

El metaboloma del maíz: claves para su mejora y producción sostenible

Juan José Romero Tovar^{1*} y Jorge Vargas Almaraz¹

¹ Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro

* Dirección para correspondencia: jromero40@alumnos.uaq.mx

El maíz (*Zea mays*) es uno de los cultivos alimentarios más importantes a nivel mundial, fundamental para la alimentación humana al aportar energía y nutrientes vitales, así como para la elaboración de diversos productos industriales como los biocombustibles. Durante siglos, su mejora se ha logrado mediante la selección genética tradicional: los agricultores elegían, generación tras generación, las plantas con los mejores granos, lo que dio origen a las diversas variedades que conocemos actualmente. Sin embargo, investigaciones recientes exploran una nueva frontera en este campo: el estudio del metaboloma del maíz, es decir, del conjunto completo de metabolitos (moléculas pequeñas) regulados a nivel genético, cuyo perfil es dinámico y depende tanto de las condiciones ambientales como de la etapa de desarrollo de la planta. Esto es clave para optimizar su sabor, valor nutricional y resistencia a múltiples factores que amenazan su cultivo. Además del metaboloma, otras disciplinas como la transcriptómica (el análisis de ARN) y la proteómica (el estudio de las proteínas), integradas mediante enfoques multi-ómicos, están revolucionando nuestra comprensión del maíz y abren nuevas posibilidades para mejorar este cultivo.

La domesticación del maíz

Nuestra historia con el maíz comenzó hace aproximadamente 9,000 años en el corazón del valle de Tehuacán, en el centro de México. Los primeros agricultores comenzaron transformando lentamente el “teocintle”, una gramínea silvestre de aspecto simple y pequeños granos, hasta desarrollar el maíz moderno que hoy conocemos, resultado de una selección genética milenaria impulsada por la curiosidad, la necesidad humana y su adaptación a distintos entornos. Los cambios morfológicos fueron realmente asombrosos: de espigas pequeñas con pocas semillas, pasamos a grandes mazorcas con cientos de granos expuestos y fáciles de cosechar. A nivel genético, la domesticación implicó la selección de mutaciones en genes clave responsables de características como el tamaño de la mazorca, la textura del grano y la arquitectura general de la planta. Gracias a esta transformación, el maíz se expandió gradualmente por el continente americano, desde los Andes hasta Norteamérica, adaptándose a una amplia variedad de climas y regiones, antes de extenderse al resto del mundo (Kennett *et al.*, 2017).

El valor nutricional del maíz

El maíz es conocido por ser una excelente fuente de macronutrientes esenciales como carbohidratos complejos (principalmente almidón), fibra dietética y proteínas, además de micronutrientes vitales como vitaminas del grupo B (especialmente

niacina y tiamina), vitamina A (en sus variedades amarillas) y minerales como fósforo, magnesio y zinc. Por otra parte, el maíz produce metabolitos especializados que no solo contribuyen al valor nutricional, sino que pueden considerarse biomarcadores de la calidad del grano. Por ejemplo, los compuestos fenólicos, y de manera muy importante los flavonoides, actúan como potentes antioxidantes y son responsables de los colores en las variedades de maíz azul y rojo (Sánchez-Nuño *et al.*, 2024). Los carotenoides (como la zeaxantina y la luteína) presentes en el maíz amarillo se correlacionan con la resistencia a ciertos patógenos, y los lípidos de tipo ácidos grasos insaturados contribuyen a una alimentación equilibrada. En conjunto, estos compuestos no solo definen el sabor, color y apariencia del maíz, sino que poseen propiedades nutraceuticas que pueden ayudar a prevenir diversas enfermedades (Figura 1).

