



Novedades científicas

De actualidad

Reseña

Desde las redes

Eneas Aguirre von Wobeser, Jorge Rocha Estrada y Rosina Cabrera Ruiz

Bacterias del suelo, aliadas de las plantas

Las bacterias y otros microorganismos ayudan a las plantas reciclando sus desechos, proveyéndolas de nutrientes, promoviendo su crecimiento y combatiendo plagas y enfermedades. Estos microorganismos benéficos son utilizados como biofertilizantes, para mejorar la agricultura sin utilizar agroquímicos. Mediante análisis de ADN, buscamos bacterias benéficas en los suelos de milpas tradicionales.

Los ecosistemas en la Tierra permanecen estables en el tiempo

Nuestro planeta tiene características únicas en el Sistema Solar, ya que está lleno de vida y sus continentes están cubiertos de grandes extensiones de vegetación. Para mantenerse sanos, estos sistemas vivos requieren una constante renovación de los organismos que los habitan; esto significa que los individuos que mueren deben ser sustituidos por nuevas generaciones mediante la reproducción. Así, los ecosistemas de la Tierra permanecen estables en el tiempo, por miles o hasta millones de años. Cuando un sistema tiene cambios internos, como entradas de nuevos individuos (nacimiento de plantas, en nuestro caso) y salidas (por ejemplo, muerte de árboles), pero sus características generales permanecen estables, se trata de un estado estacionario. Los estados estacionarios se dan cuando las entradas y las salidas están equilibradas (véase la Figura 1).

¿Cómo se mantiene el estado estacionario en los ecosistemas naturales? Pensemos en la semilla de un árbol. Al principio, crece utilizando sustancias almacenadas en la propia semilla, pero después tendrá que obtener recursos de su ambiente. ¿De dónde vienen esos recursos? Probablemente aquí pensemos en la fotosíntesis. En efecto, las plantas utilizan la luz solar para obtener la energía que les permite crecer; asimismo, el dióxido de carbono (CO_2) del aire lo convierten en azúcares, que son transformados para construir raíces, troncos, hojas, flores y otros tejidos que necesitan para vivir.

Ahora, imaginemos un planeta parecido a la Tierra, pero poblado únicamente por plantas que crecen y se reproducen indefinidamente, al tiempo que utilizan el CO_2 de la atmósfera. En algún momento las plantas se apilarían sobre el suelo y

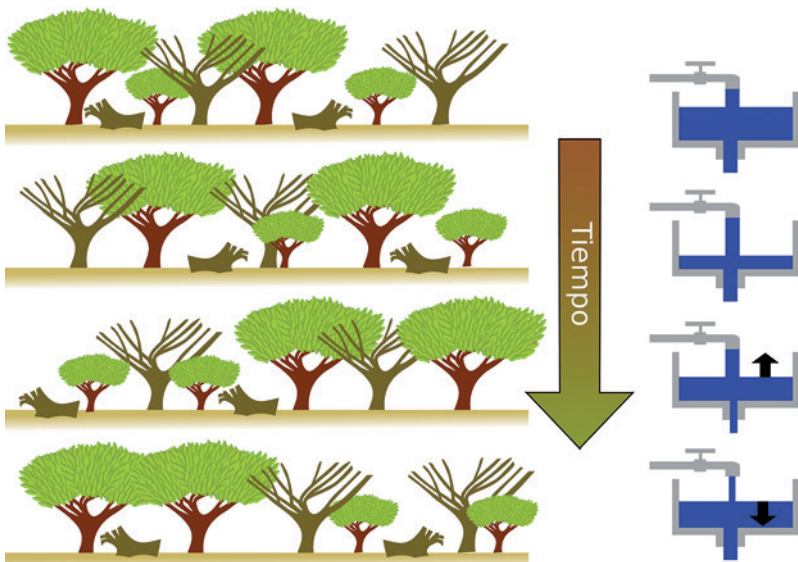


Figura 1. Concepto de estado estacionario. Izquierda: los árboles que mueren son reemplazados por nuevos individuos, pero el número total de árboles jóvenes, maduros y troncos caídos se mantiene aproximadamente constante. Derecha: otro ejemplo de estado estacionario; en una tarja, si la entrada de agua iguala la salida, el nivel permanece constante (dos primeras tarjas), pero si la entrada de agua es diferente que la salida, el nivel cambia, y no hay un estado estacionario (dos tarjas de abajo).

