

## Artículo Revisión

### Microorganismos promotores del crecimiento vegetal: avances recientes

#### Plant growth-promoting microorganisms: recent advances

Luis Humberto Benavides Velasco<sup>1\*</sup>  , Christian Iván Montatixe Sánchez<sup>2</sup>  

<sup>1</sup>Universidad Técnica de Cotopaxi, Cotopaxi-Ecuador

<sup>2</sup>Universidad Central del Ecuador, Quito-Ecuador

\***Autor de correspondencia:** Luis Humberto Benavides Velasco 

**Recibido:** 21-07-2026

**Revisado:** 11-08-2026

**Aceptado:** 01-09-2026

**Publicado:** 22-09-2026

**Cómo citar este artículo:** Benavides Velasco, L. H., & Montatixe Sánchez, C. I. (2026). Microorganismos promotores del crecimiento vegetal: avances recientes. Vitterra, 4(2), 1-67.

<https://vitterra.diginova.pro/index.php/vitterra/article/view/44>

### RESUMEN

Los microorganismos promotores del crecimiento vegetal (MPCV) han adquirido una importancia creciente dentro de la agricultura sostenible debido a su capacidad para incrementar la productividad de los cultivos mediante mecanismos biológicos que favorecen la nutrición vegetal, el desarrollo radicular y la tolerancia frente a diversos factores de estrés. En los últimos años, el avance de las técnicas de biología molecular y el estudio del microbioma vegetal han ampliado significativamente el conocimiento sobre las interacciones entre plantas y microorganismos, impulsando el desarrollo de nuevas estrategias biotecnológicas para reducir la dependencia de fertilizantes y pesticidas sintéticos. El objetivo de esta revisión bibliográfica fue analizar críticamente la evidencia científica disponible sobre los principales avances relacionados con los microorganismos promotores del crecimiento vegetal, considerando su evolución conceptual, mecanismos de acción, aplicaciones agrícolas, innovaciones biotecnológicas, limitaciones y perspectivas futuras. Para ello, se realizó una revisión de literatura científica utilizando publicaciones especializadas indexadas en bases de datos internacionales y obras de referencia ampliamente reconocidas en microbiología agrícola. La información fue organizada y analizada mediante categorías temáticas que permitieron comparar los hallazgos reportados por diferentes autores. La evidencia revisada demuestra que los microorganismos promotores del crecimiento vegetal favorecen el desarrollo de los cultivos mediante procesos como la fijación biológica del nitrógeno, la solubilización de nutrientes, la producción de fitohormonas, la síntesis de sideróforos, la actividad ACC desaminasa y la inducción de resistencia frente a patógenos y condiciones de estrés ambiental. Asimismo, los avances recientes en metagenómica, tecnologías ómicas, consorcios microbianos y agricultura de precisión han ampliado las posibilidades de aplicación de estos microorganismos dentro de los sistemas agrícolas sostenibles. Se concluye que los MPCV constituyen una herramienta biotecnológica con alto potencial para fortalecer la seguridad alimentaria y promover modelos de producción agrícola más resilientes; sin embargo, aún persisten desafíos relacionados con la estabilidad de los inoculantes, la interacción con el microbioma nativo y la transferencia de estas tecnologías hacia los sistemas productivos.

**Palabras clave:** agricultura sostenible; biofertilizantes; microbioma vegetal; microorganismos promotores del crecimiento vegetal; rizobacterias.

