} es la duración de la fase lag (°C d), TCG_{LEG} es la tasa de crecimiento del grano durante el llenado efectivo del grano (mg grano⁻¹ °C d⁻¹) y D_{LG} es la duración del llenado del grano (°C d). La duración de la fase de llenado efectivo del grano (D_{LEG}) se calculó como la diferencia entre D_{LG} y D_{lag}.

El contenido máximo de agua, la tasa de crecimiento del grano en la fase lag, la duración de la fase lag, la tasa de crecimiento del grano durante el llenado efectivo, la duración del llenado efectivo y el PG final se analizaron para cada experimento mediante modelos lineales mixtos (híbrido y densidad de plantas como efectos fijos; bloque como efecto aleatorio). Adicionalmente, se realizó un análisis de componentes principales (PCA) sobre estas variables estandarizadas para explorar sus relaciones e identificar cuáles explicaban mejor el PG final del grano. Los análisis se realizaron en InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2011) y los gráficos en GraphPad Prism (Warton *et al.*, 2012).

Resultados y discusión

Las condiciones ambientales fueron marcadamente diferentes entre ambos experimentos (Fig. 1). En cuanto a la disponibilidad hídrica, el Exp₁ se caracterizó por un marcado déficit de agua durante gran parte del ciclo del cultivo, con precipitaciones ocasionales, mientras que en Exp₂ las lluvias fueron más regulares, a excepción de los últimos días del ciclo. La radiación acumulada durante el ciclo fue levemente mayor en Exp₁ (2954 MJ m⁻²) que en Exp₂ (2876 MJ m⁻²). La temperatura media del aire fue similar



50 AÑOS
PENSANDO
EL FUTURO

XIII
CONGRESO
NACIONAL
DE MAÍZ

entre experimentos, con valores de 23.8 °C en el Exp₁ y de 22.8 °C en Exp₂. Sin embargo, Exp₁ presentó temperaturas máximas considerablemente más elevadas, registrándose un mayor número de días con temperaturas superiores al umbral de 35 °C (33 días en Exp₁ y 6 días en Exp₂), principalmente durante el llenado de granos. En ambos experimentos el período crítico transcurrió con escaso o nulo estrés térmico.

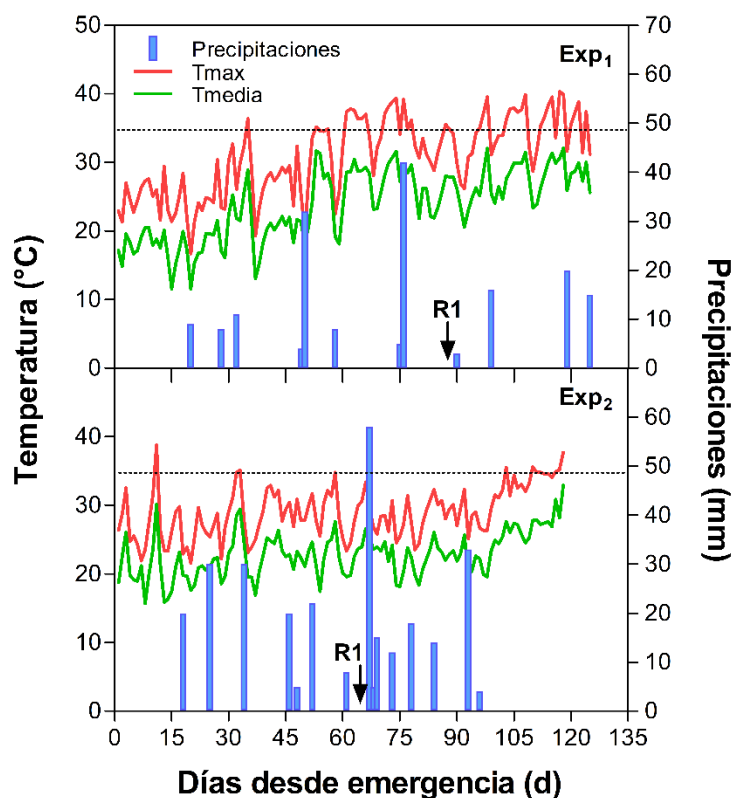


Figura 1. Temperatura media (línea verde) y máxima (línea roja) del aire y precipitaciones (barras azules) durante Exp₁ (panel superior) y Exp₂ (panel inferior). Las líneas discontinuas indican el umbral de 35 °C (umbral de estrés térmico, Rattalino Edreira *et al.*, 2011) y la flecha indica el momento de R1.