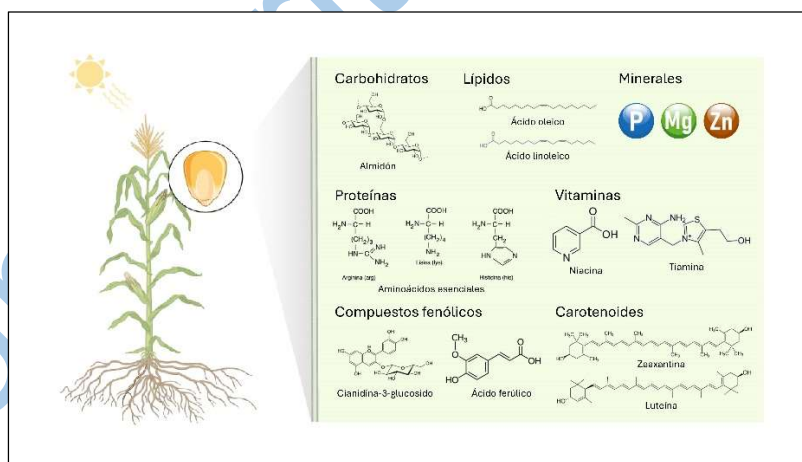


Figura 1. Esquema del maíz y su composición química. Principales clases de metabolitos y nutrientes: carbohidratos (almidón), lípidos (ácidos oleico y linoleico), proteínas, aminoácidos esenciales (arginina, lisina, histidina), vitaminas (niacina y tiamina); minerales: fósforo (P), magnesio (Mg) y zinc (Zn); compuestos fenólicos (cianidina-3-glucósido y ácido ferúlico) y carotenoides (zeaxantina y luteína). Elaborada en BioRender.

Ciencias ómicas: la lupa molecular en el estudio del maíz

Para entender a fondo cómo funciona el maíz, desde su crecimiento hasta su respuesta frente a condiciones de estrés ambiental, los científicos recurren a un enfoque integrador llamado “multi-ómicas”. Esta estrategia combina distintas disciplinas de la biología molecular, como la transcriptómica, la proteómica y la metabolómica, lo que permite obtener una visión mucho más completa, precisa y profunda de los procesos biológicos que ocurren dentro de la planta (Figura 2).

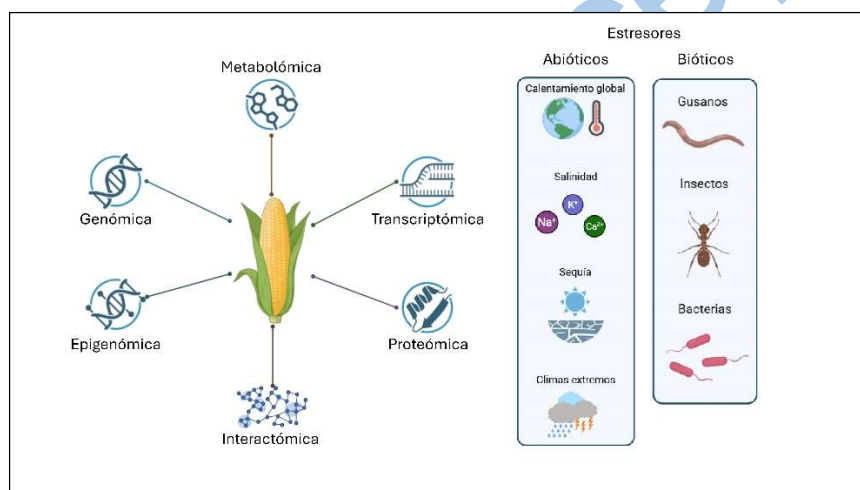


Figura 2. Integración de ciencias ómicas y estresores en maíz. La figura ilustra cómo las diversas disciplinas ómicas pueden ser utilizadas para comprender la respuesta del maíz a estresores abióticos y bióticos. Elaborada en BioRender.

La transcriptómica es la ciencia que aborda el estudio de todas las moléculas de ARN que se generan a partir de la expresión genética, tales moléculas actúan como "instrucciones" que le indican a la célula qué proteínas producir con base en los estímulos de su entorno. En el caso del gen *ZmbHLH137*, asociado al vigor

híbrido o heterosis, se ha demostrado que mejora la tolerancia a la sequía en plántulas de maíz y, por tanto, constituye un blanco molecular que los investigadores pueden sobreexpresar experimentalmente para mejorar el rendimiento de los cultivos (Cao *et al.*, 2025).

Por su parte, la proteómica estudia el conjunto de las proteínas, principales responsables de ejecutar las funciones celulares y sintetizar los metabolitos especializados. Investigaciones recientes han evaluado cómo cambian las proteínas del maíz cuando se cultiva en ambientes con altas concentraciones de dióxido de carbono, simulando escenarios relacionados con el cambio climático. Este análisis crítico permite argumentar que la integración de la metabolómica y la proteómica no es solo descriptiva, sino predictiva: identifica rutas metabólicas críticas que podrían manipularse para desarrollar variedades de maíz más productivas y resistentes frente a los desafíos de un futuro más adverso (Maurya *et al.*, 2020).

