

El lenguaje secreto de plantas, microbios e insectos herbívoros

Francisco Javier Zavala Mazariegos^{1*} y Julio C. Rojas¹

¹ Departamento de Ecología y Manejo de Artrópodos, El Colegio de la Frontera Sur

* Dirección para correspondencia: fco.javi.031095@gmail.com

Solemos ser víctimas de una ilusión óptica al mirar a las plantas. Nuestra escala temporal es diferente, pues nosotros nos movemos en segundos; ellas no. Esta brecha de percepción nos ha llevado, durante siglos, a tratarlas como organismos pasivos, casi como parte del mobiliario del paisaje. En la escuela aprendimos una versión simplificada: la planta crece, absorbe luz y la transforma en energía química mediante la fotosíntesis, usando agua del suelo y dióxido de carbono del aire. Como resultado, se forman azúcares y se libera oxígeno a la atmósfera. Cuando un insecto fitófago interactúa con una planta, imaginamos una relación lineal y predecible: la planta como fuente de alimento y el insecto como consumidor.

Pero esa historia es apenas el prólogo de un *thriller* biológico; en realidad, bajo el suelo y sobre las hojas, se libra una guerra de información constante, donde los soldados son microscópicos y las armas son moléculas invisibles que viajan por el aire. Si pudiéramos mejorar nuestra percepción y ver los flujos químicos, podríamos ver un bosque como un entorno dinámico donde circulan continuamente señales químicas entre organismos.

Hoy en día, la ecología y la botánica están desafiando la idea de la "planta solitaria". Durante muchos años hemos estudiado las plantas en macetas con tierra

limpia, bajo luces controladas y separadas de su entorno natural. Es como si quisiéramos entender la sociología analizando a una persona encerrada en una habitación blanca, sin interacción con otros. Hoy sabemos que una planta sin sus microbios es, en realidad, una planta incompleta, una sombra de lo que debería ser en la naturaleza.

El despertar del holobionte

Actualmente, la biología está experimentando importantes cambios conceptuales derivados del estudio de las asociaciones entre organismos y sus microorganismos. Uno de los conceptos que ha cobrado relevancia es el de holobionte, que propone analizar a los organismos multicelulares junto con las comunidades microbianas que los acompañan. Aunque este enfoque ha impulsado numerosas investigaciones en ecología y biología evolutiva, su alcance conceptual y evolutivo continúa siendo objeto de debate científico (Simon *et al.*, 2019). Este término se refiere a los organismos como ensamblajes de múltiples especies que funcionan de manera tan integrada que es imposible entender a una sin las otras (Margulis y Fester, 1991; Simon *et al.*, 2019). Para imaginarlo, piensa en la planta como un rascacielos. Los tejidos vegetales, el tallo, las hojas y las raíces son como la estructura de acero y cristal, pero los habitantes (billones de bacterias, hongos, arqueas y virus) son quienes se encargan de los sistemas de seguridad, el mantenimiento, la limpieza y, sobre todo, la comunicación externa.

Estos microorganismos no están ahí por casualidad; han evolucionado junto con la planta durante millones de años, viviendo en lugares específicos con una precisión impresionante.

La rizósfera es el "barrio" más densamente poblado del planeta. Es la delgada capa de suelo que rodea las raíces; aquí, la planta actúa como un generoso anfitrión, liberando azúcares y aminoácidos para alimentar a una población microbiana selecta. No es caridad, es un pago por servicios de protección y extracción de nutrientes.

Luego está la filósfera, la superficie de las hojas, un entorno extremo expuesto a la radiación UV, cambios bruscos de temperatura y falta de agua. Los microbios que viven aquí actúan como un "protector solar" biológico y como una primera línea de defensa contra esporas de hongos patógenos.

Por último, encontramos la endosfera, el interior donde algunos microbios viven literalmente dentro de las células o en los espacios entre ellas. Estas asociaciones presentan distintos grados de intimidad biológica y no necesariamente implican colonización intracelular.

Bajo este nuevo enfoque, al mencionar "la salud de un bosque" nos referimos a la salud de millones de interacciones invisibles. Una planta con un microbioma pobre es como un rascacielos sin trabajadores; puede parecer en buen estado por fuera, pero sus sistemas internos no funcionan bien.