se acumularían varias capas de vegetación muerta, hasta que se agotara todo el CO_2 de la atmósfera. Entonces, se perdería el estado estacionario y llegaría la extinción de la vida en ese planeta imposible. Como sabemos, esto no sucede en nuestra Tierra, ya que las plantas no están solas: hay animales que las consumen y regresan parte del CO_2 a la atmósfera mediante la respiración. Pero esto es sólo una pequeña parte de la historia. Los grandes consumidores de la materia vegetal que se produce en la Tierra son tan pequeños que no podemos observarlos a simple vista: los microorganismos.

Los microorganismos son aliados de las plantas

La diversidad de microorganismos en el suelo incluye a especies procariontes (bacterias y arqueas) y eucariontes (hongos, protozoarios y algas, entre otros). En este ecosistema, son de especial interés las bacterias que se asocian a las plantas, así como los hongos (por ejemplo, los micorrícicos arbusculares o etomicorrícicos; Berendsen y cols., 2012). Muchos de estos microorganismos consumen los tejidos vegetales muertos y utilizan el carbono para crecer;

también respiran y regresan a la atmósfera grandes cantidades de CO_2 . Aunque no todo el tejido vegetal es consumido por los microorganismos del suelo —ya que una parte se acumula y termina como yacimientos petroleros o de carbón—, es precisamente la degradación por parte de los microorganismos la que renueva el carbono en la atmósfera, con lo cual se completa el ciclo del carbono.

Regresemos a nuestra semilla, que ya se convirtió en una plántula y que se volverá un robusto árbol. Ésta no sólo requiere carbono para su crecimiento; otro componente importante es el nitrógeno. El ciclo del nitrógeno es mucho más complicado que el del carbono. En la atmósfera se almacena la mayor parte del nitrógeno; el gas más abundante de la atmósfera es el nitrógeno molecular (N_2), pero las plantas no pueden utilizarlo de forma directa. El N_2 consiste en dos átomos de nitrógeno unidos por un triple enlace, que es tan difícil de romper que ninguna planta puede hacerlo. Afortunadamente, existen bacterias que lo hacen y producen moléculas con un sólo átomo de nitrógeno, las cuales sí son utilizables para la vida, en forma de amonio (NH_4). Este proceso es conocido como fijación del nitrógeno y lo llevan a cabo bacterias que se encuentran asociadas a las plantas, así como por algunas de vida libre.

El proceso de fijación del nitrógeno resulta en asociaciones estrechas entre estas bacterias y algunas plantas; de manera notable, las leguminosas, incluido el frijol. En las raíces de estas plantas se desarrollan estructuras especializadas para adquirir nitrógeno, llamadas nódulos, que crean un ambiente propicio para la vida de las bacterias fijadoras de nitrógeno. En los nódulos, las bacterias proporcionan nitrógeno utilizable a las plantas, mientras que las plantas les dan energía y carbono en forma de azúcares, para sostener su crecimiento y proporcionar la energía necesaria para la fijación de nitrógeno (véase la Figura 2). El ciclo del nitrógeno tiene muchos otros pasos, como la nitrificación y la desnitrificación, que son realizados por bacterias y que contribuyen al funcionamiento sostenido de los ecosistemas en la Tierra.

En la actualidad sabemos que la asociación entre plantas y bacterias es mucho más compleja, más allá

de los intercambios de nutrientes y energía. Existe una gran variedad de mecanismos de comunicación entre plantas y bacterias que han evolucionado durante millones de años. Como resultado, los microorganismos pueden comunicarse directamente con las plantas mediante un lenguaje basado en señales químicas.