Aplicación de la metabolómica en el maíz

Actualmente se han identificado más de 3,000 metabolitos en distintas variedades de maíz comestible (Li *et al.*, 2025). Este avance ha permitido reconocer rutas metabólicas esenciales que definen los perfiles metabolómicos en distintas variedades y condiciones ambientales. Un ejemplo de ello se observa en el maíz dulce y ceroso, cuyo proceso de domesticación redujo el contenido de flavonoides.

Este fenómeno es consecuencia de una menor expresión de genes que codifican enzimas clave en las rutas biosintéticas de compuestos fenólicos. Este caso evidencia la relación directa entre los distintos niveles ómicos que determinan el fenotipo de una variedad.

La integración de la metabolómica con disciplinas como la transcriptómica permite identificar los mecanismos moleculares que confieren al maíz su tolerancia a la salinidad del suelo. Este enfoque multidisciplinario revela de forma precisa cómo la planta ajusta su metabolismo y su expresión genética para adaptarse al estrés abiótico. (Ren *et al.*, 2025). Incluso la interacción del maíz con sus “enemigos” naturales ha sido estudiada desde este enfoque. Por ejemplo, la aplicación de carbón vegetal puede alterar el metabolismo de la planta y fortalecer sus defensas químicas contra plagas como el gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*). Estas estrategias aplicadas por los agricultores promueven un manejo más sostenible que ayuda a proteger los cultivos sin depender exclusivamente de pesticidas (He *et al.*, 2024).

Ingeniería genética del maíz: herramientas clave

Para desarrollar maíz genéticamente modificado (GM), se utilizan diversas herramientas biotecnológicas que permiten introducir o modificar genes de manera precisa. Entre ellas destacan la transformación mediada por *Agrobacterium*, que utiliza bacterias para transferir ADN a las células vegetales, y la biolística, que

introduce genes directamente usando micropartículas recubiertas de ADN. Además, se emplean técnicas avanzadas de edición genómica como CRISPR/Cas9, que permiten modificar o silenciar genes específicos sin necesidad de insertar ADN externo de forma permanente (Basso *et al.*, 2020).

Por otra parte, herramientas avanzadas como los estudios de asociación genómica permiten identificar regiones del ADN asociadas con la acumulación de metabolitos especializados que determinan sus propiedades. Por ejemplo, se han localizado genes que controlan el contenido de almidón, azúcares asociados con el sabor dulce y pigmentos responsables del color.

Implicaciones económicas y sociales

Cuando hablamos de la modificación genética del maíz, es inevitable tocar un tema de gran debate mundial: los organismos genéticamente modificados (OGM). En marzo de 2025, México emitió un decreto presidencial de aplicación administrativa, que no modifica la constitución, pero establece lineamientos para la sustitución gradual del maíz genéticamente modificado en su territorio. Esta decisión busca en principio salvaguardar la gran diversidad de maíces nativos, garantizar la soberanía alimentaria y proteger la salud de la población (Gobierno de México, 2025). Esta medida impacta directamente la siembra de maíz GM en México, pero la situación sobre su importación y consumo sigue siendo un punto de discusión en el comercio internacional.

El maíz GM ofrece ventajas notables, como mayor rendimiento por hectárea y resistencia específica a plagas, gracias a que expresa la toxina Cry1Ab de *Bacillus thuringiensis* (Bt), lo que disminuye el uso de insecticidas y reduce los costos para el agricultor (García *et al.*, 2023). Existen también variedades tolerantes a herbicidas, que facilitan el control de malezas. Sin embargo, estos beneficios no están exentos de limitaciones. Desde el punto de vista ecológico, el cultivo intensivo de maíz GM puede reducir la biodiversidad y favorecer la aparición de “supermalezas” y “superplagas” resistentes, desencadenando un ciclo interminable de acción y reacción.

Más allá de lo agronómico, el análisis crítico revela riesgos socioeconómicos importantes: las semillas patentadas en manos de pocas corporaciones centralizan el poder sobre la producción de alimentos, elevan los costos de los insumos y amenazan la soberanía de pequeños agricultores. Además, persiste un debate sobre los posibles efectos a largo plazo en la salud y el medio ambiente, aunque la evidencia científica disponible respalda mayoritariamente su seguridad alimentaria. En resumen, el maíz GM es una herramienta tecnológica cuya implementación requiere considerar aspectos tanto biotecnológicos como socioeconómicos.

