Período crítico para la determinación del rendimiento de espigas subapicales de maíz: efectos del híbrido y la oferta nitrogenada

Batlle B[1]; D'Andrea K[2,3]; Maddonni GA[2,3]; Cedeño G[4]; Iglesias M[1]; Rotili DH[1,5]
1 América Agroinnova, Sarmiento 121, América, Buenos Aires, Argentina. bernardobatlle@gmail.com
2 Cátedra de Cerealicultura, Av. San Martín 4453, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.
3 IFEVA (FAUBA-CONICET), Av. San Martín 4453, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.
4 NK Semillas-Agrosyn América, Ruta 33 km 387, América, Buenos Aires, Argentina.
5 Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de La Pampa, RN 35 km 334, Santa Rosa, La Pampa, Argentina.

Critical period for grain yield determination of sub-apical ears of maize: effects of the hybrid and nitrogen offer

The critical period for subapical ear (E2) yield determination in maize may depend on genotype and nitrogen (N) availability. We evaluated this period in prolific and non-prolific hybrids under low (90 kg N ha^{-1}) and high (230 kg N ha^{-1}) N supply. A split-split-plot experiment combined N supply, hybrid, and nine timings of resource release achieved by thinning crops from 7 to 3.5 plants m^{-2} between emergence and R4, plus an unthinned control. Prolificacy, E2 contribution, and total, apical-ear, and E2 yields per plant were measured. In the non-prolific hybrid, prolificacy remained near one ear $plant^{-1}$ and E2 contribution was consistently low. In the prolific hybrid, vegetative-stage thinnings maintained 1.7–2.0 ears $plant^{-1}$ and E2 contributions of 39–46%, whereas responses declined sharply after flowering. Thinnings through R1 produced E2 yields per plant similar to the low-density control and greater than the high-density control under both N levels. Relative to the low-density control, significant E2 yield reductions began at R1+5 days under low N but at R1+12 days under high N. Thus, E2 yield is determined around flowering and early post-flowering. High N extended the opportunity to exploit resource release through E2 production by approximately one week in the prolific hybrid.

Palabras clave: Prolificidad; Nitrógeno; Raleos; Oferta de recursos
Keywords: Prolificacy; Nitrogen; Thinnings; Resource offering

Introducción

En cultivos de maíz en ambientes con restricciones edáficas al crecimiento radical, los híbridos prolíficos en bajas densidades superaron en rendimiento a los no prolíficos ante igual manejo nutricional (Ross et al., 2020). Esto se debió a un aporte diferencial del rendimiento a partir de las espigas subapicales (E2), sin diferencias en el aporte de espigas apicales (E1). Sin embargo, en ambientes marginales, la fertilización con nitrógeno (N) es escasa debido a la incertidumbre sobre el retorno económico de esta práctica, limitando la expresión de la prolificidad (Parco et al., 2020).

Un aspecto clave por definir es el momento del ciclo en el que la prolificidad responde a cambios en la oferta de recursos por planta ante diferentes escenarios de disponibilidad de N. En cultivos de alta densidad con una espiga por planta, el número de granos por unidad de superficie se define en una ventana crítica de aproximadamente 30 días centrados en la floración femenina (V14 a R2; Ritchie y Hanway, 1982), con mayor

importancia de las dos semanas posteriores a la floración (R1 a R2) (Tollenaar et al., 1992, Otegui y Bonhomme, 1998, Andrade et al., 1999). A través de sombreos intensos de 15 días de duración sin limitaciones de N se evidenció que el período crítico de un híbrido prolífico en baja densidad de siembra fue similar al de uno no prolífico, con un mayor peso del sombreo sobre la expresión de la prolificidad cuando fue aplicado en los 15 días posteriores a la floración (Espelet et al., 2025). Sin embargo, se desconoce si la ventana efectiva para que la determinación del rendimiento de E2 responda a cambios en la oferta de recursos por planta es dependiente del N disponible y/o el genotipo. Existen evidencias de un mayor efecto de las restricciones nitrogenadas sobre el desarrollo temprano de la espiga sub-apical incrementando la asincronía entre espigas y la expresión de la prolificidad, en híbridos con menor tendencia a la expresión de este rasgo (Parco et al., 2022, D'Andrea et al., 2022).

El objetivo de este trabajo fue establecer el período crítico para la definición de la prolificidad y el rendimiento en espigas subapicales en híbridos de maíz definidos previamente como contrastantes en la expresión de la prolificidad en ambientes de baja y alta oferta de N. Para ello se efectuaron raleos secuenciales en cultivos sembrados con alta densidad inicial.

