

Señales de humo bajo la tierra: el lenguaje secreto de plantas y microbios

Underground Smoke Signals: The Secret Language of Plants and Microbes

Hexon Angel Contreras Cornejo, José Fernández Covián Náres y
Mariana Álvarez Navarrete

Resumen

Bajo nuestros pies late una red social secreta. Mucho antes de internet, las plantas y los microbios ya intercambiaban mensajes complejos para sobrevivir. Este diálogo químico ocurre en la rizosfera, donde bacterias y hongos actúan como aliados estratégicos o enemigos voraces. Mediante señales de humo moleculares, las raíces coordinan la captura de nitrógeno o lanzan alertas contra insectos herbívoros. Microbios como *Bacillus* y *Trichoderma* no sólo potencian el crecimiento vegetal, sino que también reclutan guardaespaldas naturales —como avispas parasitoides— para neutralizar plagas. Entender estas interacciones es la clave para la salud de los ecosistemas y el futuro de una agricultura sostenible. No son simples seres diminutos; son maestros de la diplomacia subterránea en una red invisible que apenas comenzamos a descifrar.

Palabras clave: comunicación planta-microbio, rizosfera, microbiología del suelo, agricultura sostenible, señalización química vegetal.

CÓMO CITAR ESTE TRABAJO

Contreras Cornejo, H. A., Covián Náres, J. F., y Álvarez Navarrete, M. (2026, febrero-abril). Señales de humo bajo la tierra: el lenguaje secreto de plantas y microbios. *Revista Digital Universitaria (RDU)*, 27(1). <http://doi.org/10.22201/ceide.16076079e.2026.27.1.9>

Abstract

A secret social network pulses beneath our feet. Long before the internet, plants and microbes were already exchanging complex messages to ensure their survival. This chemical dialogue unfolds in the rhizosphere, where bacteria and fungi act as strategic allies or voracious enemies. Through molecular smoke signals, roots coordinate nitrogen uptake or sound the alarm against herbivorous insects. Microbes such as *Bacillus* and *Trichoderma* not only boost plant growth but also recruit natural bodyguards—like parasitoid wasps—to neutralize pests. Understanding these interactions is key to ecosystem health and the future of sustainable agriculture. They are not merely tiny beings; they are masters of underground diplomacy in an invisible network we have only just begun to decode.

Keywords: plant-microbe communication, rhizosphere, soil microbiology, sustainable agriculture, plant chemical signaling.

Hexon Angel Contreras Cornejo

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Morelia, Morelia, Michoacán, México

Doctor en ciencias en biología experimental. Su labor se centra en la investigación de las interacciones bióticas de interés agroecológico; particularmente, estudia las asociaciones entre planta y microbio, así como la relación entre insectos herbívoros, plantas y microbios.

 contreras.ha@morelia.tecnm.mx

 <https://orcid.org/0000-0001-8513-2501>

José Fernando Covián Náres

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Morelia, Morelia, Michoacán, México

Doctor en ciencias en biología experimental. Sus principales intereses de investigación se enfocan en el estudio de los productos naturales y su potencial aplicación biotecnológica en diversos sectores científicos e industriales.

 jose.cn@morelia.tecnm.mx

 <https://orcid.org/0000-0001-6118-1915>

Mariana Álvarez Navarrete

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Morelia, Morelia, Michoacán, México

Doctora en ciencias en biología experimental e ingeniera bioquímica. Se desempeña como profesora titular de tiempo completo con 18 años de antigüedad; durante su trayectoria, ha realizado estancias de investigación enfocadas en la producción de ácido cítrico a partir de *Aspergillus niger* utilizando bagazo de *Agave cupreata*. Sus líneas de interés abarcan el estudio de enzimas líticas extracelulares de hongos filamentosos; el aprovechamiento de residuos agrícolas para la producción de compuestos de interés comercial; la obtención de extractos vegetales para el control de hongos fitopatógenos y el desarrollo de energías renovables. Su investigación busca encontrar aplicaciones biotecnológicas para los microorganismos rizosféricos y sus enzimas.

 mariana.an@morelia.tecnm.mx

 <https://orcid.org/0000-0002-3121-6555>

¿Las plantas y los microbios hablan entre sí?

Nuestra especie ha generado diversos sistemas de comunicación que van desde el lenguaje no verbal, el articulado y la escritura hasta el uso de la tecnología —como la radio, el teléfono e internet—; sin embargo, antes de que se desarrollaran los sistemas satelitales, los seres humanos establecieron una red remota mediante “señales de humo”. En dicho sistema, el mensaje era liberado por un grupo de personas hacia el cielo para que fuera percibido por la población receptora.

