



Microbioma e inteligencia artificial para la sustentabilidad del maíz nativo

Ana Laura Alonso-Nieves¹
Jimena Laris-Ortiz²
José Alfredo Mares-Mora²
Jorge Noé García-Chávez³
Cynthia Paola Rangel-Chávez^{2*}

¹Departamento de Fitomejoramiento, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calz Antonio Narro 1923, Buenavista, C.P. 25315. Saltillo, Coah, México.

²Escuela Nacional de Estudios Superiores de la UNAM, Campus León. Blv. UNAM 2011, Predio El Saucillo y El Potrero, C.P. 37689. León, GTO, México

³Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Irapuato. Carretera Irapuato Silao Km 12.5, Irapuato, C.P. 36821. Irapuato, GTO, México.

*Autor para correspondencia: cynthia.rc@irapuato.tecnm.mx tel. +52 1 462 309 2206

Los microorganismos que habitan en el suelo, cerca o dentro de la raíz de las plantas son conocidos como microbioma. En el maíz, el microbioma favorece su desarrollo, crecimiento, y adaptación a condiciones adversas como la sequía producto del cambio climático. Estos microorganismos son clave para mejorar la salud del suelo y fortalecer la resiliencia de los cultivos, especialmente en el caso de los maíces nativos, que representan una fuente invaluable de diversidad genética y adaptación local. El uso de la inteligencia artificial para analizar la relación entre el microbioma, rendimientos y condiciones ambientales contribuye a la optimización del agua y los nutrientes favoreciendo la agricultura sustentable, particularmente en maíces nativos que podrían ser clave para enfrentar desafíos climáticos futuros.






Introducción

El cambio climático ha provocado un desequilibrio en factores ambientales como la temperatura y las lluvias. El aumento en la temperatura anual y el retraso de las lluvias son los principales factores que impactan el rendimiento de los cultivos. En México, más del 80 % de la superficie de siembra de maíz es de temporal, lo que quiere decir que la producción depende de las lluvias y de la cantidad de agua retenida en el suelo. Se estima que más del 70 % de productores utiliza semillas de maíz nativo. Las poblaciones de maíz nativo han sido seleccionadas y cultivadas por los agricultores durante generaciones; comúnmente están adaptadas a las condiciones ambientales locales en donde se siembran. A nivel genético, son poblaciones heterogéneas, ya que cada individuo que conforma la población es genéticamente diverso. Existen 59 razas de maíz, las cuales se encuentran distribuidas a lo largo del país, que, debido a los distintos ambientes presentes en México, están adaptadas a distintos tipos de suelos, altitudes, precipitaciones, etc.

Los microorganismos del suelo establecen asociaciones con las raíces, favoreciendo su nutrición y resistencia frente a patógenos y factores de estrés ambiental, además, mejoran la salud del suelo. Estos microorganismos benéficos se localizan en distintas zonas del suelo, como la rizósfera y la endosfera. La rizósfera, es la región del suelo influenciada por las raíces de las plantas y es en donde se encuentra la mayor diversidad de microorganismos. El objetivo de este documento es resaltar el papel fundamental del microbioma del suelo en el maíz nativo, considerando su importancia en la adaptación a condiciones ambientales adversas y su potencial para mejorar la productividad agrícola.



Las poblaciones de maíz nativo son una fuente de gran diversidad genética, cada individuo es genéticamente diferente.



El estudio del microbioma de suelos de cultivo no solo aporta una comprensión más profunda de cómo las variedades nativas se adaptan a condiciones extremas, sino que también abre nuevas oportunidades para fortalecer la agricultura sostenible en tiempos de cambio climático (Figura 1). Actualmente, el desarrollo de herramientas como la inteligencia artificial (IA) ha revolucionado la forma de analizar estos sistemas complejos, ya que permite integrar grandes volúmenes de datos sobre microbiomas, condiciones ambientales y rendimientos agrícolas, lo que facilita la identificación de patrones y factores clave que podrían optimizar la producción del maíz, incluso en condiciones desfavorables.

