

MICROORGANISMOS BENEFICIOSOS

en el cultivo sostenible de hortícolas

Para avanzar en la transición agroecológica, necesaria para hacer frente a los retos del siglo XXI, disponemos de biotecnologías como el uso de microorganismos beneficiosos, que contribuyen a la sostenibilidad medioambiental y la productividad de los cultivos.

Este artículo describe la efectividad de la inoculación con hongos micorrícicos y bacterias con respecto a la mejora del crecimiento de plantas de lechuga y la recuperación de la estructura del suelo.

FUENSANTA CARAVACA, ANTONIO ROLDÁN

CSIC-Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura. Departamento de Conservación de Suelos y Agua. Murcia

Las prácticas agrícolas convencionales, fundamentadas en la aplicación de fertilizantes químicos, han resultado en la disminución de la biodiversidad de la microbiota asociada al suelo y a las plantas. Esta pérdida de biodiversidad puede conllevar consecuencias negativas para servicios ecosistémicos fundamentales, tales como la producción primaria y el ciclo de nutrientes. Asimismo, el uso excesivo de fertilizantes químicos ha ocasionado diversos problemas ambientales. Entre ellos se encuentran procesos severos de degradación del suelo, como la erosión, la compactación y la reducción de la materia orgánica y nutrientes del mismo, así como la contaminación del agua. En particular, los agroecosistemas de las zonas semiáridas del Mediterráneo se ven gravemente afectados por la degradación de la estructura del suelo y procesos erosivos, provocados por prácticas agrícolas inadecuadas que los convierten en tierras de baja productividad a completamente improductivas. De hecho, la estructura

degradada del suelo puede restringir el movimiento del aire, el agua y el calor en los suelos, limitando su productividad biológica y económica. Se estima que alrededor del 52% de las tierras agrícolas del mundo están moderada o gravemente degradadas. Afectando, además, a la capacidad del suelo para almacenar carbono y contribuyendo así al cambio climático. Por lo tanto, existe una necesidad urgente de adoptar prácticas agrícolas que no dependan de un mayor uso de fertilizantes químicos para satisfacer la creciente demanda de las necesidades alimentarias mundiales disminuyendo nuestra huella ecológica en un clima cambiante (FAO, 2019).

Microorganismos beneficiosos en agricultura

Los microorganismos beneficiosos de la rizosfera son determinantes importantes de la salud de las plantas y la fertilidad del suelo porque participan en muchos procesos ecosistémicos clave, como los implicados en el control biológico de fitopatógenos, el ciclo de nutrientes y el establecimiento y

crecimiento de las plantas (Zhao *et al.*, 2024). Sin embargo, las funciones naturales de los microorganismos de la rizosfera han sido mermadas debido a prácticas agrícolas convencionales como la labranza y altos insumos de fertilizantes y pesticidas inorgánicos. Mejorar el rendimiento de los cultivos estimulando el crecimiento y la actividad de estos microorganismos beneficiosos parece ser una alternativa prometedora a las prácticas agrícolas que implican el uso intensivo de pesticidas y fertilizantes. Por tanto, se espera que los microorganismos beneficiosos para las plantas desempeñen un papel importante en la sostenibilidad de los agroecosistemas. Existen varios grupos de microorganismos beneficiosos de la rizosfera, que pueden ser simbióticos o de vida libre. Entre los microorganismos simbióticos nos vamos a centrar en los hongos micorrícicos arbusculares (MA), que forman asociaciones mutualistas con más del 80% de las especies de plantas, incluidas las plantas de interés agronómico. Se sabe que los hongos MA mejoran la absor-

ción de minerales (particularmente P), la tolerancia al estrés hídrico y la agregación del suelo. Sin embargo, la simbiosis MA está influenciada por diversas prácticas de manejo, como el grado y tipo de fertilización, la especie o cultivar de la planta huésped, las especies de hongos micorrícicos, el tipo de sistema radicular de la planta huésped y la rotación de cultivos o labranza del suelo. Entre los microorganismos de vida libre, vamos a prestar especial atención a las bacterias promotoras del crecimiento de las plantas (PGPR). Las PGPR pueden ejercer un efecto beneficioso sobre el crecimiento de las plantas debido principalmente a una combinación de fijación de N, movilización de nutrientes en el suelo y excreción de hormonas vegetales. El uso de PGPR puede permitir reducciones en los aportes de fertilizantes químicos a las plantas inoculadas o aumentar la eficiencia de la absorción de los nutrientes de los fertilizantes aplicados, especialmente para nutrientes de baja movilidad como el hierro y el fósforo. En particular, en suelos con pH alto, el hierro forma hidróxidos insolubles y la disponibilidad de Fe libre suele ser demasiado baja para satisfacer la demanda de las plantas. Algunos autores han encontrado que la producción de sideróforos por bacterias del género *Pseudomonas* aumenta la solubilidad del Fe, contribuyendo a los requerimientos generales de hierro de las plantas, especialmente en suelos calcáreos.