Así se estableció un código en el que los mensajes buenos o positivos eran de humo color blanco, mientras que las malas noticias o mensajes negativos eran de color oscuro o humo negro. Aunque esas señales sólo parecían simples emisiones, en realidad significaban mensajes complejos; por ello, incitaban una respuesta en su destinatario. De igual modo, los seres vivos en tierra y agua también se pueden comunicar simultáneamente con otros organismos semejantes a ellos o diferentes (Macías-Rodríguez et al., 2020). Esto ocurre a través de complejas redes de interacción que son imperceptibles para el ojo humano.

En este artículo nos enfocaremos en la comunicación que sucede a nivel químico: esa que, aunque resulte increíble, muy pocas veces notamos porque la realizan seres tan pequeños que sólo por medio del microscopio podemos observarlos. Conoceremos la “señalización” que establecen dos clases de microbios del suelo —las bacterias y los hongos— con las plantas y los insectos herbívoros.

El suelo: un escenario para las interacciones microbianas

La convivencia entre estos seres sucede en los ecosistemas —en este caso terrestres—, los cuales se consideran complejos sistemas biológicos; son los sitios en donde cohabitan diversos organismos, incluyendo microbios, plantas, insectos y animales. Todos esos seres vivos tienen una función ecológica específica y, en conjunto, colaboran y contribuyen a la vida en el planeta.

Así como ocurre entre pueblos o grupos de personas, la convivencia entre los microbios del suelo y las plantas puede ser provechosa y mutualista —pues ambos organismos asociados se benefician—, pero también dañina o perjudicial. Ejemplo de esto es el parasitismo, en donde por lo común el microbio se alimenta de las plantas o las pudre (aunque también existen plantas parásitas); asimismo, existen relaciones de competencia, de forma usual entre microbios, por más nutrientes y espacio.

De estas interacciones se establecen asociaciones bióticas: grupos que colaboran mutuamente y que impactan sobre la vida de otros organismos. Las asociaciones bióticas son una compleja red de cointeracción a diferentes niveles tróficos;¹ por ejemplo, algunas clases de microbios del suelo hacen crecer a las plantas e incrementan la producción de frutos, los que a su vez son alimento para animales y humanos.

Algunas interacciones muy comunes son las de planta-microbio y microbio-planta-insecto-depredador o parasitoide (es decir, el enemigo natural del insecto); o interacción multitrófica. En ambos tipos, la presencia de los microbios en el suelo es esencial para mantener el equilibrio y el correcto funcionamiento de los diferentes ecosistemas, pues existe una relación directa entre su presencia, la degradación de materia orgánica para la liberación de los nutrientes y el crecimiento de las plantas. Según la naturaleza de la interacción, los microorganismos o las plantas pueden enviar “mensajes químicos” a través del suelo o el aire con la información o instrucción para ejecutar una actividad ecofisiológica, como crecer o defenderse de agresores (Garnica-Vergara et al., 2016; Contreras-Cornejo et al., 2021).

Charlas diminutas: los códigos de la comunicación

Y entonces, ¿cómo son las interacciones planta-microbio? Pueden suceder sin el contacto entre ambas partes o, también, por medio de una asociación física en la que los microbios ejercen efectos positivos, neutrales o negativos sobre las plantas.

Si los efectos son positivos, las plantas pueden desarrollar un sistema de raíces muy abundante; lo que les permitirá captar mayor cantidad de agua y de nutrientes, crecer mejor y resistir condiciones ambientales adversas como la sequía, el frío, el calor extremo o el ataque de microbios dañinos e insectos herbívoros. Si el efecto es neutral, entonces no se apreciará ninguna respuesta de la planta. Por el contrario, si el efecto es negativo, la planta se verá dañada en alguna de sus partes —generalmente las raíces o el follaje— porque fue atacada por un microbio patógeno. Por ejemplo: *Pseudomonas*, una especie de bacterias, ataca a las plantas de jitomate, berenjenas y repollos; mientras que *Botrytis cinerea*, un tipo de hongo filamentoso, lo hace a las de fresa y uva.

