

EFFECTO DE LA FECHA DE SIEMBRA SOBRE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL GRANO EN LÍNEAS DE MAÍZ Y SUS IMPLICANCIAS PARA EL MEJORAMIENTO GENÉTICO

Lorea RD¹²; Di Martino A¹; Percibaldi M¹²; Aquilano C¹; Rodriguez I²; Chimento S²; Duhagon A².

¹Estación Experimental Agropecuaria Pergamino, INTA, Buenos Aires, Argentina

²Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires, Pergamino, Buenos Aires.

lorea.roberto@inta.gob.ar; dimartino.ana@inta.gob.ar; percibaldi.nora@inta.gob.ar;

aquilano.claudio@inta.gob.ar; igrodriguez@comunidad.unnoba.edu.ar;

santiagochimento26@gmail.com; aduhagon@comunidad.unnoba.edu.ar

EFFECT OF SOWING DATE ON GRAIN CHEMICAL COMPOSITION IN MAIZE INBRED LINES AND ITS IMPLICATIONS FOR GENETIC IMPROVEMENT

Abstract: Grain quality is an increasingly important target in maize breeding due to its nutritional and industrial relevance. This study aimed to characterize grain chemical composition in maize inbred lines, evaluate the effect of sowing date on grain quality traits, and estimate genetic parameters associated with these characteristics. A total of 146 inbred lines from the INTA Pergamino breeding program were evaluated under early and late sowing dates during 2024/25 in Pergamino. Grain protein, starch, and oil contents were determined using NIRS and NMR. Analysis of variance revealed significant genotype effects for all traits, as well as significant genotype×environment interactions. Sowing date significantly affected starch and oil contents, with higher values observed under early sowing, whereas protein content was not significantly affected. A strong negative genetic correlation was detected between protein and starch content, indicating a physiological trade-off between both traits. Flint-type lines showed higher protein and oil contents and lower starch content than dent-type lines. Broad-sense heritability estimates were high for oil content ($H^2 = 0.97$), moderate-to-high for protein ($H^2 = 0.61$), and moderate for starch ($H^2 = 0.45$). The evaluated germplasm exhibited substantial genetic variability and represents a valuable resource for developing maize hybrids with enhanced grain quality.

Palabras clave: maíz; líneas endocriadas; calidad de grano; fecha de siembra; heredabilidad.

Keywords: maize; inbred lines; grain quality; sowing date; heritability.

Introducción

El maíz (*Zea mays* L.) constituye uno de los cultivos más importantes a nivel global y nacional, desempeñando un papel central en los sistemas productivos agrícolas, la alimentación animal y humana, y diversas cadenas agroindustriales.

Una de las características distintivas del sistema productivo argentino es la amplia ventana de siembra del maíz, que incluye tanto fechas tempranas como tardías. Esta estrategia permite diversificar riesgos productivos y optimizar el uso de recursos, pero a su vez determina que el período crítico y, especialmente, el de llenado de granos ocurra bajo condiciones ambientales contrastantes. Las variaciones en temperatura, disponibilidad hídrica y radiación durante el período de llenado afectan los procesos

fisiológicos responsables de la acumulación de compuestos en el grano (Borrás, 2001; Hannah, 2008). En este sentido, diversos estudios han demostrado que factores ambientales y de manejo, como la fecha de siembra, la disponibilidad de nitrógeno y el estrés hídrico o térmico, influyen en la composición química del grano de maíz, modificando los contenidos de proteína, almidón y aceite (Correndo, 2021; Jahangirlou, 2021). Asimismo, condiciones de estrés durante el llenado pueden alterar los procesos bioquímicos asociados a la síntesis y acumulación de estos compuestos, afectando directamente la calidad del grano (Yang, 2018).

Desde el punto de vista de uso y calidad, la composición química del grano es un aspecto clave que determina su valor nutricional e industrial. El almidón representa aproximadamente el 70% del peso del grano y constituye la principal fuente de energía, siendo fundamental para la producción de alimentos balanceados y bioetanol. Por su parte, la proteína es un componente esencial para la nutrición animal y humana, mientras que el aceite aporta valor energético y es relevante para la industria alimentaria y de bioproductos (Roodt, 2022).