Sistemas de cultivo sostenibles: del laboratorio al campo

Nuevos enfoques como la agricultura regenerativa y la agroecología están ganando terreno al proponer prácticas que no solo mantienen, sino que mejoran la salud del

suelo, fomentan la biodiversidad y reducen la dependencia de fertilizantes y pesticidas químicos. Entre estas prácticas destacan la rotación de cultivos, la siembra directa y el uso de abonos orgánicos, con el objetivo de trabajar en armonía con la naturaleza.

Por otro lado, la revolución tecnológica también está transformando el campo. El concepto de “maíz 4.0” refleja la integración de la agricultura con tecnologías de última generación como sensores instalados en los cultivos, redes conectadas a través del internet de las cosas (IoT) y el análisis de grandes volúmenes de datos (“big data”) permiten aplicar una agricultura de precisión. Esto con la intención de generar sistemas más eficientes para el riego, la fertilización y el control de plagas a través de decisiones informadas que reduzcan el desperdicio y el impacto ambiental.

El conocimiento del metaboloma del maíz significa una comprensión profunda de los procesos bioquímicos, lo que permite generar programas de selección asistida por biomarcadores en la implementación de estrategias de edición genética dirigida. No obstante, los avances en biotecnología vegetal también implican dilemas éticos, sociales y ambientales que deben someterse a una reflexión crítica. La manipulación genética plantea debates sobre propiedad intelectual, biodiversidad y equidad en el acceso a la tecnología. Los nuevos enfoques, que unen tecnología, ecología y ciencia, están impulsando un cambio en el cultivo del maíz para alimentar al mundo de forma más inteligente, eficiente y sostenible.

Agradecimiento

Agradecemos a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por las becas otorgadas a los autores (CVUs 1347682 y 1236146).

Nota

Para la preparación de este trabajo, los autores emplearon DeepSeek V3.1 con el fin de mejorar la legibilidad y el lenguaje del manuscrito. Posteriormente, los autores revisaron y editaron el texto según fue necesario, asumiendo toda la responsabilidad por el contenido del artículo publicado.

Referencias

Basso MF, Arraes FBM, Grossi-de-Sa MF *et al.* (2020). Insights into genetic and molecular elements for transgenic crop development. *Frontiers in Plant Science* 11. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00509>.

Cao L, Zhang D, Fahim AM *et al.* (2025). Comprehensive transcriptome analysis provides molecular insights into the heterosis-associated drought tolerance and reveals ZmbHLH137 that promotes drought tolerance in maize seedlings. *Frontiers in Plant Science* 16. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1565650>.

García M, García-Benítez C, Ortego F *et al.* (2023). Monitoring insect resistance to Bt maize in the European Union: update, challenges, and future prospects. *Journal of Economic Entomology* 116(2):275–288. DOI: <https://doi.org/10.1093/jee/toac154>.

Gobierno de México (2025). Decreto por el que se establecen diversas acciones para la sustitución gradual del uso del herbicida glifosato y para la sustitución gradual del maíz genéticamente modificado en la alimentación humana. *Diario Oficial de la Federación*, 17 de febrero.

He T, Chen L, Wu Y *et al.* (2024). Combined metabolome and transcriptome analyses of maize leaves reveal global effect of biochar on mechanisms involved in anti-herbivory to *Spodoptera frugiperda*. *Metabolites* 14(9):498. DOI: <https://doi.org/10.3390/metabo14090498>.

Kennett DJ, Thakar HB, VanDerwarker AM *et al.* (2017). High-precision chronology for Central American maize diversification from El Gigante rockshelter, Honduras. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114(34):9026–9031. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1705052114>.

Li C, Li Z, Lu B *et al.* (2025). Large-scale metabolomic landscape of edible maize reveals convergent changes in metabolite differentiation and facilitates its breeding improvement. *Molecular Plant* 18(4):619–638. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molp.2025.02.007>.

Maurya VK, Gupta SK, Sharma M *et al.* (2020). Proteomic changes may lead to yield alteration in maize under carbon dioxide enriched condition. *3 Biotech* 10(5). DOI: <https://doi.org/10.1007/s13205-020-02189-2>.

Ren S, Bai T, Ma Y *et al.* (2025). Molecular mechanisms underlying salt tolerance in maize: a combined transcriptome and metabolome analysis. *Plants* 14(13):2031. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants14132031>.

Sánchez-Nuño Y A, Zermeno-Ruiz M, Vázquez-Paulino O D *et al.* (2024). Bioactive compounds from pigmented corn (*Zea mays* L.) and their effect on health. *Biomolecules* 14(3):338. DOI: <https://doi.org/10.3390/biom14030338>.