Los científicos han descubierto que un gran número de microbios interactúan con diferentes partes de las plantas: hongos microscópicos como los micorrízicos arbusculares (HMA), los ectomicorrízicos y filamentosos de vida libre, así como los gusanos o lombrices (ver figura 1), interactúan de forma favorable en la rizosfera —es decir, en el nivel del suelo en proximidad con las raíces—. También existen especies de bacterias como *Bacillus* y otros hongos

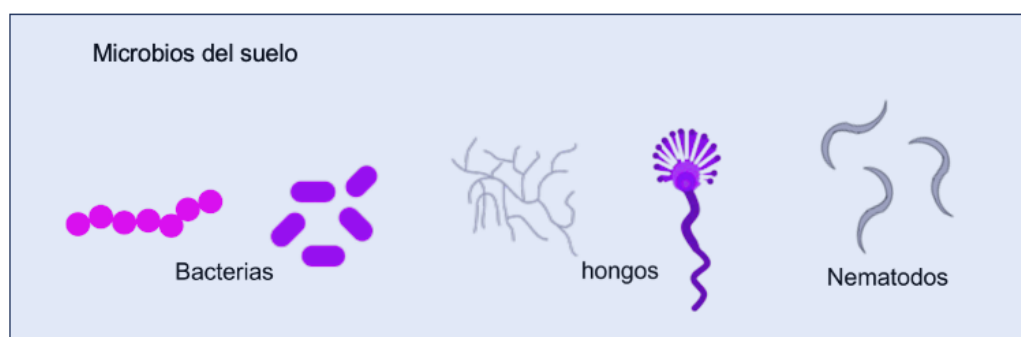
¹ Niveles tróficos: posición que ocupan los organismos dentro de un ecosistema de acuerdo con la forma en que obtienen su alimento.

como *Trichoderma* que inducen efectos positivos en las plantas, especialmente en la promoción del crecimiento y la protección contra el ataque de microbios patógenos. Más adelante, hablaremos de todos estos microbios.

En contraparte, algunas especies de bacterias son dañinas (patógenos) para las plantas, es decir, les causan enfermedades asociadas con la pudrición (necrosis) de raíces u hojas; algunas son las ya mencionadas *Pseudomonas*, pero también están las *Xanthomonas*, *Erwinia* y *Ralstonia*, y hongos filamentosos llamados *Maganaporthe*, *Colletotrichum* y *Fusarium*.

Figura 1. Microbios que cohabitan en la rizosfera, parte del suelo en el que se asocian con las raíces de las plantas.

Créditos: elaboración propia.



A continuación, conocerás algunas asociaciones que tienen las plantas y microbios entre sí y de qué manera se ayudan mutuamente.

El diálogo químico de los microbios y las plantas

Por lo común, las interacciones planta-microbio inician con un diálogo. Dicha comunicación se establece mediante el intercambio de moléculas señal que son liberadas al aire o suelo por alguno o ambos organismos, parecido a los mensajes de humo. Estos compuestos químicos pueden ser azúcares (carbohidratos), grasas (lípidos) y compuestos nitrogenados (aminoácidos) y azufrados, los cuales son liberados en el suelo o hacia la atmósfera.

Tal como la emisión de una señal de humo, el sistema de dispersión de dichas señales depende de las propiedades fisicoquímicas de las moléculas; su estructura molecular determina el tipo de aviso que lleva el compuesto, es decir, si lleva un mensaje bueno o malo hacia la planta o hacia el microbio. Varias especies de bacterias que habitan en la rizosfera, o rizobacterias, interactúan físicamente con las raíces y, durante ese proceso, estimulan el crecimiento radicular (de raíces) y foliar (de las hojas).

Un ejemplo claro son las rizobacterias *Bacillus*, pues son capaces —en un suelo ácido y con poco oxígeno— de liberar hacia la atmósfera algunos compuestos volátiles llamados acetoína y 2,3-butanediol (2,3-BD). Ambos son productos del

catabolismo (degradación) de la glucosa, un azúcar importante para la nutrición de los microbios; estos compuestos son percibidos por las raíces de la planta, la cual, a su vez, activa distintos procesos fisiológicos que promueven su crecimiento (Ryu et al., 2003).