Se hipotetizó que los híbridos más prolíficos son capaces de crecer con baja oferta de recursos por planta hasta etapas más próximas a la floración sin afectar la expresión de la prolificidad, y que una mayor oferta de N prolonga esa ventana de respuesta.

Materiales y Métodos

Se llevó a cabo un experimento en el campo experimental de América Agroinnova, en América, Buenos Aires, durante la campaña 2025-26. El experimentó se sembró el 11 de diciembre sobre un suelo clasificado como Hapludol éntico. A la siembra, el suelo presentaba un contenido de N-Nitrato de 80 kg ha^{-1}. La siembra se realizó con sembradora experimental de 4 cuerpos montados con regulador de profundidad y presión de siembra, con una distancia de 70 cm entre surcos. Se utilizó fertilizante arrancador en todas las parcelas a razón de 90 kg ha^{-1} de fosfato monoamónico (11-52-0) en la línea de siembra. Los cultivos se condujeron en secano.

Los tratamientos consistieron en una combinación factorial de los siguientes factores: (i) oferta nitrogenada (sin agregado de N, N-, y con agregado de N, N+), (ii) híbrido (prolífico y no prolífico) y (iii) momentos del ciclo del cultivo de liberación de recursos por planta, realizado a través de raleos del 50% de la población incluido un control sin raleo. El diseño fue en bloques con parcelas sub-divididas, con la oferta nitrogenada en la parcela principal, el híbrido en la subparcela y el momento de liberación de recursos en la sub-subparcela. Cada tratamiento tuvo 4 repeticiones (bloques). Cada sub-subparcela comprendía 4 surcos de 8 m de largo (22,4 m^2).

Dentro del factor oferta nitrogenada, el tratamiento de agregado de N (N+) consistió en un agregado de urea equivalente a 140 kgN ha^{-1}, al voleo en el estadio V4, el día anterior a una lluvia que incorporó el fertilizante; el N disponible total de suelo + fertilizante del tratamiento N+ fue de 230 kg N ha^{-1}. El tratamiento sin agregado de N (N-) no tuvo ningún agregado de N aparte del contenido en el fertilizante arrancador, llegando a un N disponible total de suelo + fertilizante de 90 kg N ha^{-1}.

Se utilizaron dos híbridos comerciales de maíz de un mismo programa de mejoramiento, clasificados previamente de acuerdo con la expresión de prolificidad en baja densidad en una red experimental multiambiental como prolífico (NK 842 VIP3) y no prolífico (NK 835 VIP3). Los híbridos se sembraron con una densidad objetivo de 7 plantas m^{-2}.

Los diferentes niveles dentro del factor momento de liberación de recursos se generaron a partir de raleos de plantas alternas en cada surco de siembra (i.e. 50% de raleo, quedando luego del raleo con una densidad de 3,5 plantas m^{-2}). Cada sub-subparcela recibió un solo momento de raleo. Se realizaron 9 raleos, en los siguientes días desde la emergencia y estadío del cultivo: 0, VE (control en baja densidad); 27, V8; 41, V11; 48, V14; 56, V17; 64, R1; 69, R1+5d; 76, R1+12d; 95, R4; y un control no raleado en todo el ciclo (control en alta densidad).

El experimento se cosechó cuando todas las parcelas presentaron una humedad promedio del grano inferior al 20%. Se cosecharon todas las espigas en un total de 6 m lineales de los dos surcos centrales de cada parcela (4,2 m^2). Se separaron y contaron las espigas apicales (E1) y subapicales (E2) de cada parcela, sus granos se trillaron y pesaron por separado. La humedad del grano se estimó con humedímetro (Delver, Modelo HD-1021). La prolificidad se estimó como el número de espigas promedio por planta, dividiendo el número total de espigas sobre el número total de plantas. Se estimó el rendimiento del cultivo, rendimiento E1 y rendimiento E2 en base seca (i.e 0% de humedad) en kg ha^{-1}. Como un análisis complementario a la prolificidad, se estimó la contribución de la E2 al rendimiento del cultivo (contribución E2, en %).

El rendimiento total promedio por planta (RPT), el rendimiento promedio de la E1 promedio por planta (RPE1) y el rendimiento promedio de la E2 promedio por planta (RPE2), se estimaron dividiendo el rendimiento del cultivo, el rendimiento E1 y el rendimiento E2, respectivamente, por la densidad. Los valores se expresaron en g $planta^{-1}$.