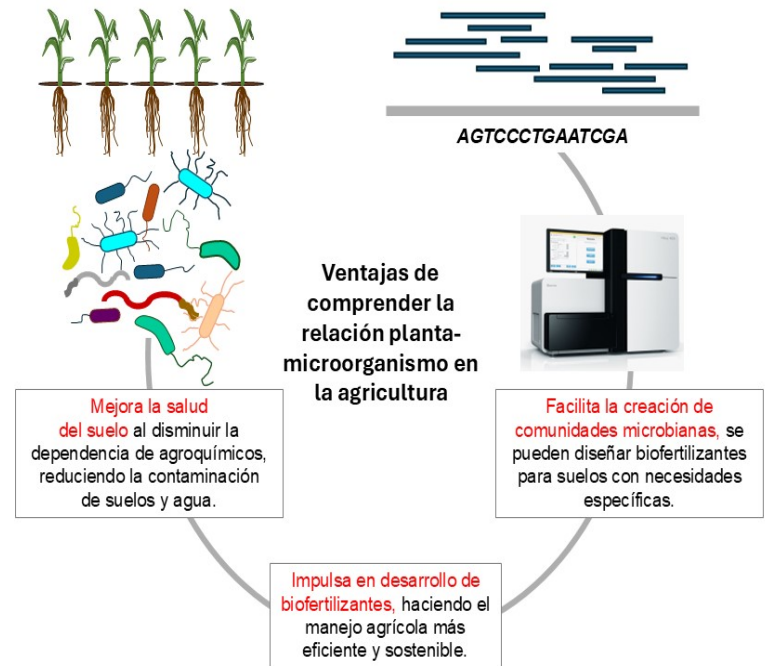


Figura 1. Beneficios y aplicaciones de los estudios del microbioma asociado a las plantas para el desarrollo de estrategias de manejo sustentable para los cultivos.

Importancia de las poblaciones de maíz nativo

El maíz es el cultivo agrícola más importante de México no sólo por el aspecto alimenticio si no por el industrial, político, social y cultural. Las poblaciones nativas de maíz cuentan con una gran diversidad genética que les permite adaptarse a diferentes tipos de ambientes con distintos tipos de suelos, altitudes, precipitaciones, etc. Dichas poblaciones son heterogéneas a nivel genético ya que dentro de una población los individuos cuentan con distintas variantes de genes (alelos), es decir que genéticamente son diferentes. Esta diversidad genética se ve reflejada en las diferentes características morfológicas de las plantas, que van desde la altura, tamaño de las espigas hasta distintos colores del grano en la mazorca (Figura 2).



Las poblaciones nativas de maíz son producto de la selección directa e indirecta realizada generación tras generación por los agricultores, de la selección natural en respuesta a las condiciones ambientales locales, así como al intercambio de semillas entre agricultores. Este proceso ha llevado a la identificación y formación de 59 razas de maíz, las cuales han mostrado distintas características agronómicas sobresalientes.




Figura 2.- Ejemplo de la diversidad morfológica de una población de maíces nativos crecidos en un campo experimental con fines de investigación. La población se realizó mediante cruza de maíces nativos. Se puede observar la diversidad genética entre cada familia y entre familias reflejada en las distintas alturas de las plantas (A), forma, tamaño y color de la mazorca (B-E).

El material nativo cobra relevancia debido a que en la mayoría de la superficie sembrada en condiciones de temporal se utiliza este tipo de materiales. Los maíces nativos, además de ser parte del patrimonio cultural, son el sustento de miles de familias en zonas rurales, por lo que su protección y conservación resulta fundamental.



Se han identificado una serie de ventajas para las variedades locales, entre las que destaca la diversidad genética que les permite responder a las condiciones ambientales que serían desfavorables para cualquier otro material, lo que proporciona mayor garantía en la producción. Por otro lado, los maíces nativos en la alimentación presentan características únicas que las hacen insustituibles para preparar una gran variedad de platillos tradicionales.



La diversidad genética de los maíces nativos se ve reflejada en las diferentes características morfológicas de las plantas, como la altura, tamaño de las espigas hasta distintos colores del grano en la mazorca.

¿De qué está compuesto el microbioma del suelo?

El microbioma del suelo, compuesto por bacterias, hongos, arqueas y otros microorganismos, forma una red bajo la superficie donde interactúa con las raíces de las plantas influyendo en el desarrollo y rendimiento de estas.

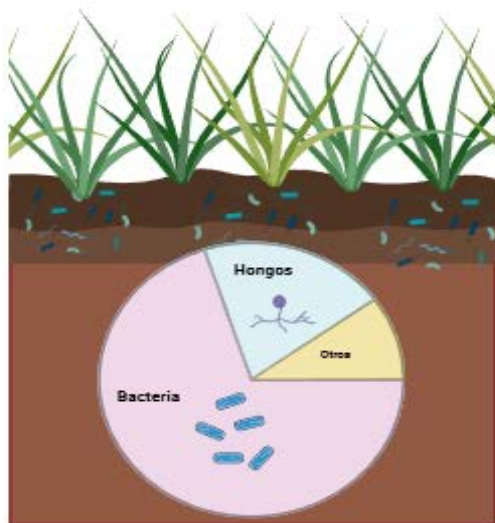


Figura 3. Composición del microbioma en los suelos de cultivo.