Esto significa que la interacción física con las rizobacterias “buenas” provoca en las plantas cambios metabólicos, como la acumulación de sustancias llamadas fitoalexinas —que inhiben el crecimiento de los microbios dañinos—, y activa la producción de ciertas hormonas clave que coordinan prácticamente todos los procesos de desarrollo, incluidas las respuestas de defensa contra los organismos agresores. Además, las sustancias volátiles emitidas por las rizobacterias pueden llevar un mensaje de defensa a las plantas, lo que les permite resistir el ataque de otros microbios dañinos y, en algunos casos, de insectos herbívoros. Este es el caso de las rizobacterias llamadas científicamente *Bacillus subtilis* GB03 y *Bacillus amyloliquefaciens* IN937a, pues producen el compuesto volátil 2,3-BD en cantidades menores de 10 µg (o sea 0.00000001 kg), lo que impide o reduce que otra bacteria dañina, *Erwinia carotovora*, ataque a los follajes de *Arabidopsis thaliana* —una planta modelo que los científicos estudian en los laboratorios— (Ryu et al., 2004).

Estas asociaciones beneficiosas ocurren entre muchos tipos de plantas y microbios, pero a continuación conocerás dos casos específicos en los que se demuestra que la comunicación mutua entre distintos seres vivos es más compleja que mandar mensajes de humo: el de las rizobacterias fijadoras de nitrógeno y el de los hongos *Trichoderma*.

¿Frijoles mágicos? No, es la fijación de nitrógeno en las plantas

Las leguminosas, como el frijol, establecen asociaciones mutualistas con bacterias conocidas como rizobacterias fijadoras de nitrógeno. Estos microbios facilitan a las plantas la captación de nitrógeno mediante un proceso que implica la producción de unas moléculas señal llamadas factores Nod, que promueven la asociación raíz-bacteria. ¿Cómo ocurre esto?

Las raíces de las plantas tienen pelos radiculares que, como su nombre lo indica, son estructuras especializadas por las cuales pueden captar agua y los nutrientes necesarios de la tierra. Las rizobacterias las utilizan como reservorios y, tras un mecanismo complejo, quedan envueltas en el pelo (un proceso de nodulación o que forman nódulos); así, las bacterias son capaces de fijar o capturar el nitrógeno atmosférico (N_{2g}) y posteriormente lo convierten en amonio (NH_4), un nutriente clave que la planta absorbe por medio del contacto físico.

Otra clase de compuestos que participan en el diálogo entre las rizobacterias y las raíces son los flavonoides, un tipo de metabolitos liberados que también se



involucran en el proceso de nodulación con la rizobacteria llamada *Rhizobium meliloti* (Walker et al., 2003). En este intercambio, la percepción temprana —o quimiopercepción— de los flavonoides por parte del microbio es la que inicia el proceso de nodulación, al atraer a la bacteria hacia el pelo radicular. Asimismo, los hongos ectomicorrícicos también juegan un papel importante en la movilización de nitrógeno del suelo hacia la planta con la que interactúan, un fenómeno observado en bosques del hemisferio norte. En ese proceso, los hongos participan en la descomposición de materia orgánica o de materia mineral-orgánica para liberar el nutriente y luego permitir su captación por las plantas.

También se ha descubierto que algunos hongos micorrízicos arbusculares (HMA) liberan factores Myd para impulsar una asociación simbiótica² entre el hongo y la raíz. Este es un caso sobresaliente porque los HMA dependen de la planta, ya que sus esporas³ no pueden germinar y el crecimiento de la hifa⁴ se ve limitado sin una específica señal liberada por las raíces del huésped.

Esta señal única que promueve la ramificación se conoce como factor de ramificación; es producida y liberada en el suelo en muy bajas concentraciones, pero fomenta la germinación, ramificación y crecimiento del micelio⁵ hacia donde se encuentra la raíz huésped. Es el caso de la interacción de la planta leguminosa *Lotus japonicus* y el HMA *Gigaspora margarita* (Akiyama et al., 2005) en el que, una vez localizada la raíz huésped, los hongos la colonizan y forman unas estructuras especializadas llamadas arbusculos dentro de las células vegetales (ver figura 2).

² Asociación simbiótica planta-microbio: estrecha asociación física entre ambos organismos en donde los dos obtienen beneficios, principalmente alimento y protección. La simbiosis entre HMA con su huésped es distinta a las que forman con especies de *Trichoderma* endófitas, debido a que los HMA requieren vivir dentro de su huésped para completar su ciclo de vida, mientras que los hongos de vida libre no.