Debido a las marcadas diferencias ambientales registradas entre los experimentos, especialmente en la disponibilidad hídrica y las temperaturas máximas (Fig. 1), los parámetros del crecimiento del grano se analizaron por separado para cada experimento.

El contenido máximo de agua del grano fue significativamente ($p \leq 0.001$) afectado por el híbrido y la densidad de plantas en ambos experimentos (Tabla 1). BRV8380 superó en este parámetro a BRV8472 en un 10.5% en el Exp₁ y un 11.4% en el Exp₂, mientras que la baja densidad superó a la alta densidad en un 19.3% en el Exp₁ y un 5.6% en el Exp₂ (Fig. 2).

En la fase lag del Exp₁, la tasa de crecimiento del grano fue fuertemente afectada por el híbrido ($p < 0.0001$) y por la interacción híbrido $\times$ densidad de plantas ($p = 0.0188$) (Tabla 1). En BRV8380, la baja densidad superó a la alta densidad en un 20%, y ambas superaron a BRV8472 (donde la tasa de crecimiento del grano no varió entre densidades) en un 43% y 19%, respectivamente (Fig. 2). En el Exp₂, la tasa de crecimiento del grano en la fase lag difirió solo entre híbridos ($p = 0.0031$, Tabla 1), con BRV8380 mostrando el valor más alto. La duración de la fase lag no fue afectada por ningún factor

en el Exp₁ ($p > 0.05$), pero sí en el Exp₂ donde la alta densidad prolongó la fase lag un 8.7% respecto a la baja densidad ($p = 0.0093$, Fig. 2).

En la fase de llenado efectivo del grano, la tasa de crecimiento del grano solo fue afectada en el Exp₁ por la densidad de plantas ($p = 0.0238$, Tabla 1), con la baja densidad superando a la alta densidad en un 13.9% (Fig. 2). La duración del llenado efectivo del grano fue mayor en BRV8380 en ambos experimentos ($p = 0.0213$ en Exp₁ y $p = 0.0471$ en Exp₂, Tabla 1), superando a BRV8472 en un 15.4% en el Exp₁ y un 9.0% en el Exp₂ (Fig. 2).

El PG estuvo fuertemente afectado por el híbrido ($p = 0.0169$ en Exp₁ y $p < 0.0001$ en Exp₂, Tabla 1) y por la densidad de plantas ($p < 0.0001$ en Exp₁ y $p = 0.0016$ en Exp₂, Tabla 1). BRV8380 superó a BRV8472 en un 8.2% en el Exp₁ y un 12.2% en el Exp₂, mientras que la baja densidad superó a la alta densidad en un 19.0% en el Exp₁ y un 8.2% en el Exp₂ (Fig. 2).

Tabla 1: Valores medios del contenido máximo de agua en el grano (CMAG), tasa de crecimiento del grano en la fase lag (TCG_{lag}), duración de la fase lag (D_{lag}), tasa de crecimiento del grano en la fase de llenado efectivo (TCG_{LEG}), duración de la fase de llenado efectivo del grano (D_{LEG}) y peso final del grano (PG) para dos híbridos de maíz (BRV8472 y BRV8380) sembrados en dos densidades de plantas (3 y 6 pl m⁻²) y dos experimentos (Exp₁ y Exp₂). Letras diferentes indican diferencias significativas (LSD, $p < 0.05$) dentro de cada fuente de variación.

Exp		CMAG (mg grano ⁻¹)	TCG _{lag} (mg grano ⁻¹ °C d ⁻¹)	D _{lag} (°C d ⁻¹)	TCG _{LEG} (mg grano ⁻¹ °C d ⁻¹)	D _{LEG} (°C d ⁻¹)	PG (mg grano ⁻¹)
1	Híbrido						
	BRV8472	124 b	0.021 b	322	0.196	591 b	122 b
	BRV8380	137 a	0.027 a	320	0.190	682 a	132 a
	<u>p-valor</u>	0.0001	<0.0001	ns	ns	0.0213	0.0169
	Densidad						
	3 pl m ⁻²	142 a	0.025	311	0.205 a	659	138 a
	6 pl m ⁻²	119 b	0.023	331	0.180 b	614	116 b
	<u>p-valor</u>	<0.0001	ns	ns	0.0238	ns	<0.0001
2	Interacción	<u>p-valor</u>					
	Híbrido*Densidad	ns	0.0175	ns	ns	ns	ns
	Híbrido						
	BRV8472	210 b	0.026 b	349	0.349	732 b	263 b
	BRV8380	234 a	0.033 a	347	0.359	798 a	295 a
	<u>p-valor</u>	<0.0001	0.0031	ns	ns	0.0471	<0.0001
	Densidad						
	3 pl m ⁻²	228 a	0.029	333 b	0.350	806 a	290 a
	6 pl m ⁻²	216 b	0.031	362 a	0.357	724 b	268 b
	<u>p-valor</u>	<0.0001	ns	0.0093	ns	0.0148	0.0016
	Interacción	<u>p-valor</u>					
	Híbrido*Densidad	ns	ns	ns	ns	ns	ns