Si bien hay microorganismos que causan enfermedades vegetales (fitopatógenos), también hay otros que ayudan a proteger a las plantas (benéficos). Esta actividad de protección es la base del concepto de suelos supresivos a enfermedades. La presencia de dichos microorganismos en el suelo limita el desarrollo de una enfermedad, incluso cuando el agente causal se encuentre presente y las condiciones ambientales sean favorables para la enfermedad. Estos microorganismos por lo general interfieren con el desarrollo del patógeno, por ejemplo, mediante la liberación de químicos que impiden su crecimiento. Algunas bacterias producen hormonas vegetales que influyen en el crecimiento de las plantas; por otro lado, las plantas producen moléculas, como azúcares, que inducen la colonización bacteriana en la superficie de las raíces.

Los microorganismos del suelo son esenciales para la agricultura

La capacidad del suelo para producir grandes cantidades de material vegetal de forma acelerada es muy notable en los ambientes agrícolas. Basta observar un cultivo de caña o de maíz para apreciar cómo en pocos meses se transforma un terreno labrado en un espacio cubierto por plantas de altura considerable. Para sostener este crecimiento, la agricultura moderna recurre a tecnologías de la llamada revolución verde, como el uso de fertilizantes químicos, que cuando son utilizados en exceso, o por mucho tiempo, pueden degradar el suelo y contaminar el agua. Por ejemplo, los problemas de plagas son combatidos por los agricultores modernos mediante el uso de pesticidas químicos, y las malezas son controladas con herbicidas.

Una opción sustentable para evitar los problemas relacionados con la agricultura moderna es aprove-

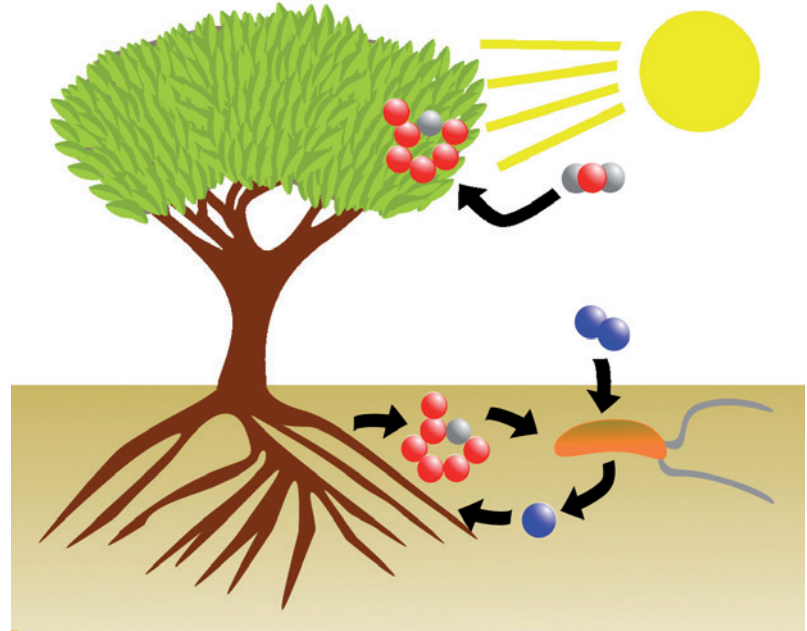


Figura 2. Las plantas obtienen el carbono (esferas rojas) del CO_2 de la atmósfera (las esferas grises representan el oxígeno). El carbono se utiliza para formar azúcares que se utilizan para construir todos los tejidos de la planta. A su vez, algunas moléculas son excretadas en las raíces y alimentan a los microorganismos del suelo. A cambio, muchos microorganismos benefician a las plantas. Aquí se ejemplifica una bacteria que puede tomar el nitrógeno (esferas azules) de la atmósfera y convertirlo en una forma utilizable por la planta.

char las interacciones planta-bacteria que encontramos en la naturaleza para aislar del suelo a las bacterias que tienen un uso agrícola. Los microorganismos benéficos pueden emplearse para el control de enfermedades causadas por hongos y bacterias nocivas, sin el uso de sustancias químicas que puedan contaminar el ambiente (Cabrera y cols., 2020). Algunos microorganismos, llamados biopesticidas, pueden incluso utilizarse para el control de plagas, incluidos los insectos como la mosquita blanca, gusanos barrenadores, escarabajos que se alimentan de hojas y muchos otros. También pueden utilizarse microorganismos como biofertilizantes, y con ello reducir la aplicación de fertilizantes químicos. Aunque el uso de microorganismos en la agricultura ha permitido reducir el empleo de agroquímicos, el problema todavía no está resuelto, pues aún es necesario utilizar productos químicos para mantener la productividad agrícola moderna a gran escala.