La utilización de productos microbiológicos tiene varias ventajas sobre los productos químicos convencionales para usos agrícolas, ya que están considerados más seguros que los productos químicos y no se acumulan en la cadena trófica. Actualmente, la agricultura llamada orgánica hace uso de microorganismos a fin de sustituir los fertilizantes químicos de la producción agrícola convencional, para obtener frutas y hortalizas más nutritivas y saludables para el medio ambiente. Los microorganismos seleccionados por su capacidad para promover el crecimiento de las plantas



FIGURA 1
Vista parcial de una de las parcelas experimentales ubicada en el SACE (Universidad de Murcia).

y la adquisición de nutrientes han sido usados en agricultura, tanto como cepas individuales o como un consorcio de microorganismos beneficiosos. No obstante, en la práctica, se han registrado resultados inconsistentes posiblemente debido al origen de la cepa, dosis de aplicación, etc. o debido a que los mecanismos de acción de los microorganismos se ven condicionados por el tipo de suelo inoculado y/o la variedad de cultivo.

En este contexto, el objetivo principal de esta investigación fue optimizar el uso de inoculantes microbianos basados en hongos micorrícicos y bacterias promotoras del crecimiento, como biofertilizantes para el desarrollo de plantas hortícolas de interés agronómico y como bioenmendantes para la mejora de las propiedades físicas del suelo relacionadas con la calidad y sostenibilidad del agroecosistema. La eficacia de estos inoculantes microbianos fue probada tanto bajo condiciones de campo, como bajo condiciones de CO₂ elevado y déficit hídrico, simulando las condiciones ambientales previsibles de cambio climático.

En este artículo nos centramos en el uso de inoculantes microbianos para el cultivo de lechuga motivado por su gran importancia en el sector hortícola (**Figura 1**). La lechuga es la segunda hortícola más exportada por España, siendo la Región de Murcia la principal productora y comercializadora/exportadora de la Comunidad Europea, con una superficie de cultivo de 15.500 ha y una producción anual de aproximadamente 400.000 Tn (Datos MAPA 2022). Los inoculantes microbianos objeto de estudio fueron: *Pseudomonas mendocina* y *Rhizophagus intraradices*. La cepa *P. mendocina* fue seleccionada debido a su capacidad para producir sideróforos, mientras *R. intraradices* por su gran capacidad de colonización en numerosas especies cultivadas.

Microorganismos como promotores del crecimiento vegetal

Transcurridos dos meses desde la plantación la cepa PGPR y el hongo MA demostraron su eficacia para estimular el crecimiento de las plantas de lechuga bajo condiciones de

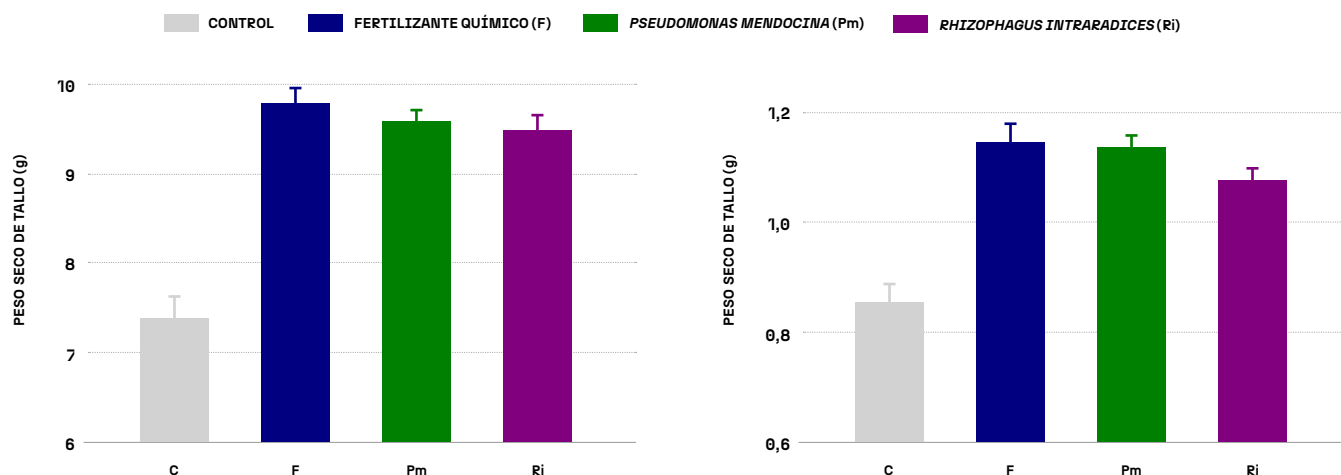


FIGURA 2
Peso seco de tallo y raíz de plantas de lechuga (*Lactuca sativa*), dos meses después de la plantación (media ± error estándar). C, control; F, fertilización; Pm, inoculado con *Pseudomonas mendocina*; Ri, inoculado con *Rhizophagus intraradices*.