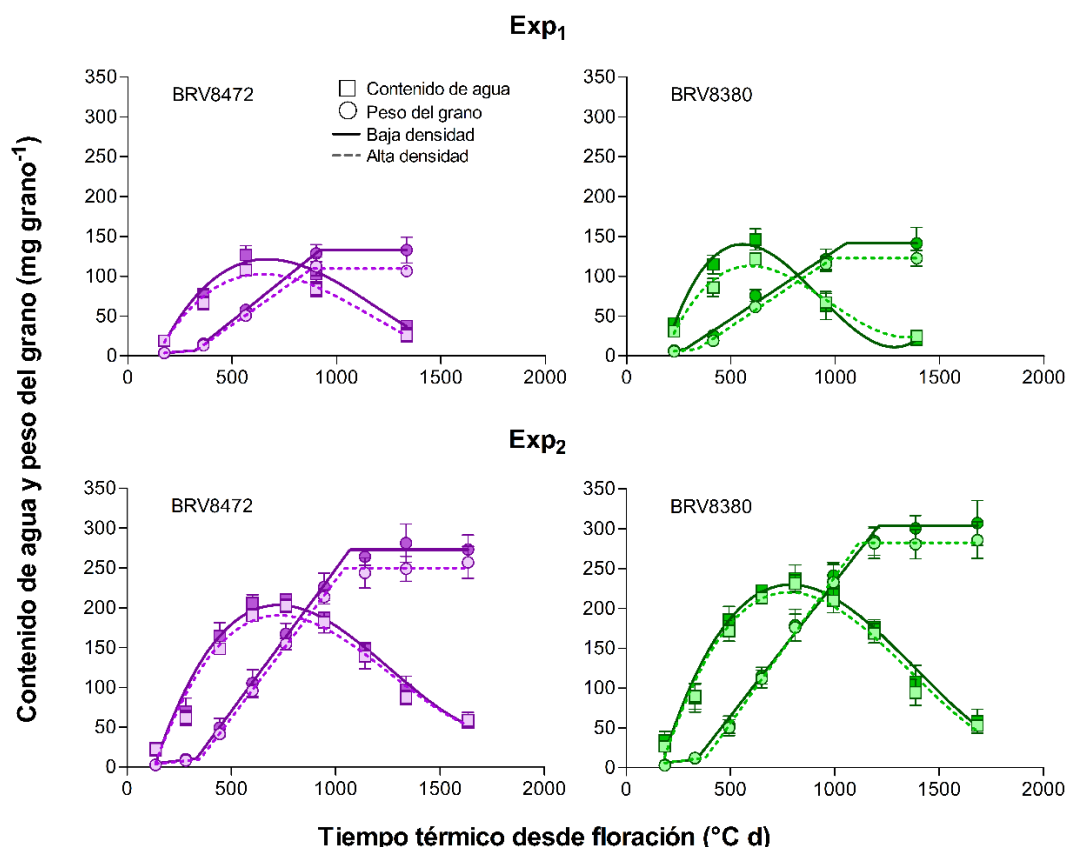


Figura 2. Contenido de agua (cuadrados) y peso del grano (círculos) durante Exp₁ (superior) y Exp₂ (inferior) en dos híbridos (BRV8472: izquierda y BRV8380: derecha) y dos densidades (3 pl m⁻², baja densidad: líneas continuas, y 6 pl m⁻², alta densidad: líneas punteadas) en función del tiempo térmico desde la floración (Tb = 0°C). Las líneas de error indican la desviación estándar. Todas las funciones ajustadas presentaron un $r^2 \geq 0.92$.

A partir del análisis de componentes principales (Fig. 3) se encontró que, en el Exp₁, el PG estuvo estrechamente asociado al contenido máximo de agua del grano y, en menor medida a la tasa de crecimiento y duración de la fase de llenado efectivo del grano, sin una asociación claramente predominante hacia alguna de ellas. La ubicación de BRV8380 en baja densidad (que tuvo mayor PG) se proyectó más próximo al vector de duración en el llenado efectivo que al de la tasa de crecimiento del grano en esa fase. En el Exp₂, el PG, el contenido máximo de agua del grano y la duración del llenado efectivo del grano se agruparon sobre el mismo componente y nuevamente en igual dirección que BRV8380 en baja densidad. En cambio, las variables de tasa, tanto en la fase lag como de llenado efectivo, y la duración de la fase lag estuvieron más asociadas a los tratamientos en alta densidad. Esto indica que, en este experimento, la mayor duración del llenado efectivo fue la variable que mejor explicó el mayor PG de BRV8380 en baja densidad.

