

DE SEÑALES PEQUEÑAS A GRANDES CAMBIOS: EL PAPEL CRUCIAL DE UN PEQUEÑO PÉPTIDO SEÑAL EN LA RESPUESTA VEGETAL A VOLÁTILES MICROBIANOS

FROM SMALL SIGNALS TO BIG CHANGES: THE CRUCIAL ROLE OF A SMALL SIGNALING PEPTIDE IN PLANT RESPONSES TO MICROBIAL VOLATILES

por RAFAEL JORGE LEÓN MORCILLO

INSTITUTO DE HORTOFRUTICULTURA SUBTROPICAL Y MEDITERRÁNEA "LA MAYORA". CSIC-UMA-IHSM.

Palabras clave: compuestos volátiles microbianos, etileno, péptido señal, RALF.

Keywords: microbial volatile compounds, ethylene, signaling peptide, RALF.

Resumen: La interacción entre plantas y microorganismos implica una comunicación química bidireccional, esencial en las primeras etapas de la simbiosis. Las plantas y los microorganismos emiten señales químicas para atraer o advertir sobre su presencia. Entre estas señales, los microorganismos producen y emiten compuestos volátiles. Estos compuestos no solo son esenciales para el establecimiento de simbiosis, sino que también inducen el crecimiento vegetal y la tolerancia al estrés. Además, los compuestos volátiles microbianos pueden modular la arquitectura del sistema radicular. Estos cambios están relacionados con la reprogramación del proteoma de la raíz y la modulación de las rutas de señalización de etileno y auxinas. Un componente clave en la modificación de la morfología radicular es el péptido señal RALF22 y su receptor FERONIA, esenciales para el estiramiento y proliferación de pelos radiculares. Además, el etileno fúngico es crucial en estos procesos, ya que su producción es necesaria para la inducción de cambios morfológicos en las raíces.

Abstract: *The interaction between plants and microorganisms involves bidirectional chemical communication, which is essential during the early stages of symbiosis. Both plants and microorganisms emit chemical signals to attract or alert their presence. Among these signals, microorganisms produce and release volatile compounds. These compounds are not only crucial for establishing symbiosis but also induce plant growth and stress tolerance. Furthermore, microbial volatile compounds can modulate root system architecture. These changes are associated with the reprogramming of the root proteome and the modulation of ethylene and auxin signaling pathways. A key component in modifying root morphology is the signaling peptide RALF22 and its receptor FERONIA, which are essential for root hair elongation and proliferation. In addition, fungal ethylene plays a crucial role in these processes, as its production is required to induce morphological changes in roots.*

El establecimiento de cualquier asociación entre plantas y microorganismos implica una comunicación química o señalización entre ambos organismos. Dicha señalización puede ocurrir en diferentes direcciones, de plantas a microorganismos, de microorganismos a plantas o entre microorganismos, para actuar de forma cooperativa en el establecimiento de la interacción. En los primeros estadios del establecimiento de una simbiosis, estas señales van encaminadas a atraer y/o advertir de la presencia de cada uno de los socios de la interacción. Así, dependiendo de las señales percibidas por la planta, ésta debe discernir entre microorganismos beneficiosos o patógenos -o no beneficiosos- para permitir o restringir, mediante la modulación de su sistema defensivo, la formación de la interacción (1). Si bien, las plantas también producen y secretan al medio compuestos químicos derivados de su metabolismo para atraer a microorganismos que les puedan aportar beneficios (2). Entre

las señales que emiten los microorganismos durante esta fase previa al contacto físico o fase de precolonización se encuentran sustancias de muy diversa naturaleza como azúcares, aminoácidos, pequeños péptidos, hormonas similares a las producidas por las plantas o compuestos volátiles. Estos últimos funcionan como mensajeros infoquímicos a larga distancia y participan no solo en los procesos de señalización entre planta y microorganismos, sino también entre microorganismos facilitando la comunicación intercelular y la detección de otros microorganismos en el entorno, promoviendo así la coordinación y preparación para la adhesión y formación de colonias. No obstante, los compuestos volátiles microbianos son importantes no solo para el establecimiento de la simbiosis sino también como elicitores del crecimiento vegetal y la tolerancia a estrés. Así, volátiles microbianos de especies bacterianas y fúngicas, no solo beneficiosas sino también patógenas (3), son

capaces de promover el crecimiento y la fotosíntesis de las plantas mediante cambios que implican la alteración de procesos metabólicos, transcripcionales y proteómicos de la planta mediados, en parte, por la activación de la señalización de fitohormonas (4) (Figura 1).