En contraste, en los sistemas agrícolas tradicionales, los suelos funcionan de forma natural y los microorganismos son responsables de reciclar la materia

orgánica, proveer de nutrientes a las plantas y ayudar a combatir las posibles plagas y enfermedades. Aunado a esto, en los sistemas de cultivo tradicionales coexiste una gran diversidad de plantas, que proveen hábitat para muchas especies de insectos, entre ellos depredadores de insectos nocivos. Entonces, esta forma de trabajar la tierra produce agroecosistemas más diversos y sanos, como los que han alimentado a la humanidad durante miles de años. Un ejemplo de este tipo de agricultura es la milpa (véase la Figura 3), que se cultiva aún en gran parte de Mesoamérica y genera alimentos variados y de alta calidad para las familias rurales. Por ello, esta tradición milenaria es un elemento central de las culturas de la región.

Mesoamérica es el centro de domesticación de muchas plantas, como maíz, frijol, calabaza y otras especies cultivadas en milpas. Como todas las especies agrícolas, estas plantas fueron domesticadas gradualmente por medio de la selección de semillas para sembrar las plantas con mejores características para los agricultores. En este proceso de selección es posible que se hayan seleccionado, de manera inadvertida, algunos microorganismos del suelo, lo cual guió su evolución hacia especies mejor adaptadas para convivir con las plantas domesticadas y brindarles más beneficios, sin la necesidad de usar productos químicos. Por ello, hoy día varios grupos de investi-

gación estamos buscando en los suelos de las milpas microorganismos que puedan ser aprovechados para una agricultura más sustentable y productiva.

■ ■ ■ ¿Cómo estudiamos a los microorganismos del suelo?

■ La forma tradicional de estudiar a los microorganismos de un ambiente como el suelo consiste en cultivarlos primero en el laboratorio. Este proceso es complicado, ya que la mayoría de ellos se rehúsan a crecer en nuestros medios de cultivo. Además, aislar y cultivar microorganismos es lento y laborioso, por lo que en general estos trabajos se limitan a cultivar una pequeña proporción de toda la comunidad microbiana de interés. A pesar de ello, se han logrado grandes avances mediante el cultivo de microorganismos y esta técnica es todavía una de las principales herramientas de la microbiología ambiental.

Hoy día contamos con una herramienta poderosa, la cual ha revolucionado en los últimos 20 años nuestra visión de la diversidad microbológica de prácticamente cualquier ambiente en la Tierra. La metagenómica consiste en obtener el ADN de las bacterias directamente del ambiente, como en este caso el suelo (véase la Figura 4). El punto más importante para entender esta técnica es que el ADN contiene información distinta para cada organismo; por ejemplo, para cada una de las especies de bacterias en el suelo. El ADN nos dice a qué grupos de bacterias pertenecen, cómo se relacionan entre ellas, cuáles son las más abundantes, y qué funciones pueden llevar a cabo en el suelo. Con esta información, podemos tener una visión general de las comunidades microbianas, aun sin contar con cultivos puros de cada uno de sus miembros.