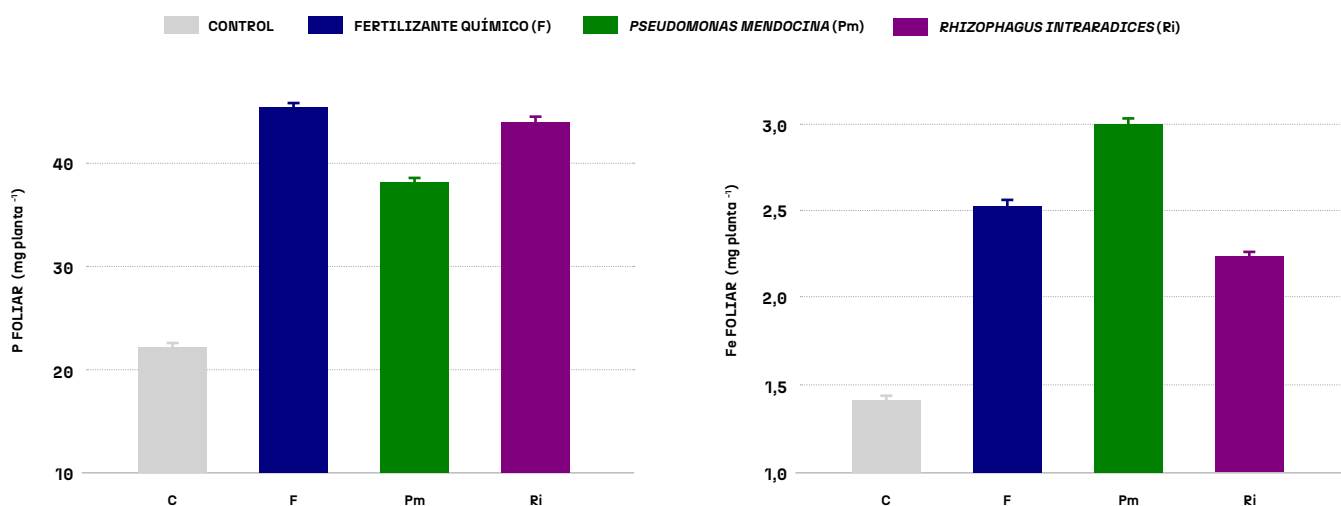


FIGURA 3
Contenidos de P y Fe foliar de plantas de lechuga (*Lactuca sativa*), dos meses después de la plantación (media ± error estándar). C, control; F, fertilización; Pm, inoculado con *Pseudomonas mendocina*; Ri, inoculado con *Rhizophagus intraradices*.

campo (Figura 2). En ambos casos los mecanismos implicados estuvieron relacionados con un incremento en la asimilación de fósforo y hierro, siendo particularmente notable el incremento de Fe foliar en el caso de la cepa PGPR (Figura 3). Fruto de su metabolismo secundario, estas bacterias heterótrofas liberan al medio sideróforos o quelantes de hierro, que favorecen la asimilación de este micronutriente por las plantas. Cabe destacar que el crecimiento de

las plantas de lechuga inoculadas con cualquiera de los inoculantes microbianos fue similar al crecimiento de las plantas de lechuga crecidas con fertilización química. Este resultado muestra la capacidad de la cepa PGPR y el hongo MA para sustituir la fertilización química en plantas de lechuga. El uso de esta biotecnología posibilita dejar de utilizar fertilizantes químicos, evitando de esta forma los problemas medioambientales que éstos conllevan.