Para poder evaluar el efecto de la liberación de recursos sobre la generación del rendimiento de las espigas de diferente orden, se dividió el rendimiento del cultivo, rendimiento E1 y rendimiento E2 por la densidad para obtener el rendimiento total promedio por planta (RPT), el rendimiento promedio de la E1 promedio por planta (RPE1) y el rendimiento promedio de la E2 promedio por planta (RPE2) en g $planta^{-1}$. Además, se calculó el RPT, RPE1 y RPE2 relativos al promedio del control en baja densidad dentro de cada combinación de oferta nitrogenada x híbrido.

Para cada tratamiento, se analizó y graficó la evolución de la prolificidad y contribución de E2 al rendimiento del cultivo en función de la cantidad de días en alta densidad. La evolución de RPT, RPE1 y RPE2 como porcentaje del control en baja densidad también se analizaron en función de la cantidad de días en el que el cultivo creció en alta densidad.

Siguiendo la metodología de Cerrudo et al. (2013) para establecer el período crítico para la determinación del rendimiento en cultivos de alta densidad a través de sombreos en intervalos cortos, el período crítico para prolificidad, contribución E2, RPT, RPE1 y RPE2 se determinó a partir de dos evaluaciones complementarias: de acuerdo con la magnitud de la diferencia respecto del control en baja densidad y respecto del control de alta densidad, en g $planta^{-1}$. En ambos casos, se utilizó la prueba de Dunnett como comparación respecto del control (Steel y Torrie, 1960). La diferencia respecto del

control en baja densidad permitió determinar hasta qué momento el cultivo podía permanecer en alta densidad y, luego del raleo, alcanzar valores de prolificidad, contribución E2, RPT, RPE1 y/o RPE2 que no fueran inferiores a los de un cultivo en baja densidad desde la emergencia. La diferencia respecto del control en alta densidad permitió establecer hasta qué momento el raleo todavía generaba valores de prolificidad, contribución E2, RPT, RPE1 y/o RPE2 superiores a los de un cultivo mantenido en alta densidad durante todo el ciclo y, por lo tanto, evaluó la persistencia de la capacidad de respuesta a la liberación de recursos.

Resultados

El rendimiento promedio del ensayo fue de 6908 kg ha^{-1} y las medias de los tratamientos variaron entre 4524 y 9266 kg ha^{-1}. El menor valor correspondió al híbrido prolífico con N− raleado en R4 y el mayor, al mismo híbrido con N+ en alta densidad. En los controles de baja densidad, los rendimientos con N− y N+ fueron, respectivamente, de 8259 y 8546 kg ha^{-1} para el híbrido prolífico, y de 6754 y 7366 kg ha^{-1} para el no prolífico. En alta densidad, los valores correspondientes fueron de 8267 y 9266 kg ha^{-1} para el híbrido prolífico, y de 7914 y 8362 kg ha^{-1} para el no prolífico con N- y N+; respectivamente. La prolificidad y la contribución de E2 al rendimiento del cultivo mostraron respuestas contrastantes entre híbridos a medida que aumentó el tiempo de crecimiento en alta densidad, i.e. demora en la aplicación del raleo (Figura 1). En el híbrido no prolífico, la prolificidad se mantuvo siempre cercana a 1 espiga $planta^{-1}$ y la contribución de E2 fue baja en todos los momentos de raleo. En el híbrido prolífico, la prolificidad se mantuvo elevada en los raleos en estadios vegetativos, con valores cercanos a 1,7–2,0 espigas $planta^{-1}$, y disminuyó drásticamente en los raleos cercanos o posteriores a floración. De manera similar, la contribución de E2 alcanzó valores próximos a 39–46% hasta V17 y disminuyó desde R1+5 en N- y desde R1+12 en N+.

El RPT respondió al momento de raleo dentro de cada combinación de híbrido y oferta nitrogenada (Figura 2). En ambos híbridos y ofertas de N, el control de alta densidad presentó menor RPT que el control de baja densidad, con reducciones del 31 y 37% en el híbrido no prolífico y del 35 y 49% en el prolífico, bajo N+ y N−, respectivamente (P_Dunnett ≤ 0,004). En el híbrido no prolífico, solamente el raleo en R4 difirió significativamente del control de baja densidad (reducciones del 15% bajo N+ y del 18% bajo N−). Por el contrario, en el híbrido prolífico, los raleos realizados hasta R1 no difirieron del control de baja densidad y fueron superiores al control de alta densidad en ambas ofertas nitrogenadas (P_Dunnett < 0,05). Bajo N+, el RPT fue 27% menor que el control de baja densidad en R1+12, aunque esta diferencia no fue significativa, y se redujo significativamente en R4, con una disminución del 34% (P_Dunnett = 0,005). Bajo N−, las reducciones fueron significativas desde R1+5 y variaron entre 34 y 37% (P_Dunnett ≤ 0,008).