En el contexto del mejoramiento genético, la calidad del grano ha adquirido creciente relevancia como objetivo complementario al rendimiento. La caracterización de líneas endogámicas en términos de composición química constituye una etapa fundamental en programas de mejoramiento orientados al desarrollo de híbridos con calidad diferencial. Asimismo, los caracteres asociados a la calidad del grano, como el contenido de proteína, almidón y aceite, presentan una base genética compleja, con variación cuantitativa y efectos significativos del ambiente y de la interacción genotipo × ambiente (Ndlovu, 2024). Estudios previos han reportado niveles moderados a altos de heredabilidad para estos caracteres, lo que evidencia su potencial de mejora mediante selección (Amegbor, 2022). Por lo tanto, el análisis conjunto de la variabilidad fenotípica y de los factores que la determinan resulta clave para el diseño de estrategias de mejoramiento eficientes.

El presente trabajo tuvo como objetivo caracterizar un conjunto de líneas de maíz pertenecientes al programa de mejoramiento de INTA Pergamino en función de la composición química del grano (contenido de proteína, almidón y aceite). Asimismo, se buscó evaluar el efecto de la fecha de siembra sobre dichos componentes, considerando ambientes contrastantes durante el período de llenado de grano, y estimar parámetros genéticos, en particular la heredabilidad, asociados a estos caracteres con el fin de aportar información relevante para su utilización en programas de mejoramiento.

Materiales y métodos

Material vegetal y condiciones experimentales: se evaluaron 146 líneas de maíz (**GENOTIPO**) pertenecientes al programa de mejoramiento de INTA Pergamino, las cuales representan distintos orígenes genéticos y tipo de grano. Se realizaron dos experimentos correspondientes a diferentes fechas de siembra (**F_SIEMBRA**): 10 de octubre (siembra temprana) y 14 de diciembre (siembra tardía) durante la campaña 2024/2025 en la Estación Experimental Agropecuaria INTA Pergamino. Se utilizó un diseño experimental en alfa-látice con dos repeticiones. Cada unidad experimental consistió en parcelas de dos surcos de 5 m de largo distanciados a 0,7 m. Los cultivos se condujeron bajo sistema de siembra directa, realizándose el control de malezas y la fertilización de acuerdo con las prácticas agronómicas convencionales.

Muestreo y determinaciones: a la cosecha se recolectaron tres espigas correspondientes a plantas representativas de cada parcela, se desgranaron y el material obtenido fue acondicionado para su posterior análisis químico. Las variables evaluadas fueron: el tipo de grano (**TG**) clasificado visualmente como dentado, semidentado o vítreo (flint); el contenido de aceite (**AC**) en porcentaje, determinado mediante Resonancia Magnética Nuclear (RMN) en un equipo Oxford Instruments MQC (Organización Internacional de Normalización 10565, 1998); y los contenidos de proteína (**PROT**) y almidón (**ALMI**) que fueron determinados en el Laboratorio de Calidad de Alimentos, Suelos y Agua de la EEA INTA Pergamino mediante espectroscopia en el infrarrojo cercano (NIRS) en un equipo Perkin Elmer (Modelo Spectrum One) por transformada de Fourier (FT_NIRS).

Análisis estadístico: se verificaron los supuestos de normalidad para AC, PROT y ALMI, comprobándose una distribución normal. Luego se realizó un ANOVA para cada una de las variables, considerando los efectos de GENOTIPO, F_SIEMBRA y su interacción. Se realizaron comparación de las medias a partir del test LSD de Fisher. Se estimaron las correlaciones entre variables mediante coeficientes de Pearson a partir de los valores BLUPs (Best Linear Unbiased Predictors) de los genotipos obtenidos a partir de un Modelo Lineal Mixto, lo que permitió obtener estimaciones de asociaciones de tipo genético entre los caracteres evaluados. A partir de la esperanza de los Cuadrados Medios obtenidos del ANOVA se estimó la heredabilidad de las características evaluadas, con el objetivo de cuantificar la proporción de la variación fenotípica atribuible a efectos genéticos. Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software InfoStat (Di Rienzo, 2021).