Microorganismos como mejoradores de la calidad del suelo

El mantenimiento de la calidad del suelo es una parte integral de la sostenibilidad agrícola. La estructura del suelo es crucial para el éxito de la agricultura sostenible. En todos los suelos, excepto en los suelos de textura gruesa, la agregación es esencial para mantener la porosidad del suelo; facilita la infiltración de agua, proporciona un espacio de hábitat adecuado para los

organismos del suelo y un suministro adecuado de oxígeno a las raíces y los organismos del suelo, y ayuda a evitar la erosión del suelo. En particular, la estabilidad de los agregados es quizás el índice más significativo que nos indica la calidad y sostenibilidad de un suelo agrícola (García-Orenes *et al.*, 2012). La estabilidad de agregados está regulada principalmente por la actividad microbiana mediante procesos mecánicos (entrelazado por hifas de hongos), o fisiológicos (exudados cementantes de bacterias y hongos), así como por la cantidad y/o calidad de la materia orgánica y desarrollo radicular (Kohler *et al.*, 2017).

Los agroecosistemas de áreas semiáridas mediterráneas se ven seriamente afectados por la degradación de la estructura edáfica y los procesos erosivos. La erosión del suelo provoca la pérdida de la capa superficial fértil que alberga nutrientes esenciales, ocasionando

una disminución en la producción, los rendimientos y la disponibilidad de nutrientes, así como una reducción del área disponible para el cultivo. La pérdida económica total en productividad agrícola debido a la erosión severa en la Unión Europea es de alrededor de 1,257 millones de euros (año de referencia: 2020), con España sufriendo una pérdida de productividad de cultivos de aproximadamente 153 millones de euros al año.

En el experimento de campo se constató el notable incremento que *R. intraradices* y *P. mendocina* produjeron en la mejora de la estructura del suelo (Figura 4). Cabe destacar que este parámetro físico exhibió una estrecha correlación con la mejora en el crecimiento de las plantas de lechuga. En esta investigación obtuvimos la primera evidencia acerca de los efectos beneficiosos de una cepa perteneciente al género *Pseudomonas* en la estabi-

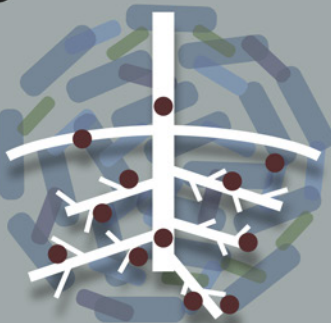
lización de agregados del suelo bajo condiciones de campo. La mejora de la estabilidad estructural producida por la inoculación con *P. mendocina* pudo deberse al aumento en la actividad microbiana observada en este suelo, así como a los exopolisacáridos secretados por dicha cepa. En vista de estos resultados se puede concluir que la aplicación de estos inoculantes microbianos incide favorablemente en la calidad y sostenibilidad del sistema suelo-planta.

Microorganismos como mejoradores de la calidad del suelo bajo condiciones simuladas de cambio climático

En los escenarios futuros de cambio climático, se prevé que aumente la severidad de las sequías en las regiones mediterráneas áridas y semiáridas debido al incremento en las concen-

Terra-Sorb radicular

SymBiotic®



Toda la información:



Tu Terra-Sorb®
de siempre,
más vivo que nunca

Bioiberica

BIOESTIMULANTE PROBIÓTICO



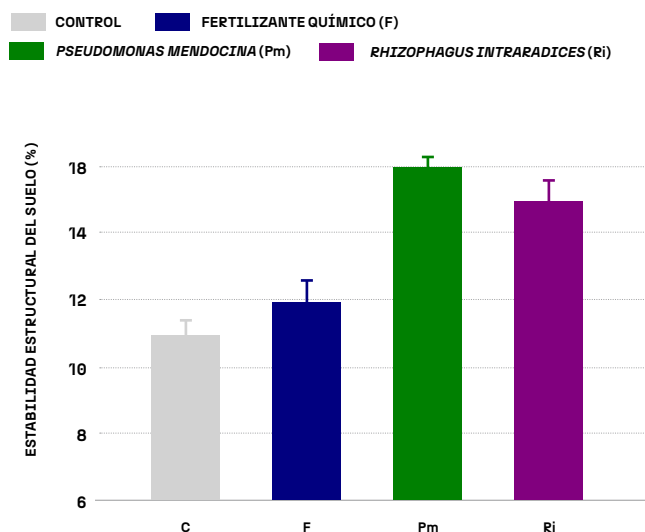


FIGURA 4
Estabilidad de agregados del suelo rizosférico de lechuga (*Lactuca sativa*), dos meses después de la plantación (media ± error estándar). C, control; F, fertilización; Pm, inoculado con *Pseudomonas mendocina*; Ri, inoculado con *Rhizopagus intraradices*.