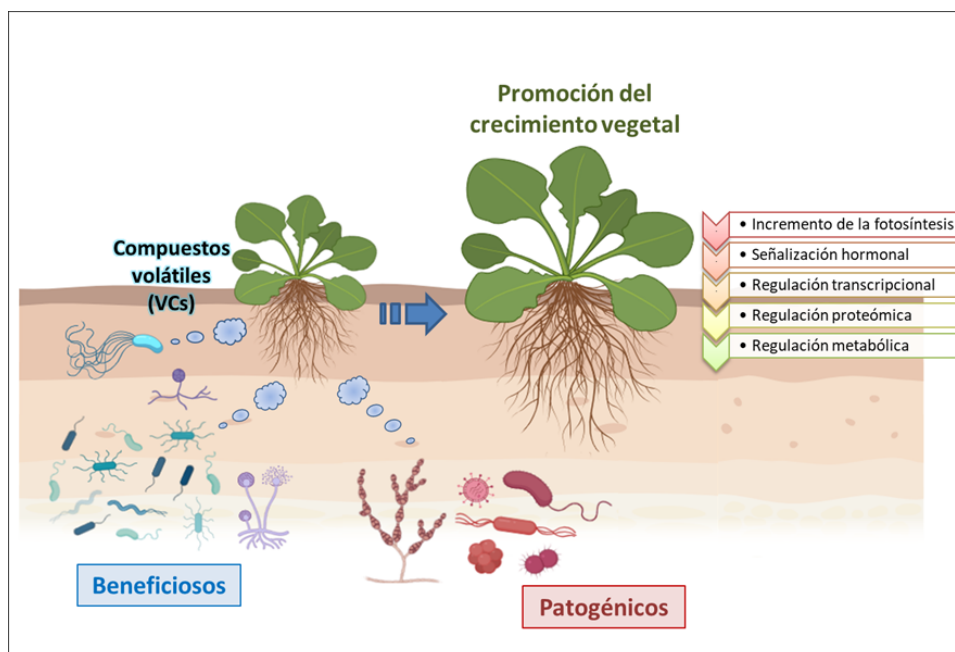


Figura 1. Efecto de los compuestos volátiles microbianos en el crecimiento vegetal. Esquema ilustrativo del efecto de compuestos volátiles de microorganismos beneficiosos y fitopatogénicos en la promoción del crecimiento vegetal, a través de mecanismos que implican un aumento de la eficiencia fotosintética, cambios a nivel transcripcional, proteómico y metabólico mediados por la activación de la señalización de fitohormonas. Infografía realizada con BioRender.

Además, los volátiles microbianos también inducen tolerancia sistémica a la sequía, mejoran la adquisición de nutrientes y modulan la arquitectura del sistema radicular (5). En este sentido, uno de los ejemplos más notables de modificación de la arquitectura y morfología radicular mediada por volátiles microbianos es el efecto que los volátiles del hongo fitopatógeno *Penicillium aurantiogriseum* tienen sobre las raíces de *Arabidopsis thaliana*, consistente en un acortamiento y proliferación masiva de raíces laterales y un súper estiramiento y proliferación de pelos radiculares (Figura 2). Este mayor desarrollo de los pelos radiculares ayuda a la planta a aumentar el área de captación de nutrientes y agua, haciéndola más tolerante a estreses abióticos como la sequía (5). Por otra parte, los cambios morfológicos inducidos por los compuestos volátiles microbianos están relacionados con una reprogramación del proteoma vegetal que conlleva, a su vez, una modulación de las rutas de señalización de las hormonas vegetales etileno y auxinas, una mejor señalización de la fotosíntesis, así como con una mayor acumulación de especies reactivas de oxígeno, implicadas en la regulación del crecimiento polarizado de los pelos radicales (6). Entre estos cambios en el proteoma de la planta, destaca la inducción de un pequeño péptido señal perteneciente a la familia RALF (por

sus siglas en inglés *Rapid Alkalinization Factor*), denominado RALF22. Estos pequeños péptidos señal funcionan como moléculas de comunicación célula a célula coordinando el crecimiento y desarrollo de las plantas y son percibidos a nivel de la pared celular o la membrana plasmática por receptores de tipo kinasas para activar la correspondiente respuesta celular (7). En este contexto RALF22, así como su conocido receptor FERONIA, son esenciales para el súper estiramiento y proliferación de pelos radiculares en plantas expuestas a compuestos volátiles (Figura 2), pues plantas mutantes impedidas en la producción de RALF22 y FERONIA son incapaces de aumentar el número y longitud de los pelos radiculares (8). Además, etileno y auxinas, hormonas vegetales cuya señalización está influenciada por la percepción de compuestos volátiles microbianos, están también involucrados en la inducción de RALF22 (Figura 2), ya que estos volátiles son incapaces de estimular la inducción de RALF22 en plantas mutantes afectadas en la señalización de estas hormonas vegetales y, por tanto, de aumentar el número y longitud de los pelos radiculares (8). Por otra parte, es muy destacable reseñar que estos cambios morfológicos están inducidos por etileno fúngico (Figura 2). Así, el silenciamiento del gen responsable de producción de etileno en *Penicillium aurantiogriseum* (efeA; 2-oxoglutarate-

dependent ethylene-forming enzyme (EFE)-encoding gene) y, por tanto, la alteración en la capacidad de producción de etileno por parte del hongo, impide la inducción del súper estiramiento y proliferación de los pelos radiculares (8). Estos resultados ponen de

manifiesto la importancia del etileno como molécula clave en la inducción de cambios morfológicos asociados a la raíz en fases tempranas de la interacción planta-microorganismo y, por tanto, lo señalan como un factor esencial de las relaciones planta-suelo.