La información en el ADN está codificada mediante cuatro diferentes moléculas llamadas bases nitrogenadas, que se enlazan una detrás de otra formando cadenas de miles y hasta millones de éstas. Hay cuatro diferentes bases nitrogenadas: adenina, timina, citosina y guanina (representadas como A, T, C y G). Lo importante en estas cadenas es el orden en que se encuentran las bases, al que llamamos secuencia. Esto funciona de manera muy parecida a



Figura 3. Milpa tradicional de la comunidad de El Boxo, Hidalgo, México.

las letras en un texto. Por ejemplo, la palabra “huitlacoche” tiene nueve letras diferentes, dos de ellas aparecen dos veces. Si revolvemos las letras al azar, por ejemplo, en “caohechtiul” o “uiccoetlhha”, ya no sabríamos que estamos hablando de un hongo comestible que crece entre los granos del maíz. Es decir, la información sólo se obtiene si las letras están en el orden correcto. De la misma manera, la información en el ADN se puede obtener cuando conocemos el orden en el que se encuentran las cuatro diferentes moléculas que lo componen.

Las células de todos los seres vivos —incluidas bacterias, plantas, hongos, animales, entre otros— tienen mecanismos para leer la información del ADN y utilizarla para construir los componentes que necesitan para funcionar. Además, todos los seres vivos —desde una bacteria hasta un elefante— utilizan mecanismos casi idénticos para hacerlo; es decir, todos hablamos el mismo “idioma molecular”.

Así, el ADN se puede considerar como un manual de instrucciones para construir una célula. Los científicos hemos aprendido a leer este manual mediante tecnologías avanzadas y una gran cantidad de recursos computacionales. Con esta información tratamos de predecir qué puede hacer una célula. Por ejemplo, si en el ADN de una bacteria encontramos las instrucciones para las proteínas que introducen moléculas de azúcar a su interior, y además están las instrucciones para las proteínas que degradan y obtienen energía del azúcar, podemos predecir que esa bacteria puede alimentarse de azúcar. No obstante, nuestro conocimiento sobre la información contenida en el ADN es incompleta, pero avanza día con día. Es probable que en un futuro podamos cargar en un programa de computadora toda la información del ADN de una bacteria y obtener una célula virtual completa, con todo y respuestas realistas a estímulos ambientales, como cambios de temperatura o la presencia de otros organismos en su entorno. Por lo pronto, tenemos el privilegio de conocer de forma parcial lo que los microorganismos del ambiente pueden hacer, lo cual es un gran avance.

La metagenómica también permite clasificar a cada microorganismo de un ambiente en grupos conformados de acuerdo con su origen evolutivo.

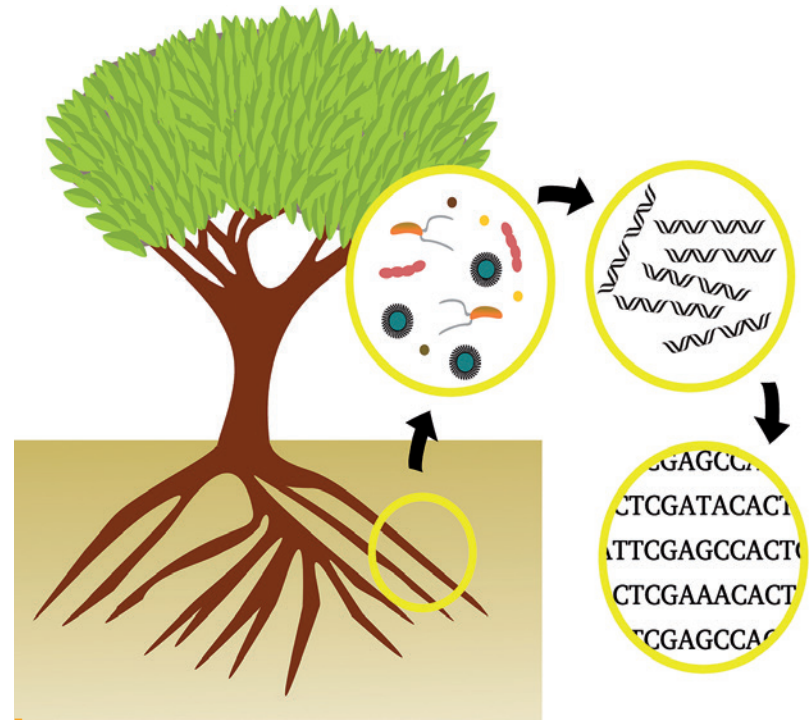


Figura 4. La metagenómica permite estudiar a los microorganismos del suelo; para ello, extraemos el ADN directamente del ambiente y obtenemos sus secuencias, las cuales nos dan información sobre qué microorganismos hay y qué capacidades biológicas tienen.