Las bacterias conforman más del 70 % de la biomasa del microbioma seguida por alrededor del 20 % de los hongos, y aproximadamente el 10 % de otros.

Aunque algunos microorganismos pueden causar enfermedades en los cultivos, muchos son esenciales para el desarrollo de las plantas, estableciendo diferentes tipos de relaciones biológicas como la simbiosis, el mutualismo y la cooperación.

Las comunidades microbianas del suelo, tiene una gran diversidad y es de las más abundantes de la naturaleza, se compone entre el 70 % y el 90 % por bacterias, seguidas por hongos (Figura 3). Las bacterias promotoras de crecimiento vegetal (PGPR, por sus siglas en inglés) y los hongos micorrízicos arbusculares establecen relaciones simbióticas con las raíces, mejorando la disponibilidad de nutrientes como el fósforo, la tolerancia a la sequía y la resistencia a enfermedades. Las arqueas, aunque menos estudiadas, desempeñan un papel único en suelos extremos, contribuyendo a procesos como la metanogénesis y fijación de nitrógeno, influyendo en la sostenibilidad de los agroecosistemas.



Diversidad microbiana en el suelo y sus beneficios para el maíz nativo

La diversidad microbiana en la rizósfera del maíz es considerablemente mayor en las variedades nativas comparadas con los monocultivos modernos. La comunidad bacteriana en estos sistemas es crucial no solo para la salud general de las plantas, sino también para su capacidad de adaptarse a condiciones ambientales extremas, como las sequías prolongadas. Según estudios realizados en diversas regiones de México, las comunidades bacterianas de la rizósfera en zonas áridas muestran una mayor prevalencia de bacterias resistentes a la sequía, como *Firmicutes* y *Proteobacteria*. Estos microorganismos son capaces de tolerar la escasez de agua y, en muchos casos, facilitan la fijación de nitrógeno, lo que permite al maíz nativo prosperar en suelos con baja fertilidad.

En contraste, las variedades de maíz cultivadas en zonas tropicales, donde el acceso al agua es más constante, exhiben un microbioma diferente, dominada por géneros como *Bacillus* y *Pseudomonas*, conocidos por sus propiedades de promoción del crecimiento vegetal y su capacidad para degradar compuestos orgánicos. Este tipo de adaptaciones microbianas puede mejorar la eficiencia del uso de nutrientes y optimizar el crecimiento de las plantas en condiciones más favorables (Figura 4).

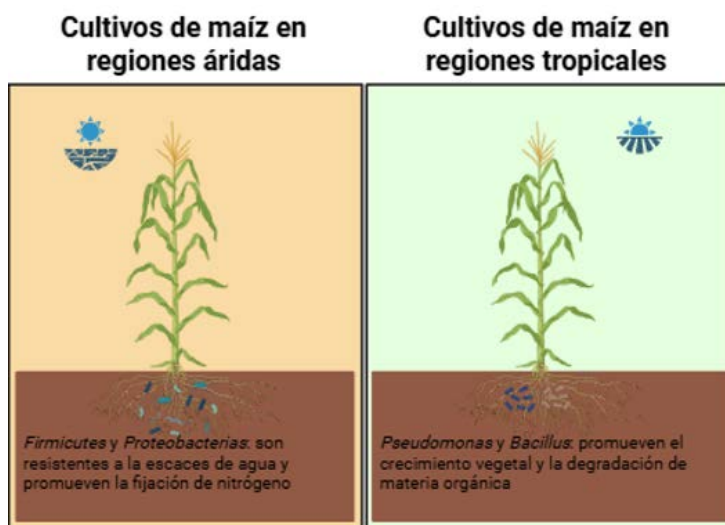



Figura 4. Diferencia en la abundancia de bacterias en relación al ambiente donde se desarrollan los cultivos de maíz.

Estudios recientes también han documentado que la interacción entre los microorganismos y las raíces de maíz afecta directamente la capacidad de la planta para resistir condiciones de estrés. Por ejemplo, la presencia de bacterias del género *Azospirillum* ha sido asociada con una mejor absorción de agua y nutrientes en condiciones de sequía. Este tipo de bacterias también tiene la capacidad de producir señales que estimulan el crecimiento de las raíces, lo que resulta en una mayor capacidad de las plantas para acceder al agua disponible en su entorno.