La red de comunicación química entre organismos

Si el holobionte es la parte física, los compuestos orgánicos volátiles son el *software* que facilita la comunicación. Las plantas son expertas en química y funcionan como laboratorios vivos que producen cientos de moléculas. Sin embargo, muchas de estas moléculas no permanecen en la planta, sino que se liberan al aire como compuestos volátiles.

Cuando una oruga muerde una hoja, no solo causa un daño físico; además deposita en los tejidos vegetales compuestos presentes en su saliva y secreciones orales. Las plantas pueden reconocer estas señales asociadas a la herbivoría y activar respuestas defensivas específicas. Entre ellas destaca la emisión de compuestos orgánicos volátiles inducidos por herbivoría, los cuales participan en la comunicación con otras plantas y en la atracción de enemigos naturales de los herbívoros. Lo más fascinante es la claridad del lenguaje que utilizan. Una planta de maíz, por ejemplo, libera un "perfume" diferente si una oruga masticadora la ataca, en comparación con cuando un pulgón la está succionando. Esta comunicación molecular tiene tres receptores principales:

1. Otras hojas de la misma planta: para que las ramas que aún no han sido dañadas preparen sus defensas químicas antes de que llegue la oruga.
2. Plantas cercanas: en un acto de "solidaridad" (o espionaje químico), las plantas cercanas perciben el peligro y comienzan a producir toxinas para protegerse.

3. Los enemigos de sus enemigos: este es el punto más sorprendente. Las plantas atraen enemigos naturales, como parasitoides o depredadores. El olor es un mensaje para el enemigo: "Aquí hay una oruga; ven y pon tus huevos en ella". La planta se vuelve un emisor activo que contrata enemigos naturales para su defensa.

La partitura de la rizósfera

Si miramos al suelo, la complejidad crece porque en la rizósfera existe una actividad que controla la estabilidad de los ecosistemas. Como mencionamos, las plantas gastan mucha energía en alimentar a sus microbios (Olimi *et al.*, 2025). ¿Por qué una planta, que necesita cada rayo de sol, daría parte de su alimento a los microbios del suelo? La clave está en el entrenamiento.

Los microbios de las raíces actúan como "entrenadores personales" del sistema inmune de las plantas. Mediante un proceso llamado Resistencia Sistémica Inducida (ISR) (Pieterse *et al.*, 1996), algunas bacterias beneficiosas (como *Pseudomonas fluorescens*) mantienen a la planta en un estado de "alerta máxima" sin llegar a enfermarla (el equivalente biológico a una vacuna).

Diversos estudios han demostrado que determinados microorganismos pueden inducir en las plantas un estado de preparación de sus defensas, conocido como *priming* defensivo, que les permite responder de manera más rápida y eficiente frente a ataques posteriores. No obstante, la intensidad de esta respuesta

depende del sistema biológico estudiado y de las condiciones ambientales. En algunos casos, este "cebado" microbiano no solo incrementa la resistencia de las plantas frente a insectos herbívoros, sino que también mejora su tolerancia a la sequía y al calor extremo. Así, el microorganismo no solo favorece la absorción de nutrientes como fósforo y nitrógeno, sino que también activa mecanismos bioquímicos que ayudan a la planta a enfrentar un ambiente hostil.

El contraataque de los insectos

En esta guerra biológica, los insectos no son solo víctimas pasivas de las defensas químicas de las plantas. La interacción entre plantas e insectos puede compararse con una carrera armamentista sin fin. Los fitófagos han desarrollado estrategias de infiltración que parecen sacadas de una película de espionaje.

La estrategia más interesante no es física, sino microbiológica. Los insectos también tienen sus propios aliados invisibles. Investigaciones recientes han revelado que muchos insectos, como ciertas especies de orugas y escarabajos, portan bacterias específicas en su saliva (Sun *et al.*, 2025). Al morder una hoja, el insecto deja estas bacterias en la herida. ¿El objetivo? Engañar al sistema de vigilancia de la planta.

Las plantas cuentan con dos "centrales de alarma" principales: la ruta del ácido jasmónico, que se activa cuando sufren daños físicos, como mordeduras de insectos o ataques de hongos que causan necrosis; y la ruta del ácido salicílico, que

se activa ante ataques de insectos chupadores de savia y patógenos como bacterias y virus.