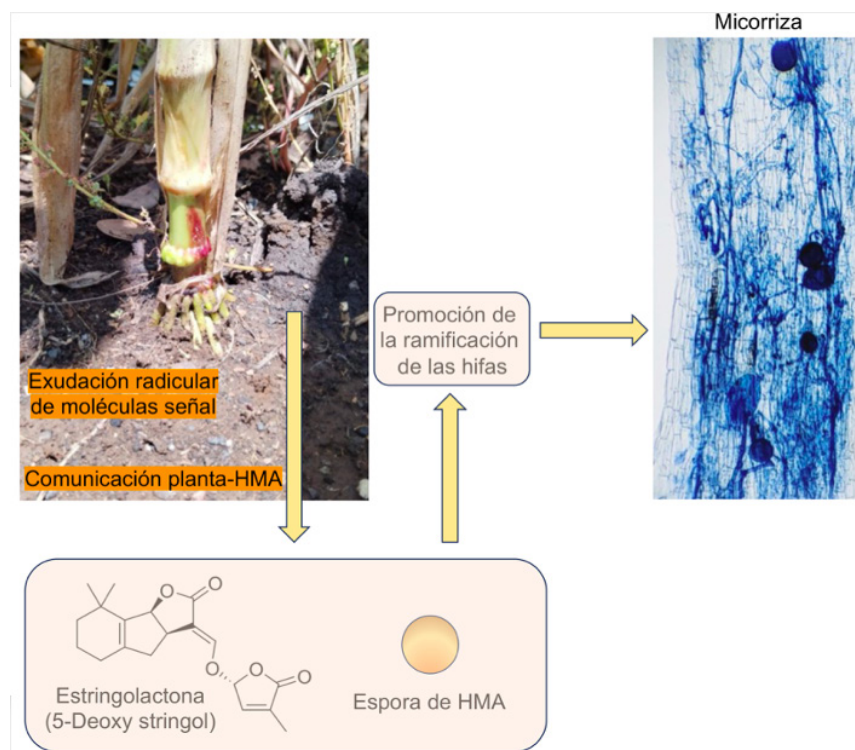
³ Espora: estructura unicelular de resistencia y reproducción.

⁴ Hifa: filamento fúngico que, en conjunto, conforma la estructura del micelio.

⁵ Micelio: estructura transparente en forma de pelo que resulta de la germinación de una espora y forma una compleja red.

Figura 2. Interacción del maíz con hongos micorrízicos arbusculares. Esta asociación benéfica implica la exudación radicular de metabolitos de naturaleza lipídica, los cuales son percibidos por las esporas fúngicas donde activan el crecimiento de las hifas y se favorece la colonización radicular. Durante la interacción física entre ambos organismos, también se forman dentro de la célula huésped arbusculos fúngicos.

Créditos: tinción y fotografía por Andrea I. Raya-Hernández; elaboración propia.



Trichoderma al rescate: el crecimiento de las plantas

En la rizosfera habitan grandes comunidades de hongos microscópicos que incluyen a *Trichoderma*: un género de hongos filamentosos de gran importancia ecológica, biotecnológica y médica, sin mencionar sus múltiples funciones en los ecosistemas terrestres y sus efectos benéficos para las plantas. Estos incluyen la promoción del crecimiento vegetal y la modulación de las raíces, lo que resulta en una gran ventaja para aquellas especies en condiciones de escasez de agua o sequía.

La interacción entre *Trichoderma* y las plantas huéspedes inicia con la liberación de una compleja mezcla de moléculas señal, constituida en parte por azúcares simples —como la arabinosa, xilosa, glucosa, mioinositol, fructosa y el disacárido sacarosa— que sirven como fuente nutricional para el hongo y señal para indicar el sitio de origen donde la raíz formará la asociación física (Macías-Rodríguez et al., 2018).

Trichoderma también establece diálogos moleculares con las raíces de su huésped mediante la liberación de auxinas (hormonas vegetales que regulan su crecimiento), como el ácido indol-3-acético (AIA; ver figura 3). Esta modulación del desarrollo de las raíces con frecuencia también involucra la producción de etileno (ET), un compuesto volátil que es liberado por el micelio del hongo; este actúa de forma independiente o combinado con el AIA para ajustar la formación de los pelos radiculares.