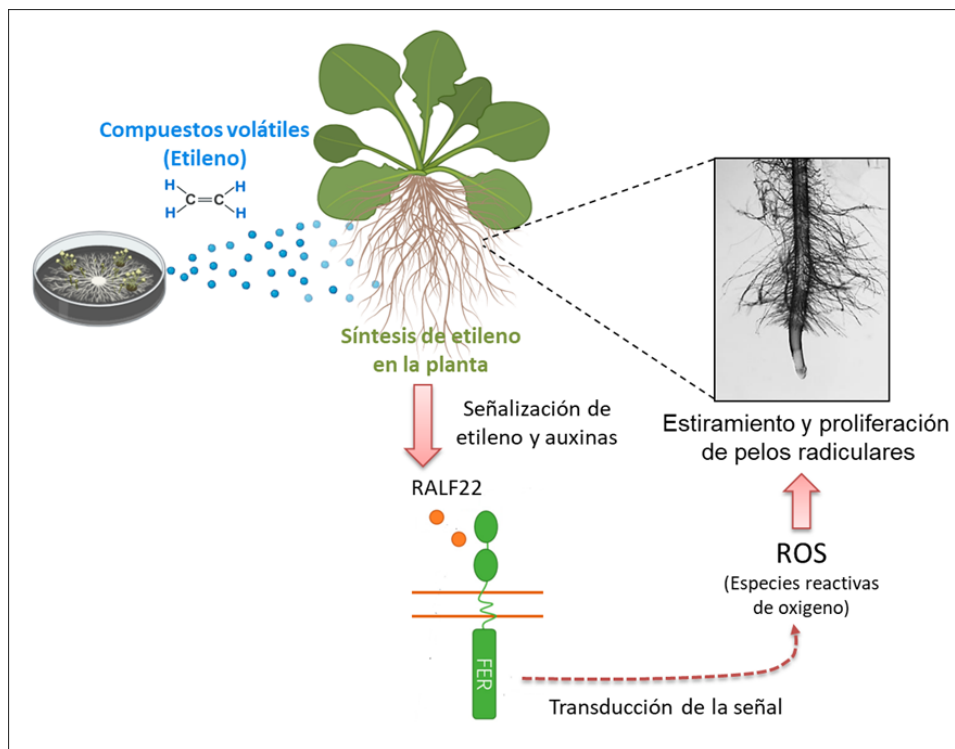


Figura 2. Modo de acción de los volátiles microbianos en el estiramiento y proliferación de pelos radiculares mediado por RALF22 y FERONIA. El etileno presente en los compuestos volátiles producidos por *Penicillium aurantio-griseum* induce la síntesis de etileno endógeno de la planta. Éste, a través de una cascada de señalización que involucra la acción del propio etileno y auxinas, activa la expresión de RALF22 que es percibido por el receptor tipo kinasa FERONIA (FER). FERONIA transduce la señal para, a través de la acción de varios componentes moleculares, inducir la acumulación de especies reactivas de oxígeno (ROS), encargadas de producir el estiramiento y proliferación de los pelos radiculares. Infografía realizada con BioRender.

Sobre el autor

Rafael Jorge León Morcillo realizó su tesis doctoral en la Estación Experimental del Zaidín (CSIC-EEZ, Granada). Llevó a cabo sus primeros estudios postdoctorales en el *Shanghai Center for Plant Stress Biology* (China) y, posteriormente, en el Instituto del Agua de la Universidad de Granada. Actualmente, es investigador postdoctoral sénior en el Instituto de Hortofruticultura Subtropical y Mediterránea “La Mayora” (CSIC-UMA-IHSM) de Málaga.

Referencias

1. Zipfel C, Oldroyd GE. (2017). *Nature*. 543(7645), 328-336.
2. Zhalnina K, Louie KB, Hao Z, et al. (2018). *Nature Microbiology*. 3, 470-480.
3. Sánchez-López ÁM, Baslam M, De Diego N, et al. (2016). *Plant, Cell & Environment*. 39(12), 2592-2608.
4. Gámez-Arcas S, Baroja-Fernández E, García-Gómez P, et al. (2022). *Journal of Experimental Botany*. 73(2):498-510.
5. García-Gómez P, Bahaji A, Gámez-Arcas S, et al. (2020). *Plant, Cell & Environment*. 43, 2551-2570.
6. Martin RE, Marzol E, Estevez JM, Muday GK. (2022). *Development*. 149(13):dev200487
7. Doblas VG, Gonneau M, Höfte H. (2018). *The Cell Surface*. 3, 1-11.
8. Morcillo RJL, Leal-López J, Férrez-Gómez A, et al. (2024). *Plant Physiology* (In Press).