Además de las asociaciones entre variables, el PCA mostró un patrón de ordenamiento diferente entre experimentos. En el Exp₁, el primer componente principal discriminó principalmente las densidades de plantas, separando los tratamientos de baja densidad, asociados con mayores valores de PG y contenido máximo de agua del grano, de los de alta densidad. La diferenciación entre híbridos ocurrió sobre el segundo componente principal. En contraste, en el Exp₂ el primer componente principal separó



principalmente a los híbridos, ubicando a BRV8380 junto a mayores valores de PG y contenido máximo de agua del grano, mientras que la diferenciación entre densidades quedó representada sobre el segundo componente principal. Estos resultados sugieren que, bajo las condiciones hídricas y térmicas más restrictivas del Exp₁, la densidad de plantas explicó una mayor proporción de la variación en los procesos determinantes del PG, mientras que en el Exp₂ las diferencias genotípicas adquirieron mayor relevancia.

En conjunto, el PCA sugiere que el mayor PG obtenido en BRV8380, caracterizado *a priori* con PG superior, y en baja densidad estaría explicado principalmente por una mayor duración del llenado efectivo (Fernández *et al.*, 2022). Si bien en el Exp₁ este mecanismo estuvo acompañado por una mayor tasa de crecimiento durante esta fase, estos resultados contrastan con estudios que atribuyen las diferencias en PG principalmente a variaciones en la tasa (Borrás y Otegui, 2001, Borrás *et al.*, 2003). En este caso, el hecho de que la duración haya sido la variable más asociada a PG sugiere que, en las condiciones evaluadas, la estrategia de este híbrido radica en sostener el llenado activo por más tiempo (Amas *et al.*, 2022; Chazarreta *et al.*, 2021), más que en incrementar la tasa de acumulación de materia seca.

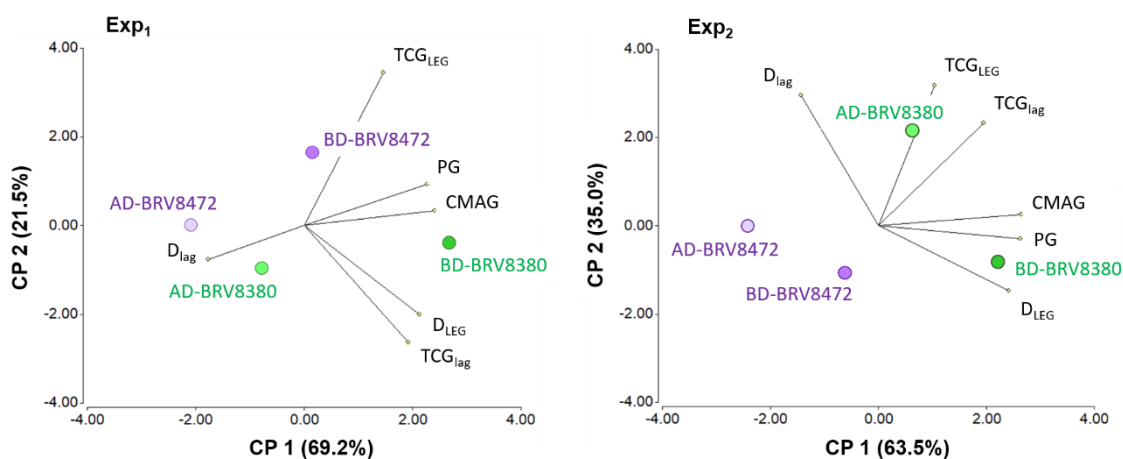


Figura 3. Biplot del análisis de componentes principales (PCA) basado en las variables CMAG, TCG_{lag}, D_{lag}, TCG_{LEG}, D_{LEG}, y PG, para el Exp₁ (izquierda) y Exp₂ (derecha). Las flechas representan las variables y los puntos corresponden a las combinaciones de híbridos y densidades de plantas evaluadas.

Además, el contenido máximo de agua, estrechamente asociado al PG final en ambos experimentos, es consistente con la idea de que la capacidad de crecimiento del grano establecida tempranamente, durante la fase lag, condiciona en gran medida el PG alcanzable posteriormente (Borrás y Gambín, 2010; Melchiori y Caviglia, 2008). Esto refuerza la relevancia de estudiar los procesos que ocurren en las primeras etapas post-floración para comprender las diferencias genotípicas de PG potencial, más allá de los efectos que puedan darse durante el llenado efectivo de grano.