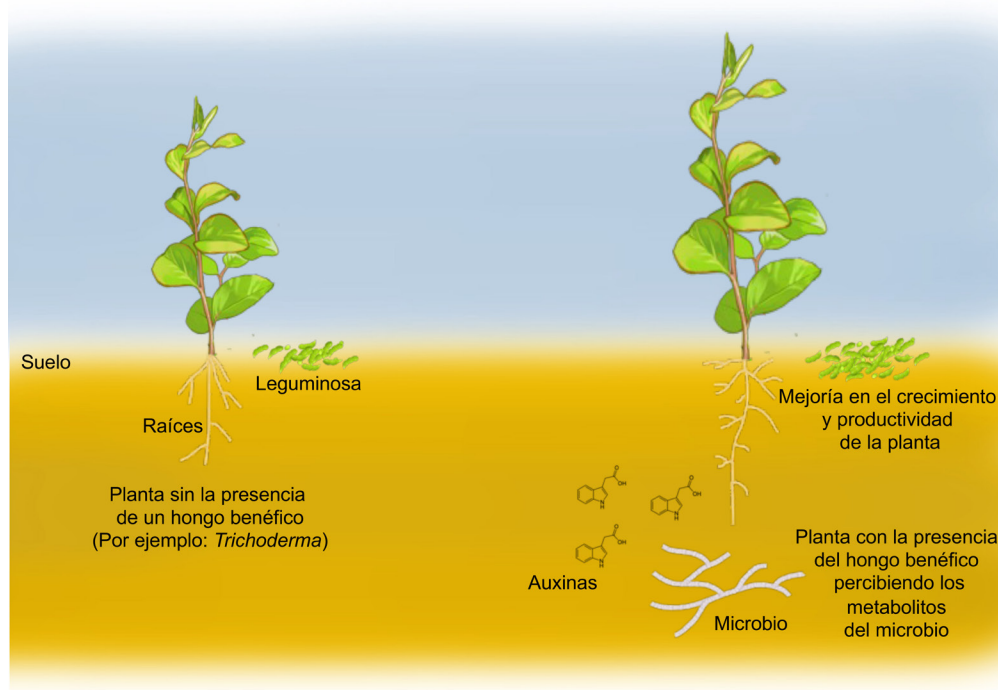


Figura 3. Función ecológica del ácido indol-3-acético (también conocido como auxina) producido por algunas bacterias y hongos. La auxina induce el crecimiento y desarrollo de las raíces.

Crédito: elaboración propia.

Varias especies de *Trichoderma* producen un metabolito volátil llamado 6-pentyl-2H-pyran-2-one (6-PP) que al olfato humano tiene un aroma dulce muy similar al aceite de coco. Cuando este compuesto es liberado en el suelo y percibido por las plantas, también induce la formación de nuevas raíces y pelos radicales. Se conoce que a nivel molecular la 6-PP actúa modulando el transporte de auxinas en el tejido radicular, lo que mejora la señalización de dicha hormona durante el crecimiento (Garnica-Vergara et al., 2016).

Comunicaciones complejas: las interacciones multitróficas

En cuanto a las interacciones multitróficas —denominadas así porque implican organismos que se encuentran en diferentes niveles tróficos y en diferentes reinos—, son de interés ecológico debido a que la mitad de los seis millones de especies de insectos son herbívoros. En numerosos casos, las plantas liberan compuestos volátiles que codifican señales específicas para repelerlos o atraer a sus enemigos naturales (ver figura 4).

Los hongos *Trichoderma* también participan en estos diálogos. El metabolito 6-PP producido por ellos puede desplazarse por grandes distancias del suelo hacia la atmósfera junto con el compuesto volátil 1-octen-3-ol (C8-OH, también producido por el hongo), por lo que insectos herbívoros como el gusano cogollero (cuyo nombre científico es *Spodoptera frugiperda*) lo perciben.

Ambos compuestos reducen el daño que el gusano realiza en las hojas de las plantas porque el C8-OH ataca al sistema digestivo del insecto, lo que provoca un daño semejante a la necrosis (muerte celular de un tejido; Contreras-Cornejo et al., 2018a).

Otro caso, también de *Trichoderma*, es el de la especie *atroviride*: en la naturaleza, el gusano cogollero tiene varios enemigos naturales como las avispa hembra (*Campoletis sonorensis*), parásitos para él. *T. atroviride* se asocia con las raíces del maíz y el 6-PP para atraer a las hembras de *C. sonorensis* y que estas parasiten a las larvas del gusano que se encuentran alimentándose de las hojas del maíz (Contreras-Cornejo et al., 2018b).