El RPE1 presentó variaciones más acotadas que el RPT (Figura 2). En el híbrido no prolífico, el RPE1 del control de alta densidad fue 25% menor que el del control de baja densidad bajo N+ y 33% menor bajo N− (P Dunnett < 0,05). En el híbrido prolífico, el RPE1 no difirió entre controles baja y alta densidad, aunque en este último presentó reducciones del 7% bajo N+ y del 16% bajo N−. El RPE2 mostró el mayor contraste entre híbridos y momentos de raleo. En el híbrido no prolífico, el RPE2 a través de los tratamientos fue bajo en general, con valores entre 0 y 59 g $planta^{-1}$ bajo N+ y entre 2 y

46 g planta^{-1} bajo N−, y nunca difirió de los controles. En el híbrido prolífico, los raleos realizados hasta R1 generaron mayor RPE2 que el control de alta densidad y no difirieron del control de baja densidad en ambas ofertas nitrogenadas (P_Dunnett < 0,05). Respecto del control de baja densidad, bajo N+ el RPE2 se redujo numéricamente un 53% en R1+5 y significativamente un 73% en R1+12 y un 78% en R4 (P_Dunnett ≤ 0,007). Bajo N−, la reducción significativa se registró desde R1+5 y, alcanzó el 81% en R1+5, el 75% en R1+12 y el 80% en R4 (P_Dunnett < 0,002).

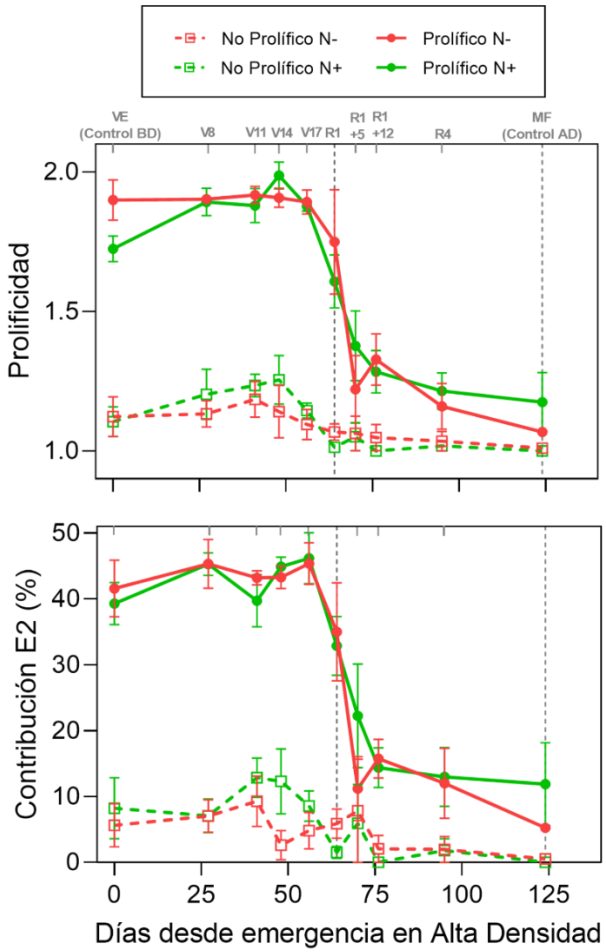

Figura 1. Prolificidad y contribución de la espiga subapical al rendimiento total (contribución E2, %) en función del tiempo de crecimiento del cultivo de maíz en alta densidad antes de la liberación de recursos por raleo. El control de baja densidad corresponde al raleo en VE (0 días en alta densidad), mientras que el control de alta densidad corresponde al tratamiento sin raleo durante todo el ciclo (125 días en alta densidad). Las líneas verticales indican el momento de ocurrencia de la floración (R1) y la madurez fisiológica (todo el ciclo en alta densidad). Los puntos representan medias y las barras, el error estándar de la media.