Aunque en muchos casos presentan respuestas contrastantes, la naturaleza de esta interacción depende del organismo atacante y del contexto fisiológico de la planta. En este caso, los insectos masticadores introducen bacterias durante la alimentación, las cuales activan la vía de defensa mediada por el ácido salicílico, asociada con la respuesta frente a patógenos (Chung *et al.*, 2013). La planta, confundida, responde como si estuviera siendo atacada por un patógeno y atenúa sus defensas contra los insectos. Mientras destina sus recursos a combatir una infección que no existe, el insecto puede alimentarse sin enfrentar las defensas que normalmente lo detendrían. La bacteria asociada al insecto actúa así como un mecanismo de manipulación molecular, lo que muestra que la comunicación química de la planta puede ser sabotada desde su interior.

La agricultura del silencio y el costo oculto de la modernidad

En el último siglo, la agricultura industrial ha operado bajo una premisa reduccionista. Hemos tratado a las plantas cultivables como máquinas de producción masiva, creyendo que, si les proporcionamos los químicos necesarios (nitrógeno, fósforo y potasio) y eliminamos a sus enemigos y competidores con pesticidas, serán más productivas. Este enfoque, sin duda, ha incrementado la productividad agrícola. Sin embargo, también ha generado problemas: hemos

contaminado el medio ambiente y "ensordecido" a las plantas cultivables. El uso excesivo de fertilizantes sintéticos cambia drásticamente la composición del suelo. Cuando una planta recibe nitrógeno "fácil" en forma de sales minerales, puede dejar de liberar los azúcares y compuestos necesarios para su microbioma aliado. ¿Por qué gastar energía alimentando a bacterias que obtienen nutrientes si el ser humano se los ofrece sin costo?

El problema es que, si la planta deja de alimentar a los microbios, también puede perder la protección que ellos le brindan. Un estudio clave advierte que el uso excesivo de fertilizantes no solo empobrece el suelo, sino que también altera la microbiota intestinal de los propios insectos plaga, lo que los hace más resistentes a los pesticidas (Hu *et al.*, 2022).

Corremos el riesgo de desarrollar plantas con una menor capacidad para interactuar con su microbioma y de pedir ayuda (*cry for help*) a microorganismos benéficos y, al mismo tiempo, insectos "superpoderosos" que ya no enfrenten resistencia en el agroecosistema. La agricultura moderna puede convertirse en un escenario de silencio biológico, donde el internet de las plantas está siendo desconectado por el ruido de los agroquímicos.

Cambio climático y la pérdida de la sintaxis química

El cambio climático no es solo un problema de calor o sequía; es una amenaza directa a la gramática del lenguaje vegetal. Los volátiles son moléculas muy

sensibles a las condiciones físicas. Un ligero aumento de la temperatura ambiental cambia la velocidad a la que estas moléculas se evaporan y la forma en que se dispersan en el aire.

Estudios recientes sugieren que el aumento del CO₂ y del ozono en la superficie actúa como un "ruido blanco" que puede afectar las señales olorosas (Olimi *et al.*, 2025). Imagina que intentas pedir ayuda gritando en una discoteca donde la música suena muy fuerte. Así podría sentirse una planta hoy o en el futuro.

Si una planta envía una señal de auxilio para atraer al depredador de su enemigo, pero el ozono altera la estructura química de esa señal o el viento caliente la dispersa antes de que llegue a quien debe recibirla, la cadena de auxilio se interrumpe. Este fenómeno se conoce como desacoplamiento químico. Los actores (la planta, el microbio y el insecto) están presentes, pero ya no se entienden. Este cortocircuito en la comunicación, junto con otros factores, puede ser una de las razones por las que surgen plagas inesperadas y se produce el colapso de servicios ecosistémicos, como la polinización, que antes considerábamos normales.

Biotechnología del futuro y los probióticos que pueden salvar al campo

Si el problema de la agricultura moderna ha sido el "silencio biológico", la solución que sugiere la ciencia actual es devolverles la voz a las plantas. Una de las estrategias emergentes consiste en el diseño de comunidades microbianas sintéticas (SynComs), capaces de favorecer procesos benéficos para las plantas

mediante la manipulación dirigida del microbioma. Este enfoque, mencionado en investigaciones recientes, busca identificar a aquellas bacterias y hongos que mejor activan las defensas de la planta y reintroducirlos de manera estratégica (Olimi *et al.*, 2025). Es como darle probióticos a un suelo agotado.