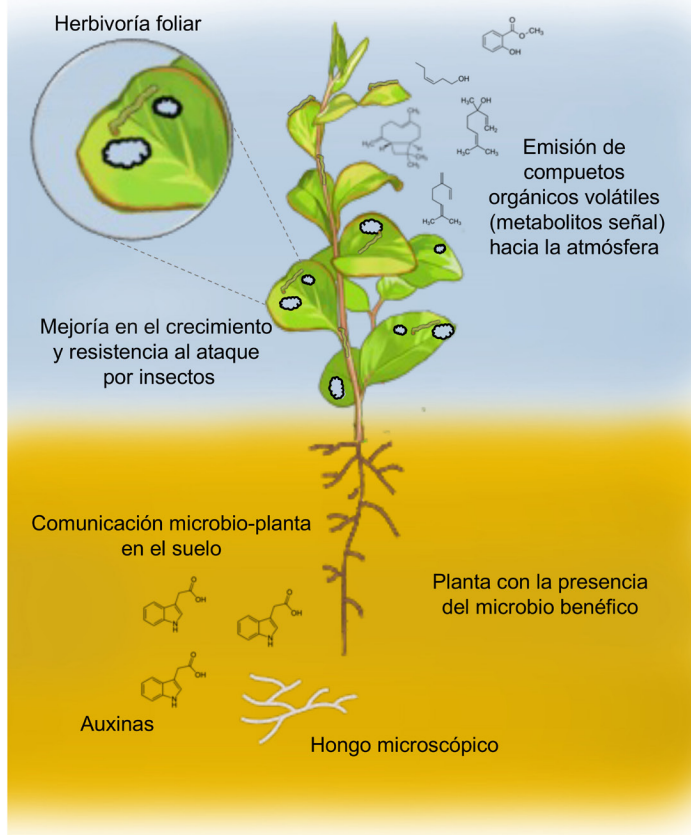


Figura 4. Participación de los microbios beneficiosos del suelo en la resistencia al ataque por insectos herbívoros. Cuando una planta es dañada por un insecto, la planta responde liberando hacia el aire sustancias que alertan a las plantas vecinas de que ha sido atacada. La emisión de esos volátiles se puede incrementar por la presencia de los microbios del suelo.

Crédito: elaboración propia.

Por otro lado, se sabe que algunos compuestos volátiles producidos por bacterias endófitas (que viven dentro de los tejidos de las plantas) pueden incrementar la resistencia al ataque por microbios patógenos. Un caso particular es el de la bacteria denominada *Enterobacter aerogenes*, la cual libera una sustancia volátil llamada 2,3-BD en plantas de maíz; esta incrementa su resistencia al ataque del hongo patógeno *Setosphaeria turcica*. Además, cuando la sustancia se libera desde el suelo y en presencia de una comunidad microbiana, es capaz de atraer a una avispa parasitoide, *Cotesia marginiventris*, enemiga natural de un insecto herbívoro llamado *Spodoptera littoralis* (D'Alessandro et al., 2014), una palomita que se come al maíz y otros cultivos.

Más que señales: comunicaciones complejas

Para resumir, sabemos que en el suelo habitan incontables comunidades de microbios: algunos con efectos dañinos o benéficos sobre las plantas, mientras que otros impactan sobre su crecimiento y productividad vegetal. El progreso y el desenlace del tipo de interacción está modulado por la emisión de moléculas que transmiten un mensaje —similar a una señal de humo— que, cuando es percibido por el organismo receptor, desencadena una respuesta a nivel molecular que posteriormente será evidenciada por una respuesta ecofisiológica.

El entendimiento de los metabolitos microbianos representa un hallazgo muy importante en los campos de la ecología química, entomología, microbiología ambiental, farmacología y en la agricultura; permite conocer un poco más sobre el papel de dichas sustancias durante los complejos procesos de comunicación entre reinos.

Sin embargo, todavía queda mucho por descubrir sobre la comunicación planta-microbio, debido a que hay al menos 1000 compuestos producidos por 400 tipos de bacterias y hongos que pueden tener una función ecológica (Piechulla y Degenhardt, 2014) durante este período de investigación. Además, no olvidemos que todas estas interacciones son de vital importancia para mantener un equilibrio ecológico en los distintos ecosistemas —especialmente los terrestres—, en los que conviven plantas, microbios, insectos y otros animales; por ello, las alteraciones en ellos repercuten de forma negativa para todos.