La rizósfera, es la región del suelo influenciada por las raíces de las plantas y es en dónde se encuentra la mayor diversidad de microorganismos.

Además, un estudio realizado sobre las comunidades bacterianas en la rizósfera de maíz nativo en diferentes regiones de México mostró que las bacterias con capacidad de tolerar condiciones de sequedad, como algunas especies de *Stenotrophomonas*, podrían ser clave para la adaptación del maíz nativo al cambio climático. Finalmente, uno de los ejemplos más sobresalientes en dónde se ha observado el

beneficio y el potencial de los microorganismos asociados a los maíces nativos, es el caso del maíz olotón. El maíz olotón tiene la capacidad de producir un mucílago, en unas raíces especiales llamadas raíces aéreas, en el cual se encontraron bacterias que son capaces de absorber el nitrógeno del aire y usarlo para satisfacer las necesidades del maíz ayudándolos a que puedan crecer en suelos pobres con bajo contenido de nitrógeno. A cambio, en el mucílago que produce el maíz, los microorganismos tienen disponible una gran cantidad de azúcares, los cuáles sirven como *alimento* para que las bacterias, que se encuentran en dichas raíces, continúen con su ciclo de vida.

El uso de la inteligencia artificial en la optimización agrícola

El uso de la IA en la agricultura contribuye al entendimiento de la respuesta al estrés abiótico en los cultivos, al integrar tecnologías para analizar microbiomas, condiciones ambientales y rendimientos en cultivos como el arroz, trigo, cebada, y maíz (Figura 5). Estos estudios han permitido desarrollar modelos predictivos para optimizar el uso de recursos limitantes para los cultivos como el agua y los nutrientes del suelo, y así sostener la productividad en climas adversos.

En el cultivo de arroz se logró mejorar la gestión agrícola y reducir los efectos negativos de la sequía mediante la integración de datos del microbioma y el uso de un algoritmo de bosque aleatorio (*random forest*), para identificar organismos relevantes en distintas etapas de desarrollo en plantas con diferentes niveles de sequía.



De forma similar, mediante el uso de modelos de clasificación basados en máquinas de vectores de soporte se ha logrado predecir 12 variables de la salud, labranza y textura del suelo

a partir de información metagenómica obtenida de amplicones de 16S rRNA. Además, se han utilizado algoritmos de aprendizaje automático, como *extreme random tree*, para analizar nutrientes del suelo y patrones de fertilización que han permitido incrementar cerca de un 24 % el rendimiento promedio de maíz, así como de arroz y soya en niveles similares.

Sin embargo, el estudio conjunto de microbioma, rendimiento y condiciones ambientales en maíces nativos aún son limitados. El uso de IA podría contribuir a optimizar el rendimiento y la resistencia del maíz a diferentes entornos, reforzando la necesidad de estudios que combinen metagenómica con modelos predictivos, como ya se hace en otros cultivos. Así, se impulsa la eficiencia agrícola y la preservación de las variedades nativas, un elemento esencial de la biodiversidad agrícola del país.

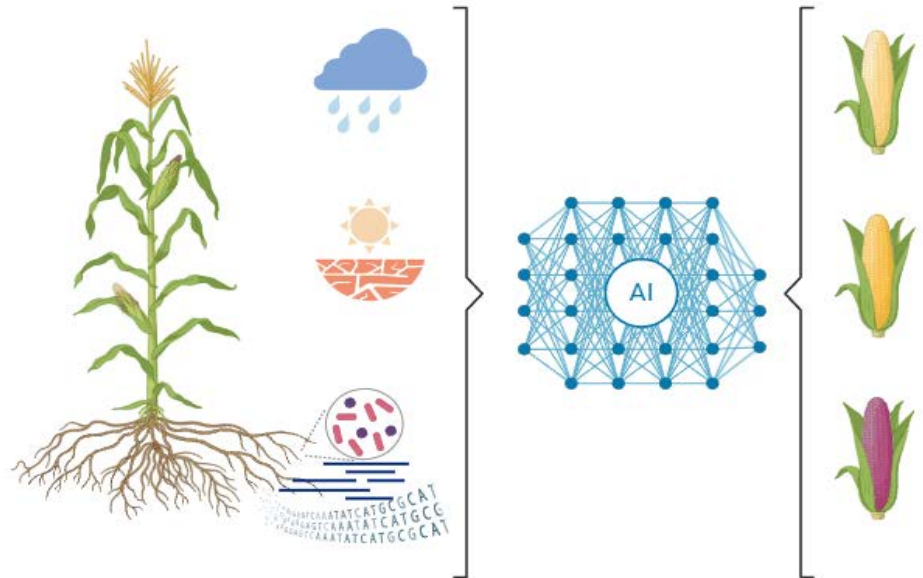
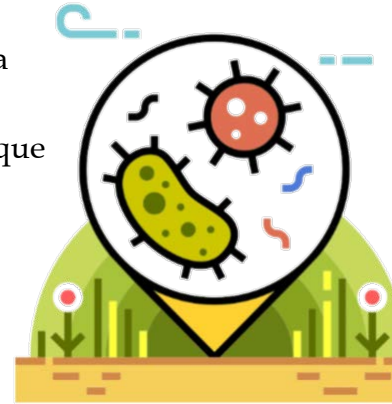