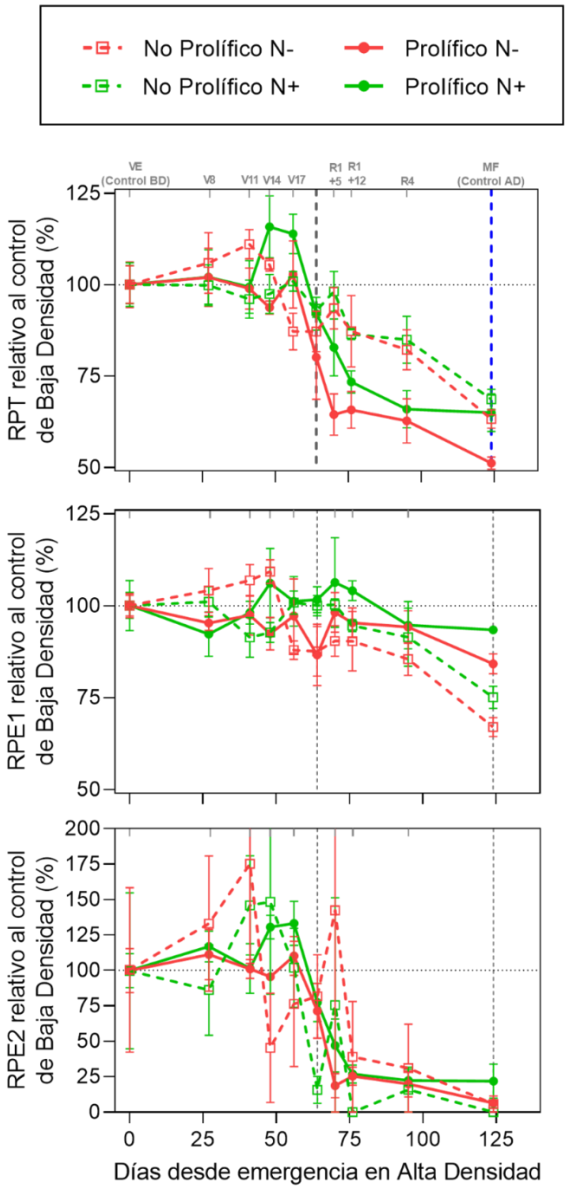

Figura 2. Rendimiento total por planta (RPT), del rendimiento de la espiga apical por planta (RPE1) y del rendimiento de la espiga subapical por planta (RPE2), expresados en forma relativa al control de baja densidad (%), en función del tiempo de crecimiento del cultivo de maíz en alta densidad antes de la liberación de recursos por raleo. El control de baja densidad corresponde al raleo en VE, mientras que el control de alta densidad corresponde al tratamiento sin raleo durante todo el ciclo. Las líneas verticales indican el momento de ocurrencia de la floración (R1) y la madurez fisiológica (todo el ciclo en alta densidad). Los puntos representan medias y las barras, el error estándar de la media.

Discusión y conclusiones

El período crítico para la prolificidad y la contribución de la E2 se pudo cuantificar mediante una metodología original de tratamientos sucesivos de liberación de recursos y de contrastes con controles de alta y baja densidad, resaltando la importancia de la etapa de floración y post-floración temprana. En el híbrido prolífico, la liberación de

recursos mantuvo altos valores de prolificidad, contribución de E2 y RPE2 cuando ocurrió durante el período vegetativo y hasta R1, pero la respuesta cayó con raleos posteriores a floración. El RPE1 y el RPT presentaron una ventana de sensibilidad similar, aunque de menor magnitud relativa que la del RPE2. Esto soporta que el período crítico para la determinación del RPE2 está comprendido dentro del período tradicionalmente considerado crítico para el cultivo de maíz y que la mayor sensibilidad relativa a la restricción en la oferta de recursos se concentra durante la post-floración.

Debido a que el híbrido no prolífico presentó una expresión prácticamente nula de la E2, la prolificidad, la contribución de E2 y el RPE2 no difirieron entre los tratamientos y sus respectivos controles. En consecuencia, no fue posible caracterizar adecuadamente el período crítico asociado con la definición de estos rasgos en este híbrido. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis de que el período crítico para la definición de la prolificidad depende del híbrido, ya que la diferencia observada entre genotipos estuvo asociada con la posibilidad de identificar dicha ventana temporal.La regulación intrínsecamente genotípica de este rasgo determinaría sobre todo su contribución potencial al RPT,aunque no resulta tan claro que determine también la regulación temporal de su respuesta frente a la liberación o restricción de recursos.. No obstante, la tendencia en el híbrido no prolífico fue a que la prolificidad se mantuviera en niveles levemente mayores a 1 espiga planta^{-1} para los tratamientos de liberación de recursos hasta V14, anulándose con raleos posteriores a ese estadio. Por el contrario, el híbrido prolífico expresó mayor capacidad de respuesta a la liberación de recursos, con alta prolificidad y contribución de E2 cuando el aumento en la disponibilidad de recursos por planta ocurrió durante un extenso período prácticamente hasta la floración.