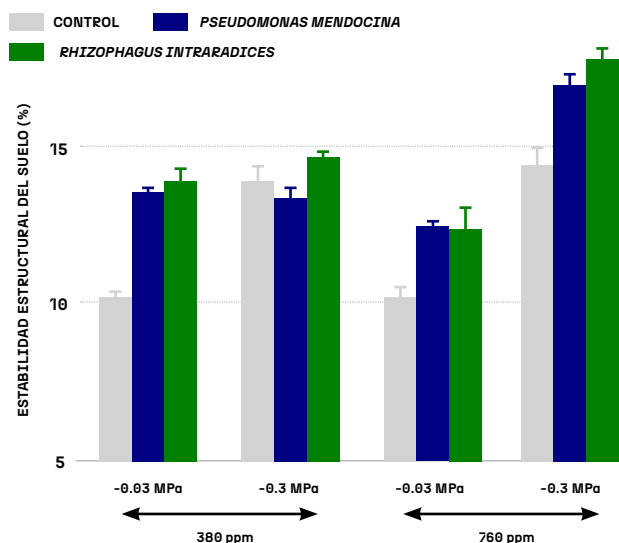


FIGURA 5
Efecto de la inoculación con *Rhizopagus intraradices* y *Pseudomonas mendocina* sobre estabilidad de agregados del suelo en la rizosfera de *Lactuca sativa* con dos niveles de riego y dos niveles de concentración de CO₂, nueve semanas después de la plantación (media ± error estándar).

traciones de CO₂ atmosférico. Esto tiene consecuencias para la producción agrícola en estas regiones, ya que la escasez de agua es un factor limitante del crecimiento y la producción de plantas cultivadas. A diferencia del impacto de la aridez climática, el continuo aumento de CO₂ en la atmósfera puede estimular la producción de los cultivos. El incremento en el crecimiento de las plantas implicaría una mayor liberación de carbono al suelo, lo que aumenta la cantidad de carbono disponible para los microorganismos. Aunque se posee escasa información acerca de la respuesta de los suelos y su biota al cambio climático, el impacto de los incrementos en CO₂ en las interacciones entre plantas y microorganismos ha generado notable atención en la última década (Kohler *et al.*, 2010). En el experimento de crecimiento de lechuga en cámara en la que se modificó la concentración de CO₂ y se indujo un estrés hídrico se llegó a las siguientes conclusiones: La inoculación con una cepa PGPR o un hongo MA tuvo efectos positivos sobre las propiedades estructurales del suelo bajo condiciones de riego deficitario y bajo CO₂ elevado, particularmente en

el suelo inoculado con la cepa PGPR (Figura 5). La mejora en el rendimiento de las plantas de lechuga inoculadas y crecidas bajo tales condiciones ambientales estuvo relacionada con un incremento de los niveles de C orgánico edáfico y una mejora en el estado nutricional del suelo y en la actividad biológica. En un contexto de cambio climático, las inoculaciones con la cepa PGPR o el hongo AM se revelaron como herramientas efectivas en el cultivo sostenible de lechuga.

Conclusiones

Para concluir, conviene mencionar que tanto la cepa de PGPR como el hongo MA ensayados tuvieron efectos promotores del crecimiento de la planta y mejoras en la estructura y calidad del suelo. Con esta premisa está sobradamente justificada su idoneidad para su utilización en agricultura ecológica y regenerativa.

Bibliografía

FAO 2019. *El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Progresos en la lucha contra la pérdida y el desperdicio de alimentos*. Roma. García-Orenes, F., Roldán, A., Ma-

taix-Solera, J., Cerdà, A., Campoy, M., Arcenegui, V., Caravaca, F. 2012. *Soil structural stability and erosion rates influenced by agricultural management practices in a semiarid Mediterranean agroecosystem*. *Soil Use and Management* 28:571-579.
Kohler, J., Knapp, B.A., Waldhuber, S., Caravaca, F., Roldán, A., Insam, H. 2010. *Effects of elevated CO₂, water stress, and inoculation with *Glomus intraradices* or *Pseudomonas mendocina* on lettuce dry matter and rhizosphere microbial and functional diversity under growth chamber conditions*. *Journal of Soils and Sediments* 10:1585-1597.
Kohler, J., Roldán, A., Campoy, M., Caravaca, F. 2017. *Unraveling the role of hyphal networks from arbuscular mycorrhizal fungi in aggregate stabilization of semiarid soils with different texture and carbonate contents*. *Plant and Soil* 410:273-281.
Zhao, G., Zhu, X., Zheng, G., Meng, G., Dong, Z., Baek, J.H., Che Ok Jeon, C.O., Yao, Y., Xuan, Y.H., Zhang, J., Jia, B. 2024. *Development of biofertilizers for sustainable agriculture over four decades (1980–2022)*. *Geography and Sustainability* 5:19-28.