Referencias

- ❖ Akiyama, K., Matsuzaki, K., y Hayashi, H. (2005, 9 de junio). Plant sesquiterpenes induce hyphal branching in arbuscular mycorrhizal fungi. *Nature*, 435, 824-827. <https://doi.org/10.1038/nature03608>

- ❖ Contreras-Cornejo, H. A., del-Val, E., Macías-Rodríguez, L., Alarcón, A., González-Esquivel, C. E., y Larsen, J. (2018a, julio). *Trichoderma atroviride*, a maize root associated fungus, increases the parasitism rate of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* by its natural enemy *Campoletis sonorensis*. *Soil Biology and Biochemistry*, 122, 196-202. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.04.013>
- ❖ Contreras-Cornejo, H. A., Macías-Rodríguez, L., del-Val, E., y Larsen, J. (2018b, marzo). The root endophytic fungus *Trichoderma atroviride* induces foliar herbivory resistance in maize plants. *Applied Soil Ecology*, 124, 45-53. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.10.004>
- ❖ Contreras-Cornejo, H. A., Macías-Rodríguez, L., Real-Santillán, R. O., López-Carmona, D., García-Gómez, G., Galicia-Gallardo, A. P., Alfaro-Cuevas, R., González-Esquivel, C. E., Najera-Rincón, M. B., Adame-Garnica, S. A., Rebollar-Alviter, A., Álvarez-Navarrete, M., y Larsen, J. (2021, 13 de abril). In a belowground multitrophic interaction, *Trichoderma harzianum* induces maize root herbivore tolerance against *Phyllophaga vetula*. *Pest Management Science*, 77(9), 3952-3963. <http://dx.doi.org/10.1002/ps.6415>
- ❖ D'Alessandro, M., Erb, M., Ton, J., Brandenburg, A., Karlen, D., Zopfi, J., y Turlings, T. C. J. (2014, abril). Volatiles produced by soil-borne endophytic bacteria increase plant pathogen resistance and affect tritrophic interactions. *Plant, Cell and Environment*, 37(4), 813-826. <https://doi.org/10.1111/pce.12220>
- ❖ Garnica-Vergara, A., Barrera-Ortiz, S., Muñoz-Parra, E., Raya-Gonzalez, J., Méndez-Bravo, A., Macías-Rodríguez, L., Ruiz-Herrera, L. F., y López-Bucio, J. (2016, marzo). The volatile 6-pentyl-2H-pyran-2-one from *Trichoderma atroviride* regulates *Arabidopsis thaliana* root morphogenesis via auxin signaling and ETHYLENE INSENSITIVE 2 functioning. *New Phytologist*, 209(4), 1496-1512. <https://doi.org/10.1111/nph.13725>
- ❖ Macías-Rodríguez, L., Contreras-Cornejo, H. A., Adame-Garnica, S. G., del-Val, E., y Larsen, J. (2020). The interactions of *Trichoderma* at multiple trophic levels: Inter-kingdom communication. *Microbiological Research*, 240, 126552. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126552>
- ❖ Macías-Rodríguez, L., Guzmán-Gómez, A., García-Juárez, P., y Contreras-Cornejo, H. A. (2018, 14 de julio). *Trichoderma atroviride* promotes tomato development and alters the root exudation of carbohydrates, which stimulates fungal growth and the biocontrol of the phytopathogen *Phytophthora cinnamomi* in a tripartite interaction system. *FEMS Microbiology Ecology*, 94(9), fty137. <https://doi.org/10.1093/femsec/fty137>
- ❖ Piechulla, B., y Degenhardt, J. (2014, abril). The emerging importance of microbial volatile organic compounds. *Plant Cell and Environment*, 37(4), 811-812. <https://doi.org/10.1111/pce.12254>
- ❖ Ryu, C.-M., Farag, M. A., Hu, C.-H., Reddy, M. S., Kloepper, J. W., y Paré, P. W. (2004, marzo). Bacterial volatiles induce systemic resistance in *Arabidopsis*. *Plant Physiology*, 134(3), 1017-1026. <https://doi.org/10.1104/pp.103.026583>



- ❖ Ryu, C.-M., Farag, M. A., Hu, C.-H., Reddy, M. S., Wei, H.-X., Paré, P. W., y Kloepper, J. W. (2003, 8 de abril). Bacterial volatiles promote growth in *Arabidopsis*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 100(8), 4927-4932. <https://doi.org/10.1073/pnas.0730845100>
- ❖ Walker, T. S., Bais, H. P., Grotewold, E., y Vivanco, J. M. (2003, 1 de mayo). Root exudation and rhizosphere biology. *Plant Physiology*, 132(1), 44-51. <https://doi.org/10.1104/pp.102.019661>