Figura 5. La inteligencia artificial integra datos del microbioma, rendimiento y ambiente para crear modelos predictivos que mejoren la producción de variedades de maíz.



Conclusiones

El microbioma del suelo juega un papel esencial en el desarrollo y adaptación del maíz nativo frente a condiciones ambientales adversas. Comprender las interacciones entre microorganismos y plantas es clave para fortalecer la agricultura sostenible. La diversidad microbiana en suelos asociados al maíz nativo no solo favorece su crecimiento y resistencia al estrés, sino que también representa una oportunidad invaluable para mejorar la productividad agrícola y enfrentar los desafíos del cambio climático. La integración de herramientas como la inteligencia artificial permitirá optimizar el aprovechamiento de estos conocimientos en beneficio de los agricultores y la seguridad alimentaria.



Literatura recomendada

Vásquez-Arroyo, J., López-Astudillo, M., Delgado-Castro, Y., Morales-Martínez, E. M., Blanco-Contreras, E., Zapata-Sifuentes, G., García-de la Peña, C. (2023). Rhizospheric Microbiome of Bacteria in Creole Grain Maize: Impact on Yield Under Agroecological Transition. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 41.
<https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1664>.

Gastélum, G., & Rocha, J. (2020). La milpa como modelo para el estudio de la biodiversidad e interacciones planta-bacteria. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 23(1), 1-12.

Masasia, J., Ng'ombe, J. N., & Masasiba, B. (2025). Artificial Intelligence in Agriculture: Current Trends and Innovations.



Semblanzas de autores

Ana Laura Alonso-Nieves. Bióloga por la Universidad de Guadalajara. Realizó la Maestría y Doctorado en Ciencias en la especialidad de Biotecnología de plantas en el CINVESTAV. Actualmente es Profesora-Investigadora de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro y miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores. Sus líneas de investigación se enfocan estudiar la tolerancia a estrés abiótico y el microbioma de maíz nativo.

Cynthia Paola Rangel Chávez. Realizó un Doctorado en la especialidad de Biotecnología de plantas por el CINVESTAV. Actualmente es Docente de la carrera de Ingeniería Bioquímica en el Instituto Tecnológico Superior de Irapuato y miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores. Dentro de sus intereses en investigación se encuentra el estudio de los mecanismos de regulación genética y las interacciones ecológicas de diferentes organismos con la finalidad de desarrollar estrategias que ayuden a enfrentar diferentes problemáticas, entre ellas el cambio climático.



J. Noé García-Chávez. Doctor en Biotecnología de Plantas en la Unidad de Genómica Avanzada del CINVESTAV. Es experto en secuenciación de lecturas largas mediante tecnología de nanoporos, análisis de datos multiómicos y aprendizaje automático. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores e Investigadoras. Actualmente se enfoca en el estudio de bacterias relevantes para la agricultura y los recursos hídricos en el Laboratorio de Ciencias Agrogenómica de la UNAM.

Jimena Ortiz Laris. Pasante de la carrera de Ingeniería Química por el Instituto Tecnológico Superior de Irapuato con enfoque e interés en el estudio de microbiomas y sus efectos en el rendimiento de maíz nativo.

José Alfredo Mares Mora. Pasante de la carrera de Ingeniería Química por el Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, con gran interés por la ciencia y la tecnología. Actualmente colabora en EVERCAST-DRAXTON trabajando en la optimización de procesos y mejora continua en la producción de piezas de seguridad forjadas en hierro nodular.

Envía tus contribuciones científicas a la revista **Terra Latinoamericana**, órgano de difusión de la SOCIEDAD MEXICANA DE LA CIENCIA DEL SUELO, A. C.

Terra Latinoamericana es de publicación continua y publica artículos científicos originales de interés para la comunidad de la ciencia del suelo y agua.

TERRA
Latinoamericana



ISSN Electrónico 2395 - 8030

<https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra>