

Sección: Hot Science

Socios invisibles: microorganismos que ayudan al agave a sobrevivir en el desierto

Invisible partners: microorganisms that help agave survive in the desert

Mónica A. Robles-Arias¹
Ulises Carrasco-Navarro²
Alma E. Cruz-Guerrero^{2*}

¹SECIHTI-Universidad Autónoma Metropolitana, Iztapalapa, Ciudad de México, México.

²Universidad Autónoma Metropolitana, Iztapalapa, Ciudad de México, México.

*Autor para la correspondencia: aec@xanum.uam.mx

RESUMEN

El agave es una planta emblemática de México que sobrevive en ambientes áridos gracias a adaptaciones fisiológicas orientadas al ahorro de agua, modificaciones en su metabolismo fotosintético, y a la presencia de comunidades microbianas endófitas. Estos microorganismos ayudan a la planta a resistir sequías, protegerse de patógenos, obtener nutrientes esenciales y producen compuestos que favorecen su crecimiento y defensa. Las ciencias ómicas han permitido descubrir este ecosistema y su importancia para la salud de la planta. Conocer estas interacciones abre oportunidades para desarrollar estrategias de agricultura sostenible mejorar la resiliencia de cultivos, y reducir el uso de fertilizantes y pesticidas.

Palabras clave: Agave, bacterias, simbiosis.

SUMMARY

The agave is an emblematic plant of Mexico that survives in arid environments thanks to physiological adaptations aimed at saving water, modifications in its photosynthetic metabolism, as well as the presence of endophytic microbial communities. These microorganisms help the plant tolerate drought, protect it against pathogens, and obtain essential nutrients. They also produce compounds that promote plant growth and defense. Omics sciences have made it possible to uncover this ecosystem and understand its importance for plant health. Studying these interactions opens new opportunities to develop sustainable agriculture strategies, improve crop resilience, and reduce the use of fertilizers and pesticides.

Keywords: Agave, bacteria, symbiosis.

Introducción

El agave es una de las plantas más emblemáticas de México. De las 210 especies registradas, cerca del 75 % se distribuyen en nuestro país y alrededor del 56% se consideran endémicas, lo que posiciona al Altiplano mexicano como uno de sus principales centros de diversidad. Tradicionalmente, su imagen se asocia a la producción de bebidas tradicionales como el pulque, el mezcal y el tequila. No obstante, su importancia va mucho más allá de este ámbito. Tan sólo en la región de Yucatán se han documentado cerca de 40 formas diferentes de aprovechamiento, que incluyen su uso ornamental, la obtención de fibras para la elaboración de cepillos, escobas y canastas, así como aplicaciones en la gastronomía- como el jarabe de agave y el consumo de sus flores, ya sea capeadas o preparadas a la mexicana-. Además, se le atribuyen propiedades medicinales, entre ellas su uso como agente antiséptico e incluso como tónico en casos de alopecia [1].

Al pensar en el agave evocamos en nuestra mente paisajes áridos donde pocas especies vegetales logran sobrevivir. Pero surge una pregunta fascinante: ¿cómo consigue el agave crecer y prosperar en ambientes con escasez de agua, suelos pobres y temperaturas extremas?

La respuesta no depende únicamente de la planta. En su interior existe un sorprendente ecosistema invisible formado por microorganismos que colaboran con ella. En este artículo exploraremos los mecanismos que permiten al agave resistir condiciones adversas y conocer el papel crucial de los microorganismos que lo habitan.

El agave y su estrategia para ahorrar agua

El agave es una planta xerófila, es decir,

está adaptada a prosperar en ambientes con disponibilidad limitada de agua, como regiones con días calurosos, noches frías y suelos áridos (Figura 1). Esta notable capacidad de adaptación se debe, en gran parte, a su metabolismo CAM (Metabolismo Ácido de las Crasuláceas), una estrategia fisiológica que optimiza el uso del agua. A diferencia de la mayoría de las plantas, el agave abre sus estomas-pequeños poros microscópicos en la superficie de las hojas que regulan el intercambio gaseoso y la pérdida de agua- durante las noches, cuando la temperatura es más baja y la humedad mayor. Durante este periodo, captan dióxido de carbono (CO₂), que se transforma en ácidos orgánicos para almacenarlo temporalmente en sus células. Durante el día, los estomas permanecen cerrados para minimizar la pérdida de agua, es entonces cuando los ácidos orgánicos son metabolizados y, como resultado se libera CO₂ que es utilizado en la fotosíntesis para síntesis de azúcares [2].

Además de ese metabolismo especializado, el agave presenta adaptaciones morfológicas esenciales, como sus hojas suculentas dispuestas en forma de roseta que almacenan agua, cutículas epidérmicas gruesas con abundante deposición de ceras que reduce la pérdida hídrica y un sistema radical superficial altamente eficiente capaz de captar rápidamente la humedad disponible tras precipitaciones. Estas características le permiten cap-



Figura 1. El agave en su ambiente natural.

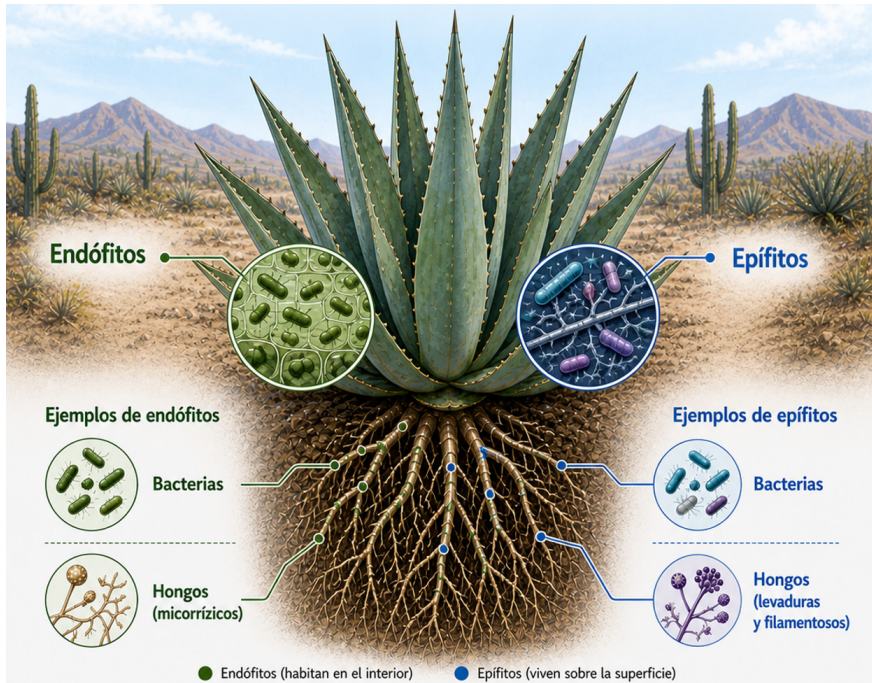


Figura 2. Microorganismos asociados al agave y su papel en la planta. Se muestran bacterias y hongos que habitan tanto en el interior (endófitos) como la superficie (epífitos), contribuyendo a la nutrición, defensa y adaptación del agave a condiciones áridas.

el ambiente (Figura 2).

Ambos grupos desempeñan funciones esenciales para la planta. Los microorganismos endófitos participan en procesos clave como la fijación de nitrógeno, la producción de compuestos que estimulan el crecimiento vegetal y la modulación de respuestas al estrés. Por ejemplo, bacterias de los géneros *Acinetobacter*, *Bacillus*, *Enterobacter*, *Klebsiella* y *Pseudomonas* contribuyen a mejorar la disponibilidad de nutrientes y a regular el crecimiento en condiciones adversas [3].

Por su parte, los microorganismos epífitos actúan como una primera línea de defensa frente a factores externos. Al

colonizar la superficie de hojas y raíces, limitan el establecimiento de patógenos mediante competencia por espacio y nutrientes, además de producir compuestos antimicrobianos que inhiben el crecimiento de patógenos (Figura 3). Entre estas destacan los ácidos orgánicos y las bacteriocinas como la nicina - proteínas con actividad antimicrobiana-, compuestos producidos principalmente por bacterias ácido-lácticas (sí, como las que encontramos en alimentos como el yogurt) [4]. Algunos microorganismos generan compuestos naturales con propiedades insecticidas, como la pulegona, repelentes como la 2-undecanona y sustancias antimicrobianas como el germacreno D, contribuyendo así a la protección integral de la planta [5].

Los invisibles del agave: aliados internos y externos

Al observar un agave en el desierto, es difícil imaginar que no está sólo. ¿Sabías que dentro y fuera de la planta del agave hay microorganismos que contribuyen a su supervivencia? Este conjunto de microorganismos forma parte de lo que conocemos como el ecosistema invisible del agave. Se pueden clasificar en dos grandes grupos: los microorganismos endófitos, que habitan en el interior de los tejidos de la planta (raíces, tallo y hojas) y los epífitos, que viven sobre su superficie, formando comunidades en contacto directo con

tar mejor la radiación del sol para llevar a cabo el proceso de fotosíntesis y ayudan a dirigir el agua hacia las raíces superficiales, las cuales disminuyen su tamaño durante las sequías evitando así la pérdida de agua. [2]. Esta morfología permite sobrevivir a los agaves en entornos donde otras plantas no podrían prosperar.

Así mismo, algunas de estas comunidades como las pertenecientes a órdenes como *Pseudomonadales*, *Enterobacteriales* y *Xanthomonadales* producen biopelículas con la finalidad de protegerse a ellos mismos y al agave. Una biopelícula es una capa protectora

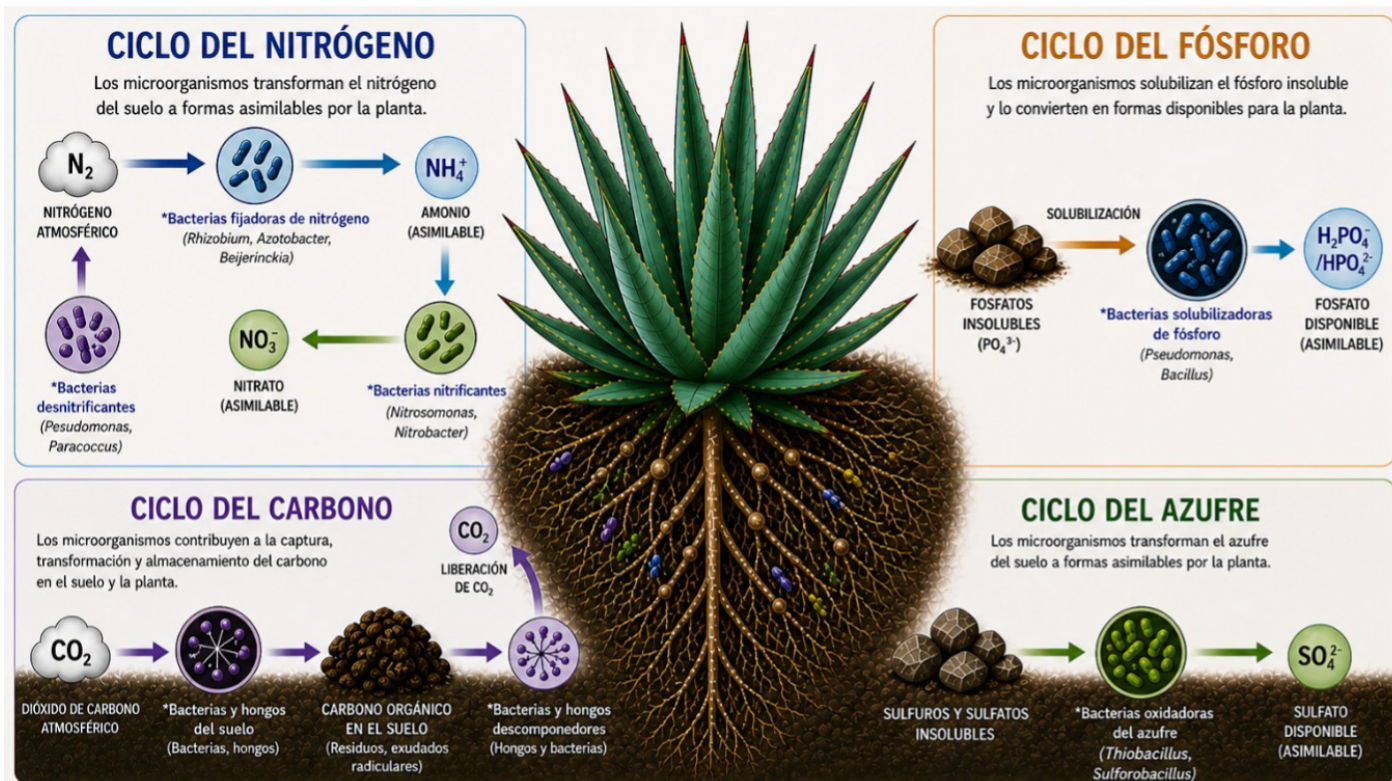


Figura 3. Ciclos biogeoquímicos del fósforo, azufre, carbono y nitrógeno en el sistema suelo-agave, resaltando el papel de los microorganismos en la transformación y disponibilidad de nutrientes para la planta.

compuesta principalmente por polisacáridos producidos por los propios microorganismos, que les permite adherirse a la superficie de la planta y permanecer unidos. Esta capa ayuda a retener humedad, proteger contra radiación solar y dificultar el establecimiento de microorganismos patógenos. De esta manera, los microbios no solo se benefician de la planta, sino que también contribuyen activamente a su supervivencia [6].

Es importante destacar que no solo las bacterias cumplen esas funciones. Los hongos, en particular los micorrízicos como *Rhizophagus*, establecen asociaciones con las raíces del agave que mejoran la absorción de agua y nutrientes, especialmente el fósforo [7]. Esta interacción resulta casi crucial en suelos pobres y ambientes con disponibilidad limitada de agua.

En conjunto, estos microorganismos no sólo coexisten con el agave, sino que forman una red de cooperación que fortalece su ca-

pacidad de adaptación. Este equilibrio entre microorganismos internos y externos permite al agave sobrevivir en condiciones extremas, demostrando que su resistencia no depende únicamente de sus propias características fisiológicas, sino también de las interacciones



Figura 4. Beneficios potenciales del conocimiento del ecosistema microbiano asociado al agave para una agricultura sostenible.

con su microbiota asociada.

Microbios que ayudan al agave a alimentarse

El agave destaca por su capacidad de desarrollarse en suelos erosionados y de baja fertilidad, condiciones donde muchas otras plantas presentan limitaciones, pero ¿cómo lo hace? Gracias a la ayuda de sus microorganismos asociados. En las plantas de agave, el nitrógeno representa el macronutriente con mayor limitación para su crecimiento. El nitrógeno abunda en la atmósfera, pero el agave no puede aprovecharlo directamente; es aquí donde entran en acción las bacterias que viven asociadas a él (Figura 4). Bacterias como *Acinetobacter* sp. y *Leclercia adecarboxylata* fijan nitrógeno atmosférico necesario para que la planta produzca proteínas, enzimas, clorofila y ácidos nucleicos [2]. Adicionalmente, algunas bacterias participan en procesos del ciclo del carbono, el nitrógeno y el azufre, contribuyendo al reciclaje de nutrientes en suelos pobres. También, se ha reportado que algunos microorganismos como bacterias de los géneros *Bacillus*, *Pseudomonas* y *Enterobacter*, así como hongos del género *Rhizopagus* sintetizan enzimas y ácidos orgánicos que solubilizan el fósforo presente en el suelo, haciéndolo disponible para la planta [3,7]. Gracias a esas interacciones, el agave reduce su dependencia de fertilizantes químicos y mejora su capacidad de adaptación a suelos de baja fertilidad.

¿Cómo estudia la ciencia esta vida invisible?

Durante mucho tiempo, los microorganismos asociados a las plantas pasaron inadvertidos. Hoy, gracias a las ciencias ómicas como la metagenómica, metaproteómica y metabolómica, es posible identificar qué comunidades microbianas habitan en el agave, qué moléculas producen y cómo interactúan con su hos-

pedero [3, 5].

Estas herramientas permiten comprender las complejas relaciones de cooperación entre el agave y los microorganismos que en él habitan, abriendo nuevas oportunidades para la biotecnología agrícola. Por ejemplo, gracias a la metaproteómica se puede identificar la expresión de proteínas por microorganismos específicos ante un estímulo concreto como temperatura, sequías, exposición ante patógenos o plagas, de tal manera que podrían utilizarse microorganismos benéficos del agave para mejorar la resistencia de otros cultivos, ya sea frente a estrés abióticos- como sequía, salinidad, temperaturas extremas y limitación de nutrientes- o estrés bióticos, mediante la supresión de patógenos, la producción de compuestos antimicrobianos y la inducción de respuestas de defensa sistémica en la planta hospedera [3, 5].

¿Por qué es importante conocer el ecosistema oculto del agave?

Comprender la relación entre el agave y sus microorganismos ofrece posibilidades para desarrollar estrategias de agricultura sostenible (Figura 5). Las características que estos microorganismos presentan permitirían explorar su uso potencian en la agricultura o en el mejoramiento de los cultivos de importancia económica. Diversos microorganismos asociados a esta planta presentan características funcionales clave, como la producción de compuestos antimicrobianos (por ejemplo, bacteriocinas y ácidos orgánicos), la formación de biopelículas que favorecen la retención de humedad y la protección frente a estrés ambiental, así como la capacidad de solubilizar fosfatos o facilitar la adquisición de nitrógeno. Estas propiedades pueden aprovecharse en el diseño de bioinoculantes capaces de mejorar el establecimiento y crecimiento de cultivos, especialmente en suelos degradados o bajo condiciones climáticas adversas. Así mismo, el uso de bacterias con actividad antimicrobiana podría disminuir la dependencia de

pesticidas, mientras que los microorganismos promotores del crecimiento vegetal contribuirían a incrementar la productividad en regiones con limitaciones agrícolas. En conjunto estas aplicaciones representan una alternativa prometedora para fortalecer la producción de alimentos y apoyar a comunidades rurales con recursos limitados. Esto representa una alternativa prometedora para mejorar la producción de alimentos y para apoyar a comunidades rurales que enfrentan escasez de recursos.

Conclusión

El agave no es una planta resistente per se, sino que es el resultado de una estrecha colaboración entre la planta y un diverso conjunto de microorganismos que viven en su interior. Ese ecosistema invisible le permite sobrevivir en ambientes extremos y ofrece pistas valiosas para el desarrollo de soluciones biotecnológicas sostenibles. Descubrir y comprender esta alianza microscópica abre nuevas posibilidades para enfrentar los desafíos agrícolas del futuro y demuestra que, incluso en los ambientes más hostiles, la vida prospera gracias a la cooperación.

Referencias

- [1] Robles-Arias, M. & Cruz-Guerreo A. (2023). Agave: importancia y aplicaciones en México. *CienciAcierta*, 19(76), 264-288.
- [2] García-Mendoza, A. J., Cházaro-Basañes, M. J., Nieto Sotelo, J., Sánchez-Teyer, L. F., Tapia-Campos, E., Gómez-Leyva, J. F., Tamayo-Ordóñez, M., ... Gutiérrez-Mora, A. (2017). Agave. En *Panorama del aprovechamiento de los agaves en México* (pp. 19–69). AGA-RED. ISBN 978-607-97548-5-3.
- [3] Aguado-Santacruz, G.A., Aguado-Rodríguez, D.L., Moreno-Gómez, B., Arroyo-González, D., Centeno-Jamaica, D., Aguirre-Mancilla, C. & García-Moys, E. (2022). Endomicrobiota bacteriana de agave pulquero (*Agave salmiana*). I. Aislamiento, frecuencia e identificación molecular. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 45, 243-250. ht-

[tps://doi.org/10.35196/rfm.2022.2.243](https://doi.org/10.35196/rfm.2022.2.243)

- [4] Alameri, F., Tarique, M., Osaili, T., Obaid, R., Abdalla, A., Masad, R., A. Al-Sbiei, M. Fernandez-Cabezudo, S.Q. Liu, B. Al-Ramadi & M. Ayyash. (2022). Lactic acid bacteria isolated from fresh vegetable products: Potential probiotic and postbiotic characteristics including immunomodulatory effects. *Microorganisms*, 10, 389. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10020389>
- [5] Slama, H. B., Cherif-Silini, H., Chenari Bouket, A., Qader, M., Silini, A., Yahiaoui, B., ... & Belbahri, L. (2019). Screening for *Fusarium* antagonistic bacteria from contrasting niches designated the endophyte *Bacillus halotolerans* as plant warden against *Fusarium*. *Frontiers in microbiology*, 9, 3236. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.03236>
- [6] del Rosario, M. H. M., Abel, L. B. J., Karen, S. F. M., Adriana, C. O. & Jabín, B. B. J. (2025). Arbuscular mycorrhizal fungi improve the growth, nutrient uptake and survival of micropropagated agave (*Agave marmorata* Roetz) plantlets during acclimatization. *Journal of Arid Environments*, 228, 105330. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2025.105330>
- [7] Martha-Lucero, N., Viniegra-González, G., González-Olivares, L., & Cruz-Guerrero, A. (2023). Biofilm formation by agave epiphytic lactic acid bacteria fed with agave fructans. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 39(11), 299. <https://doi.org/10.1007/s11274-023-03749-3>