Resultados

El análisis de varianza evidenció efectos significativos del GENOTIPO para las tres variables (Tabla 1). La F_SIEMBRA mostró un efecto significativo sobre ALMI y AC, mientras que no se detectaron diferencias significativas para PROT. La presencia de una interacción significativa para todas las variables sugiere una respuesta diferencial de los genotipos según la fecha de siembra, justificando el análisis de los datos de manera independiente para cada ambiente.

Tabla 1: Análisis de variancia para el contenido de proteínas, almidón y aceite en líneas evaluadas en fechas de siembra temprana y tardía en Pergamino durante la campaña 2024/25.

	CM F_SIEMBRA	CM GENOTIPO	CM INTERACCION	R ²	CV	MAX	MIN	DS
PROT	0,0000077 ns	0,00063 **	0,00025 **	0,84	7,79	20,5	9,30	1,74
ALMI	0,01000 **	0,00100 **	0,00046 **	0,80	2,74	64,6	50,30	2,34
AC	0,0033 **	0,00015 **	0,00002 **	0,93	6,64	7,06	2,54	0,03

CM: cuadrado medio; R²: coeficiente de determinación; CV: coeficiente de variación; MAX: valor máximo; MIN: valor mínimo; DS: desvío estándar; ** (p<0,01); ns (p>0,05)

El análisis de la variabilidad dentro de cada fecha de siembra evidenció una amplia dispersión en los valores de las tres variables evaluadas, reflejando la diversidad presente en el germoplasma analizado (figura 1).



50 AÑOS
PENSANDO
EL FUTURO

XIII
CONGRESO
NACIONAL
DE MAÍZ

El análisis del efecto de la F_SIEMBRA permitió identificar respuestas diferenciales según la variable considerada (figura 2). Para PROT no se observaron diferencias significativas entre F_SIEMBRA. No obstante, se detectaron cambios en el ranking de los genotipos entre ambientes, lo que evidencia la presencia de interacción genotipo $\times$ ambiente. En el caso de ALMI, la siembra temprana presentó valores significativamente superiores en comparación con la siembra tardía. De manera similar, el AC fue mayor en la fecha de siembra temprana respecto de la tardía.

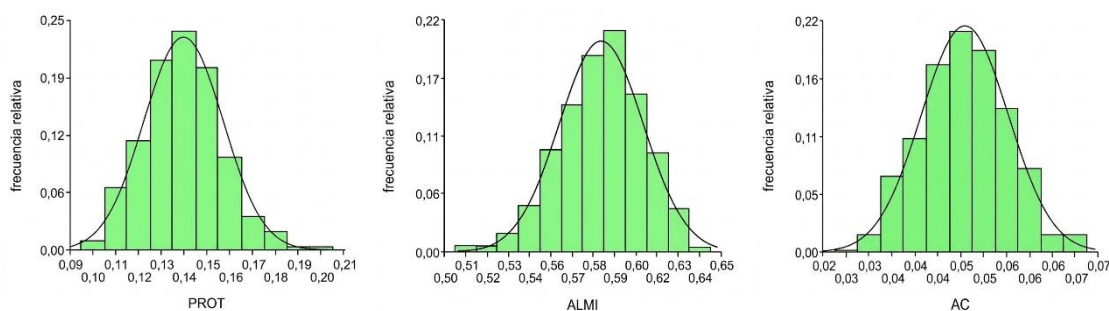


Figura 1: Histograma del contenido de proteínas, almidón y aceite en líneas evaluadas en diferentes fechas de siembra en Pergamino durante 2024/25 (en frecuencia).