Para entender esto, hay que considerar que distintas versiones de una maquinaria pueden cubrir la misma función. Por decir, un coche de cualquier tipo puede ser utilizado para transportarse, independientemente de su marca o modelo. De manera análoga, las bacterias de diferentes especies tienen distintas versiones de maquinarias que desempeñan la misma función. Estas diferentes versiones también varían en su secuencia de ADN. La estrategia que seguimos consiste en buscar una maquinaria muy esencial en la vida de las bacterias y que esté presente en todas las especies, para utilizarla como un marcador molecular o identificador de especies. En la década de 1970, algunos científicos escogieron parte de la maquinaria de las células para leer el ADN —llamada ribosoma— que es esencial para cualquier célula. Entonces, con técnicas de laboratorio bien establecidas, buscamos estas secuencias y las comparamos con otras muestras de nuestro experimento, así como con las secuencias encontradas por otros colegas en miles de experimentos. Las secuencias más parecidas comparten un ancestro común más reciente, por lo

que esta comparación nos permite agrupar a los microorganismos de acuerdo con su origen evolutivo. En algunos casos, estos grupos de microorganismos también comparten características y funciones ecológicas, por lo que es un primer paso para entender a las comunidades microbianas.

■ **Estamos empezando a entender los suelos de las milpas**

Las investigaciones que se han hecho sobre las comunidades bacterianas de los suelos de las milpas sugieren que existen interacciones muy complejas, tanto entre las bacterias como con las plantas (Rocha y Gastélum, 2020). En un estudio de la Universidad Nacional Autónoma de México realizado en milpas de Tlaxcala se encontró que las interacciones entre microorganismos van cambiando durante el ciclo de cultivo (Rebollar y cols., 2017). Ello sugiere una gran flexibilidad de los microorganismos para interactuar con otras especies. Hay que considerar que las condiciones ambientales cambian conforme avanza el año, desde la siembra con las primeras lluvias, durante la temporada de lluvia de verano y en el otoño, relativamente seco y frío. Por otro lado, la influencia de las plantas en el suelo podría variar en el tiempo, desde las plántulas pequeñas hasta las grandes plantas con flores y posteriormente con mazocas. Entonces, parece que las bacterias modifican

la manera en la que interactúan, como respuesta a todos estos cambios ambientales.

En otro estudio, realizado por nuestro grupo de investigación en el Centro de Investigación y Desarrollo en Agrobiotecnología Alimentaria, nos enfocamos en el efecto de las plantas de milpas (véase la Figura 3) sobre las comunidades bacterianas del suelo (Aguirre-von-Wobeser y cols., 2018). Encontramos que, en presencia de plantas de maíz, el suelo se enriquece de ciertos microorganismos que pertenecen a grupos de bacterias conocidas como benéficas, llamadas Actinobacterias y Burkholderiales (véase la Tabla 1). Además, encontramos que un grupo de bacterias, llamadas Verrucomicrobia, están enriquecidas cerca de las raíces; este grupo es abundante en el suelo, pero aún poco estudiado. Pensamos que estas bacterias podrían también tener interacciones benéficas con las plantas, con potencial de ser aprovechadas para aplicaciones en agricultura. Los estudios realizados en milpas reafirman nuestra noción del suelo como un sistema vivo, con alta complejidad y un gran potencial para su manejo en el futuro, en pro de una agricultura más sustentable.

■ **¿La milpa como fuente de bacterias benéficas?**

■ En este artículo hemos aprendido que las bacterias son una parte fundamental de la vida de las plantas y, por lo tanto, son esenciales para el equilibrio de los

Tabla 1. Grupos de bacterias enriquecidas en las raíces de maíz en una milpa tradicional.