Conclusiones

El mayor peso de grano (PG) observado en el híbrido BRV8380 y en baja densidad, estuvo explicado principalmente por una mayor duración del llenado efectivo. Esto sugiere que la ventaja de este híbrido radica en mantener activo el llenado por más tiempo. Por lo tanto, en ambientes donde se utilizan bajas densidades de plantas, podría ser de interés orientar estrategias de mejoramiento hacia genotipos y/o prácticas de

manejo orientadas a extender esta fase, lo cual podría impactar en el PG final, y con ello, en el rendimiento.

Referencias bibliográficas

- Amas J. I.; Fernandez J. A.; Curin F.; Cirilo A. G.; Ciampitti I. A.; Otegui M. E. 2022. Maize genetic progress in the central Pampas of Argentina: effects of contrasting sowing dates. *Field Crops Research*, 281, 108492.
- Amas J. I.; Curin F.; D'andrea K. E.; Luque S. F.; Otegui M. E. 2024. Maize breeding effects on grain yield genetic progress and its contribution to global yield gain in Argentina. *Field Crops Research*, 316, 109520.
- Bewley J.D.; Black M. 1985. Seeds: physiology of development and germination. Plenum, New York.
- Borrás L.; Otegui M. E. 2001. Maize kernel weight response to postflowering source–sink ratio. *Crop Science*, 41(6), 1816-1822.
- Borrás L.; Westgate M. E.; Otegui M. E. 2003. Control of kernel weight and kernel water relations by post-flowering source–sink ratio in maize. *Annals of Botany*, 91(7), 857-867.
- 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 Research*, 86(2-3), 131-146.
- Borrás L.; Gambín B. L. 2010. Trait dissection of maize kernel weight: Towards integrating hierarchical scales using a plant growth approach. *Field Crops Research*, 118(1), 1-12.
- Chazarreta Y. D.; Amas J. I.; Otegui M. E. 2021. Kernel filling and desiccation in temperate maize: breeding and environmental effects. *Field Crops Research*, 271, 108243.
- Di Rienzo J.A.; Casanoves F.; Balzarini M.G.; Gonzalez L.; Tablada M.; Robledo C.W. 2011. Infostat version 2011. Centro de Transferencia Infostat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>.
- Early E. B.; McIlrath W. O.; Seif R. D.; Hageman R. H. 1967. Effects of shade applied at different stages of plant development on corn (*Zea mays* L.) production 1. *Crop Science*, 7(2), 151-156.
- Fernández J. A.; Messina C. D.; Salinas A.; Prasad P. V.; Nippert J. B.; Ciampitti I. A. 2022. Kernel weight contribution to yield genetic gain of maize: A global review and US case studies. *Journal of Experimental Botany*, 73(11), 3597-3609.
- Fischer R. A. 1975. Yield potential in a dwarf spring wheat and the effect of shading 1. *Crop Science*, 15(5), 607-613.
- Gambín B. L.; Borrás L.; Otegui M. E. 2007. Kernel water relations and duration of grain filling in maize temperate hybrids. *Field Crops Research*, 101(1), 1-9.
- Jones R. J.; Roessler J.; Ouattar S. 1985. Thermal Environment during endosperm cell division in maize: effects on number of endosperm cells and starch granules 1. *Crop Science*, 25(5), 830-834.
- Muchow R. C. 1990. Effect of high temperature on grain-growth in field-grown maize. *Field Crops Research*, 23(2), 145-158.
- Rattalino Edreira J. I.; Carpici E. B.; Sammarro D.; Otegui M. E. 2011. Heat stress effects around flowering on kernel set of temperate and tropical maize hybrids. *Field Crops Research*, 123(2), 62-73.
- Rattalino Edreira J. I.; Mayer L. I.; Otegui M. E. 2014. Heat stress in temperate and tropical maize hybrids: Kernel growth, water relations and assimilate availability for grain filling. *Field Crops Research*, 166, 162-172.
- Ritchie S. W.; Hanway J. J. 1982. How a corn plant develops. Spec. Rep. No. 48. Iowa State Univ. Coop. Ext. Serv., Ames.
- Saini H. S.; Westgate M. E. 1999. Reproductive development in grain crops during drought in *Advances in agronomy*, 68: 59–96. Ed. DL Sparks.
- Warton D.I.; Duursma R.A.; Falster D.S.; Taskinen S. 2012. GraphPad Software Inc., San Diego CA. www.graphpad.com.