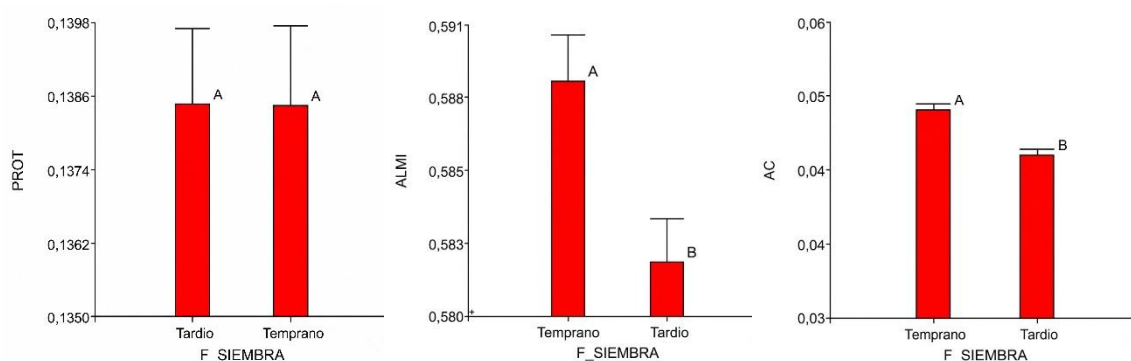


Figura 2: Comparación de medias del contenido de proteínas, almidón y aceite en líneas evaluadas en diferentes fechas de siembra en Pergamino durante la campaña 2024/25. Letras diferentes indican diferencias significativas ($\alpha=0,05$).

El análisis de correlaciones de Pearson mostró patrones consistentes tanto en el análisis conjunto como al considerar cada fecha de siembra por separado. Encontrando una correlación genética alta negativa significativa entre PROT y ALMI ($r \approx -1$). No se detectaron correlaciones consistentes entre AC y las demás variables evaluadas.

El análisis de las variables en función del TG evidenció diferencias en la composición química entre grupos, aunque de magnitud moderada (figura 3). Para el contenido de proteína, las líneas tipo flint ($n=87$) presentaron los valores promedio más elevados (14,08%), seguidas por las líneas semidentadas ($n=43$; 13,63%) y las dentadas ($n=16$; 13,23%). En contraste, el contenido de almidón mostró un comportamiento inverso, con valores más bajos en materiales tipo flint y mayores en los tipos dentados, alcanzando estos últimos un promedio de 58,96%. En cuanto al contenido de aceite, los valores promedio más altos también se registraron en las líneas tipo flint (5,07%),



50 AÑOS
PENSANDO
EL FUTURO

XIII
CONGRESO
NACIONAL
DE MAÍZ

seguidas por las semidentadas (4,65%) y las dentadas (4,42%). En conjunto, estos resultados indican que el TG se asocia con diferencias en la composición química, aunque con superposición entre grupos y sin contrastes marcados.

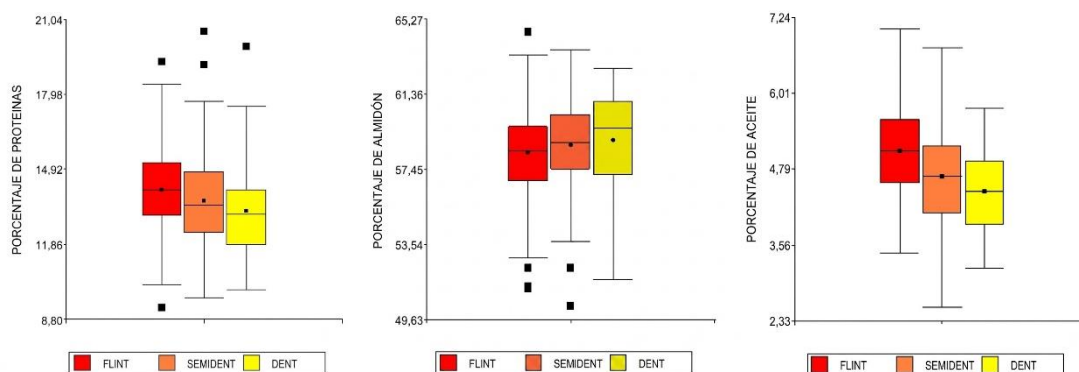


Figura 3: Comportamiento de líneas clasificadas según el tipo de grano para contenido de proteínas, almidón y aceite, evaluadas en diferentes fechas de siembra en Pergamino durante la campaña 2024/25.