Actinobacterias	Burkholderiales	Verrucomicrobia
Actividades benéficas: <ul style="list-style-type: none"> • Fijación de nitrógeno. • Supresión de enfermedades vegetales mediante producción de antibióticos. • Supresión de enfermedades vegetales mediante estimulación de las defensas de las plantas. • Incremento de la disponibilidad del hierro para las plantas. • Incremento de la disponibilidad de fósforo para las plantas. • Incremento de la resistencia a estrés por desecación. 	Actividades benéficas: <ul style="list-style-type: none"> • Fijación de nitrógeno. • Supresión de enfermedades causadas por hongos. Actividades nocivas: <ul style="list-style-type: none"> • Algunas especies pueden hacer enfermar a las plantas. 	Este grupo casi no se ha estudiado, por lo que desconocemos si tienen actividades benéficas o nocivas para las plantas.

ecosistemas en la Tierra, por ejemplo, para los ciclos del carbono y del nitrógeno. Además, las interacciones planta-bacteria se dan mediante un lenguaje químico que otorga a las plantas la capacidad de crecer mejor y protegerse de enfermedades, mientras que provee a las bacterias de hábitats para sobrevivir. Un punto muy importante para recordar es que estas asociaciones planta-bacteria pueden estar alteradas en los campos agrícolas donde se utilizan agroquímicos; por ello, la milpa tradicional puede presentar una mayor abundancia y diversidad de bacterias que establecen interacciones benéficas con las plantas.

Gracias a los avances tecnológicos de las últimas décadas, en particular para el estudio del ADN, hemos empezado a descifrar la complejidad de las comunidades bacterianas del suelo y sus funciones, tanto en ecosistemas naturales como en campos agrícolas o en milpas. Es notable cómo la diversidad y las funciones bacterianas encontradas en milpas sugieren que las interacciones planta-bacteria en estos agroecosistemas son únicas. Entonces, la milpa podría ser la fuente donde encontremos microorganismos para mantener nuestros campos agrícolas saludables y, a

la larga, eliminar el uso de productos químicos. Más allá del empleo de la metagenómica para conocer estas comunidades bacterianas de la milpa, es necesario desarrollar estrategias para utilizarlas a nuestro favor, para crear productos amigables con el ambiente, que nos permitan mantener una alta productividad agrícola y eliminar el uso de productos químicos nocivos para el planeta y la salud.

Eneas Aguirre von Wobeser

Centro de Investigación y Desarrollo en Agrobiotecnología Alimentaria.

eneas.aguirre@ciad.mx

Jorge Rocha Estrada

Centro de Investigación y Desarrollo en Agrobiotecnología Alimentaria.

jorge.rocha@ciad.mx

Rosina Cabrera Ruiz

Centro de Investigación y Desarrollo en Agrobiotecnología Alimentaria.

rosina.cabrera@ciad.mx

Referencias específicas

Aguirre-von-Wobeser, E., J. Rocha-Estrada, L. R. Shapiro y M. de la Torre (2018), "Enrichment of Verrucomicrobia, Actinobacteria and Burkholderiales drives selection of bacterial community from soil by maize roots in a traditional milpa agroecosystem", *PloS One*, 13:e0208852.

Berendsen, R. L., C. M. J. Pieterse y P. A. H. M. Bakker (2012), "The rhizosphere microbiome and plant health", *Trends in Plant Science*, 17:478-486.

Cabrera, R., H. García-López, E. Aguirre-von-Wobeser, J. A. Orozco-Avitia y A. H. Gutiérrez-Saldaña (2020), "Amycolatopsis BX17: an actinobacterial strain isolated from soil of a traditional milpa agroecosystem with

potential biocontrol against *Fusarium graminearum*", *Biological Control*, 18:104285.

Rebollar, E. A., E. Sandoval-Castellanos, K. Roessler, B. S. Gaut, L. D. Alcaraz, M. Benítez y A. E. Escalante (2017), "Seasonal changes in a maize-based polyculture of central Mexico reshape the co-occurrence networks of soil bacterial communities", *Frontiers in microbiology*, 8:2478.

Rocha J. y G. Gastélum (2020), "La milpa como modelo para el estudio de la biodiversidad e interacciones planta-bacteria", *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 23:1-13.