Al tratar las semillas con estos consorcios microbianos, hacemos que la planta nazca y crezca ya "conectada" a su red de apoyo. Estos microbios no solo ayudarían a absorber fósforo o nitrógeno de manera natural, sino que también amplificarían la señal química de auxilio. Si una oruga ataca, una planta tratada con SynComs emitirá una señal de ayuda fuerte y clara que atraerá a depredadores y polinizadores con una eficiencia que los humanos no podrían imitar mediante productos químicos.

La planta como red social

Llegados a este punto, debemos preguntarnos: ¿es útil seguir viendo a la planta como un objeto? La evidencia científica reciente nos lleva a considerarla como un nodo en una red social hiperconectada. Cada hoja es un "post" químico, cada aroma es un mensaje directo y cada microbio actúa como un moderador que aprueba o censura la conversación.

Este cambio de visión tiene importantes implicaciones éticas. Si la planta es un holobionte, entonces nuestra relación con la naturaleza debe ser colaborativa en lugar de extractiva. No solo se trata de salvar a los árboles; debemos proteger las

interacciones que ocurren entre ellos y sus microbios. La salud de los ecosistemas depende de múltiples factores ecológicos, entre ellos la biodiversidad, la estabilidad funcional y las interacciones que ocurren entre los organismos que los integran (Sun *et al.*, 2025).

Comprender que no somos seres aislados, sino que estamos conectados en redes de vida, es quizá la lección más importante que el lenguaje oculto de las plantas tiene para enseñarnos en este siglo de crisis climática.

El fin de la soledad vegetal

Hemos recorrido un camino que va desde la superficie de una hoja masticada por un insecto hasta las profundidades de la raíz, y la conclusión es clara: las plantas nunca han estado solas. Su silencio aparente es solo nuestra incapacidad para sintonizar su frecuencia.

Hoy, gracias a la genómica y a la ecología química, comenzamos a comprender ese código. Estamos descubriendo que la comunicación química entre plantas, microbios e insectos no es solo algo que nos intriga, sino algo esencial para sobrevivir.

En un mundo que se calienta y cuyas señales químicas están desapareciendo, nuestra mejor oportunidad para crear un futuro resiliente no está en una nueva molécula sintética, sino en el respeto y la restauración de los

microorganismos e individuos involucrados en estas interacciones que, durante millones de años, han mantenido el equilibrio de la vida en la Tierra.

La próxima vez que pases junto a una planta, recuerda: no estás viendo a un ser pasivo; estás ante una antena viva, vibrando en un lenguaje de aromas que apenas estamos empezando a comprender.

Referencias

Bordenstein SR, Theis KR (2015). Host biology in light of the microbiome: ten principles of holobionts and hologenomes. *PLOS Biology* 13(8):1002226.

Chung SH, Rosa C, Scully ED *et al.* (2013). Herbivore exploits orally secreted bacteria to suppress plant defenses. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110(39):15728-15733.

Hu L, Robert CA, Cadot S *et al.* (2022). Overuse of nitrogen fertilizer alters insect gut microbiota and enhances insecticide tolerance. *Journal of Pest Science* 95(1):125-138.

Margulis L and Fester R (Eds.) (1991). *Symbiosis as a source of evolutionary innovation: speciation and morphogenesis*. Cambridge, MA: MIT Press.

Olimi E, Minchev G, Kostov K *et al.* (2025). Plant microbiome responses to bioinoculants and volatiles: a multi-compartment study. *Frontiers in Plant Science* 16:114520.

Pieterse CM, van Wees SC, Hoffland E *et al.* (1996). Systemic resistance in Arabidopsis induced by biocontrol bacteria is independent of salicylic acid accumulation and pathogenesis-related gene expression. *The Plant Cell* 8(8):1225–1237.

Salim KA, Al-Gharaibeh M, Hijazin R and Al-Ani LKT (2022). Epigenetic regulation of root-associated microbiota. *Plants* 11(15):2010.

Simon JC, Marchesi JR, Mougel C and Selosse MA (2019). Host-microbiota interactions: from holobiont theory to investigative biology. *Molecular Ecology* 28(8):1881-1894.

Sun X, Wang Y, Chen J and Lu Y (2025). The microbiome as a driver of insect physiology and olfactory behavior. *Current Opinion in Insect Science* 67:101150.

Vives-Peris V, de Ollas C, Gómez-Cadenas A and Pérez-Clemente RM (2020). Root exudates: from plant to rhizosphere and beyond. *Plant Cell Reports* 39(1):3-17.

Manuscrito aceptado