La estimación de la heredabilidad evidenció diferencias entre los caracteres evaluados. El AC presentó un valor alto de heredabilidad ($H^2 = 0,97$), indicando que la mayor parte de la variación observada responde a efectos genéticos. De manera similar, el PROT presentó una heredabilidad moderadamente alta ($H^2 = 0,61$), lo que sugiere un importante control genético con cierta influencia ambiental. En contraste, el ALMI arrojó una heredabilidad moderada ($H^2 = 0,45$), con una mayor incidencia de factores ambientales.

Discusión

Los resultados obtenidos evidenciaron una amplia variabilidad fenotípica en la composición química del grano entre las líneas evaluadas. Esta variabilidad constituye un aspecto clave desde el punto de vista del mejoramiento genético, ya que provee la base necesaria para la selección de materiales con características específicas de calidad. La amplitud de rangos observada para contenido de proteína, almidón y aceite sugiere la existencia de diferencias genéticas relevantes que pueden ser explotadas en programas de mejoramiento, en concordancia con estudios previos que destacan la complejidad genética y la variabilidad de estos caracteres en maíz (Ndlovu, 2024).

Al comparar los valores obtenidos en este estudio con aquellos reportados en la bibliografía para maíz comercial, se observa que los rangos encontrados se encuentran dentro —e incluso en algunos casos superan— los valores típicos. En general, el contenido de proteína en maíz oscila entre 8 y 12%, el contenido de aceite entre 3 y 5%, y el almidón representa cerca del 70% del peso del grano (Hannah, 2008). En este trabajo, los valores de proteína ($\approx 9,3$ –20%), almidón (≈ 50 –64,6%) y aceite ($\approx 2,54$ –7,06%) evidencian la presencia de materiales con composiciones extremas, lo cual resulta relevante para el desarrollo de genotipos orientados a usos específicos, tanto nutricionales como industriales.

El desarrollo de híbridos de maíz con 7% de aceite potencia el agregado de valor agroindustrial. En nutrición animal, este mayor extracto etéreo eleva la densidad

calórica del grano, optimizando la eficiencia de conversión alimenticia en dietas avícolas y porcinas sin requerir lípidos exógenos adicionados (FEDNA, 2024). Paralelamente, en la molienda húmeda, un grano con este contenido lipídico incrementa directamente el rendimiento de extracción, maximizando la producción de subproductos de alto valor comercial (FAO, 2023).

La obtención y estabilización biotecnológica de híbridos comerciales de maíz con un contenido de proteína bruta del 20% constituye un cambio de paradigma en la eficiencia de la cadena agroalimentaria global. En el ámbito de la nutrición animal, este perfil hiperproteico podría redefinir la formulación de raciones balanceadas para especies monogástricas y rodeos de recría. Al duplicar la concentración de prótidos respecto al grano convencional, se atenúa significativamente la dependencia de fuentes proteicas externas tales como el pellet de soja, optimizando así la estructura de costos del sector pecuario (MAIZAR, 2024; FAO, 2024).