La hipótesis que sostenía que el período crítico para la definición de la prolificidad depende de la oferta nitrogenada no fue rechazada, ya que, en el híbrido prolífico, la oferta nitrogenada generó una ventana de sensibilidad a la liberación de recursos levemente diferente. Con N+, no se encontraron diferencias en RPE2 respecto del control de baja densidad cuando la liberación de recursos se realizó hasta R1+5 d; con N−, esa ventana se restringió hasta R1. Esta respuesta podría estar asociada con diferencias en la disponibilidad de recursos por planta durante el período crítico. Una mayor oferta de N podría haber permitido sostener un mayor crecimiento y, en consecuencia, prolongar la capacidad de fijación de granos en la E1 y E2. Además, se ha propuesto que un mejor estado nitrogenado puede favorecer la eficiencia de fijación de granos, particularmente en la E2 (Parco et al., 2020; Maltese et al., 2021; D'Andrea et al., 2022).Por lo tanto, en híbridos prolíficos sembrados a baja densidad, la ventana de oportunidad para capitalizar una liberación de recursos mediante la contribución al rendimiento de la E2 se restringiría hasta R1 sin fertilización y se extendería aproximadamente una semana con fertilización nitrogenada.

Apoyo financiero

Este proyecto contó con el apoyo específico de NK Semillas y Agrosyn América, junto con el apoyo general de todos los sponsors permanentes de América Agroinnova.

Referencias

Andrade, F. H., Vega, C., Uhart, S., Cirilo, A., Cantarero, M., & Valentinuz, O. (1999). Kernel number determination in maize. *Crop Science, 39*, 453–459.

Cerrudo, A., Di Matteo, J., Fernandez, E., Robles, M., Olmedo Pico, L., & Andrade, F. H. (2013). Yield components of maize as affected by short shading periods and thinning. Crop and Pasture Science, 64(6), 580–587.

D'Andrea, K. E., Parco, M., & Maddonni, G. A. (2022). Maize prolificacy under contrasting plant densities and N supplies: II. Growth per plant, biomass partitioning to apical and sub-apical ears during the critical period and kernel setting. *Field Crops Research, 284*, 108557.

Espelet, F., Rotili, D. H., D'Andrea, K. E., & Maddonni, G. Á. (2025). Critical periods for the expression of vegetative and reproductive plasticity in maize crops. *Field Crops Research, 327*, 109907. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2025.109907

Maltese, N. E., Maddonni, G. A., Melchiori, R. J. M., & Caviglia, O. P. (2021). Plant nitrogen status at flowering and kernel set efficiency in early- and late-sown maize crops. *Field Crops Research, 270*, 108216.

Otegui, M. E., & Bonhomme, R. (1998). Grain yield components in maize: I. Ear growth and kernel set. *Field Crops Research, 56(3)*, 247–256.

Parco, M., Ciampitti, I. A., D'Andrea, K. E., & Maddonni, G. A. (2020). Prolificacy and nitrogen internal efficiency in maize crops. *Field Crops Research, 256*, 107912.

Parco, M., D'Andrea, K. E., & Maddonni, G. A. (2022). Maize prolificacy under contrasting plant densities and N supplies: I. Plant growth, biomass allocation and development of apical and sub-apical ears from floral induction to silking. *Field Crops Research, 284*, 108553.

Ritchie, S. W., & Hanway, J. J. (1982). *How a corn plant develops* (Special Report No. 48). Iowa State University of Science and Technology, Cooperative Extension Service.

Ross, F., Di Matteo, J., & Cerrudo, 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, 247*, 107699.

Steel, R. G. D., & Torrie, J. H. (1960). *Principles and procedures of statistics*. McGraw-Hill.

Tollenaar, M., Dwyer, L. M., & Stewart, D. W. (1992). Ear and kernel formation in maize hybrids representing three decades of grain yield improvement in Ontario. *Crop Science, 32(2),* 432–438.