Por otra parte, se confirmó que las condiciones ambientales durante el período de llenado de grano, moduladas en este caso por la fecha de siembra, influyen significativamente en la composición química del grano. En particular, el contenido de almidón y aceite mostró diferencias entre las fechas de siembra exploradas, con mayores valores en condiciones asociadas a siembras tempranas. Este comportamiento coincide con lo reportado en la literatura, donde se indica que factores como la disponibilidad hídrica, la temperatura y el manejo del cultivo pueden modificar la acumulación de compuestos en el grano (Correndo, 2021; Jahangirlou, 2021). Asimismo, condiciones de estrés térmico durante el llenado afectan los procesos enzimáticos involucrados en la síntesis de almidón y proteínas, generando cambios en la composición final del grano (Yang, 2018). Nuestros resultados demuestran que en fechas tempranas los mayores valores de contenido de almidón y aceite estarían asociados a condiciones más favorables durante el período de llenado (mayor radiación, temperaturas más adecuadas), mientras que en siembras tardías factores como temperaturas más bajas y condiciones hídricas contrastantes habrían limitado la acumulación de estos compuestos. En conjunto, estos resultados ponen de manifiesto el impacto del ambiente de llenado de grano sobre la composición química, particularmente en almidón y aceite.

En relación con el tipo de grano, los resultados evidenciaron que los materiales tipo flint presentaron mayores contenidos de proteína y aceite, y menores contenidos de almidón en comparación con los tipos dentados. Estas diferencias están asociadas a la estructura del endosperma, donde los materiales vítreos presentan una mayor proporción de endosperma duro, lo que influye en la acumulación y distribución de los componentes químicos del grano (Hannah, 2008). No obstante, la superposición observada entre los distintos tipos de grano indica que existen diferencias genéticas dentro de cada grupo, lo que refuerza la importancia de la selección intragrupo en programas de mejoramiento.

La relación negativa observada entre el contenido de proteína y almidón coincide con lo ampliamente reportado en la literatura. Esta asociación se explica por un efecto de dilución y por la competencia entre rutas metabólicas durante el llenado de grano, donde la síntesis de proteínas y almidón comparten recursos limitantes (Correndo, 2021). Este fenómeno representa una limitación fisiológica importante, ya que

incrementos en proteína suelen estar asociados a disminuciones en almidón, lo cual puede afectar tanto el rendimiento como el uso industrial del cultivo.

En cuanto a los parámetros genéticos, los valores de heredabilidad estimados en este estudio fueron consistentes con antecedentes reportados. En particular, el alto valor de heredabilidad para el contenido de aceite y el valor moderadamente alto para proteína indican que estos caracteres están fuertemente controlados por factores genéticos y, por lo tanto, presentan un alto potencial de respuesta a la selección (Amegbor, 2022; Ndlovu, 2024). En contraste, la heredabilidad moderada observada para el contenido de almidón refleja una mayor influencia del ambiente, lo cual es consistente con estudios que destacan la fuerte interacción genotipo $\times$ ambiente en este carácter.

En conjunto, los resultados obtenidos permiten identificar líneas con desempeños sobresalientes para distintos componentes de la calidad del grano, lo cual representa una base sólida para su utilización en programas de mejoramiento. La combinación de alta variabilidad, efectos ambientales significativos y parámetros genéticos favorables resalta el potencial del germoplasma evaluado para el desarrollo de híbridos con calidad diferenciada, adaptados a diferentes condiciones productivas.

Conclusiones

Se detectó una amplia variabilidad fenotípica en la composición química del grano entre las líneas evaluadas, lo que permite identificar genotipos destacados para contenido de proteína, almidón y aceite. Los rangos observados para estas variables incluyeron valores extremos que superaron los típicamente reportados para maíz comercial, evidenciando el potencial del germoplasma evaluado como fuente de variabilidad útil.

La fecha de siembra tuvo un efecto significativo sobre el contenido de almidón y aceite, con mayores valores en condiciones de siembra temprana, mientras que el contenido de proteína no presentó cambios en su valor medio, aunque sí en el ranking de los genotipos. La presencia de interacción genotipo $\times$ ambiente para todas las variables indica que el comportamiento de las líneas depende de las condiciones ambientales, lo cual resalta la importancia de evaluar en múltiples ambientes.

Se confirmó una correlación negativa fuerte entre proteína y almidón, lo que implica una restricción fisiológica relevante a considerar en programas de mejoramiento.

Se observaron diferencias en la composición química asociadas al tipo de grano, con materiales tipo flint presentando mayor contenido de proteína y aceite y menor contenido de almidón en comparación con los dentados, aunque con superposición entre grupos.

Los valores de heredabilidad estimados indicaron que el contenido de aceite (alto) y proteína (moderado-alto) presentan un fuerte control genético, mientras que el almidón mostró mayor influencia ambiental, condicionando su respuesta a la selección.

En conjunto, los resultados permitieron identificar líneas con características sobresalientes para la calidad del grano, las cuales constituyen materiales promisorios para su incorporación en programas de mejoramiento orientados a objetivos específicos de calidad.

Apoyo Financiero

La presente investigación se desarrolló en el marco del proyecto SIB 5894/2024 de la UNNOBA y contó además con apoyo financiero de INTA a través del CVT INTA Semilleros.

Referencias bibliográficas

- Amegbor, I. K.; van Biljon, A.; Shargie, N.; Tarekegne, A.; y Labuschagne, M. T. (2022). Heritability and associations among grain yield and quality traits in quality protein maize (QPM) and non-QPM hybrids. *Plants*, 11(6), 713. <https://doi.org/10.3390/plants11060713>
- Asociación Maíz y Sorgo Argentino (MAIZAR). (2024). Maíz y Nutrición: El impacto de los granos especiales en la conversión alimenticia avícola y porcina. Buenos Aires, Argentina.
- Borrás, L.; y Otegui, M. E. (2001). Maize kernel weight response to postflowering source-sink ratio. *Crop Science*, 41(6), 1816-1822. <https://doi.org/10.2135/cropsci2001.1816>
- Correndo, A. A.; Fernandez, J. A.; Vara Prasad, P. V.; y Ciampitti, I. A. (2021). Do water and nitrogen management practices impact grain quality in maize? *Agronomy*, 11(9), 1851. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091851>
- Di Rienzo, J. A.; Casanoves, F.; Balzarini, M. G.; González, L.; Tablada, M.; y Robledo, C. W. (2021). Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. 2018. InfoStat, versión.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2024). Protein enhancement in cereal crops: Commercial dynamics and global feed industry formulations. Roma, Italia.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2023). Industrial processing and utilization of specialty maize and wet milling by-products. Rome, Italy.
- Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal (FEDNA). (2024). Maíz rico en aceite: Composición nutricional y eficiencia en la formulación de raciones isoenergéticas. Madrid, España.
- Hannah, L. C.; y James, M. (2008). The complexities of starch biosynthesis in cereal endosperms. *Current Opinion in Biotechnology*, 19(2), 160-165. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2008.02.002>
- Jahangirlou, M. R.; Akbari, G. A.; Alahdadi, I.; Soufizadeh, S.; y Parsons, D. (2021). Grain quality of maize cultivars as a function of planting dates, irrigation and nitrogen stress: A case study from semiarid conditions of Iran. *Agriculture*, 11(1), 11.
- Ndlovu, N.; Kachapur, R. M.; Beyene, Y.; Das, B.; Ogugo, V.; Makumbi, D.; Spillane, C.; McKeown, P. C.; Prasanna, B. M.; y Gowda, M. (2024). Linkage mapping and genomic prediction of grain quality traits in tropical maize (*Zea mays* L.). *Frontiers in Genetics*, 15, 1353289. <https://doi.org/10.3389/fgene.2024.1353289>
- Organización Internacional de Normalización 10565. (1998). Oleaginosas comerciales, determinación simultánea de los contenidos de aceite y agua.
- Roodt, D. (2022). Multi-omics approach highlights new targets for amino acid composition change in maize kernels. *Plant Physiology*. Volume 188, Issue 1 Pages 22–23. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiab466>
- Yang, H.; Gu, X.; y Ding, M. (2018). Heat stress during grain filling affects activities of enzymes involved in grain protein and starch synthesis in waxy maize. *Sci Rep* 8, 15665. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33644-z>