### ABSTRACT

Plant growth-promoting microorganisms (PGPMs) have gained increasing importance in sustainable agriculture due to their ability to enhance crop productivity through biological mechanisms that improve plant nutrition, root development, and tolerance to a wide range of environmental stresses. In recent years, advances in molecular biology techniques and plant microbiome research have significantly expanded the understanding of plant-microorganism interactions, fostering the development of innovative biotechnological strategies aimed at reducing dependence on

synthetic fertilizers and pesticides. The objective of this bibliographic review was to critically analyse the available scientific evidence on recent advances in plant growth-promoting microorganisms, focusing on their conceptual evolution, mechanisms of action, agricultural applications, biotechnological innovations, current limitations, and future perspectives. To achieve this, a comprehensive review of scientific literature was conducted using publications indexed in internationally recognised databases, together with authoritative references in agricultural microbiology. The retrieved information was organised into thematic categories and comparatively analysed to synthesise the main findings reported in the literature. The reviewed evidence demonstrates that plant growth-promoting microorganisms enhance crop performance through biological nitrogen fixation, nutrient solubilisation, phytohormone production, siderophore synthesis, ACC deaminase activity, and the induction of resistance against pathogens and abiotic stress. Furthermore, recent advances in metagenomics, omics technologies, microbial consortia, and precision agriculture have considerably expanded the potential applications of these microorganisms in sustainable farming systems. It is concluded that PGPMs represent a promising biotechnological tool for strengthening food security and promoting more resilient agricultural production systems; however, important challenges remain regarding inoculant stability, interactions with native microbiomes, and the successful transfer of these technologies to large-scale agricultural production.

**Keywords:** sustainable agriculture; biofertilizers; plant microbiome; plant growth-promoting microorganisms; plant growth-promoting rhizobacteria.

## 1. INTRODUCCIÓN

El incremento sostenido de la demanda mundial de alimentos constituye uno de los principales desafíos agrícolas del siglo XXI, especialmente porque debe atenderse en un contexto caracterizado por la degradación de los suelos, la reducción de la disponibilidad de agua y la creciente presión sobre los ecosistemas. Durante décadas, el aumento de la productividad se ha apoyado en el uso intensivo de fertilizantes sintéticos y productos fitosanitarios; aunque este modelo ha contribuido a elevar los rendimientos, también ha ocasionado efectos negativos sobre la biodiversidad edáfica, la calidad del agua y el equilibrio ecológico de los agroecosistemas. Ante esta situación, los microorganismos promotores del crecimiento vegetal han adquirido relevancia como una alternativa biológica para mejorar la nutrición y el desarrollo de los cultivos. Vejan et al. (2016) destacó tempranamente su potencial como biofertilizantes, mientras que Backer et al. (2018) los sitúan entre las herramientas con mayores posibilidades de contribuir a una agricultura productiva y ambientalmente sostenible.

El interés científico por los microorganismos asociados con las plantas surgió inicialmente a partir del estudio de las bacterias fijadoras de nitrógeno y de su capacidad para mejorar la nutrición de los cultivos leguminosos mediante asociaciones simbióticas. Con el avance de las investigaciones, se comprobó que numerosas bacterias de vida libre presentes en la rizosfera también podían estimular el crecimiento vegetal mediante procesos diferentes de la fijación biológica del nitrógeno. Esta evidencia favoreció la consolidación del concepto de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal, conocidas por las siglas PGPR, y amplió el reconocimiento de su función dentro de los sistemas agrícolas. Vejan et al. (2016) explican que la emergencia de estas bacterias en la agricultura respondió precisamente al descubrimiento de múltiples funciones relacionadas con la nutrición, la protección y el desarrollo de las plantas.

La evolución de este campo científico demostró, sin embargo, que limitar el análisis a las bacterias presentes en la rizosfera resultaba insuficiente para comprender la complejidad de las interacciones entre plantas y microorganismos. Finkel et al. (2017) documentaron la diversidad de mecanismos mediante los cuales las rizobacterias colonizan las raíces e influyen en el crecimiento de sus hospedantes. Posteriormente, el estudio de la endosfera permitió comprobar que algunos microorganismos beneficiosos pueden establecerse en el interior de los tejidos vegetales y mantener asociaciones estrechas con la planta. Compant et al. (2019) señalaron que la capacidad de colonización, la competencia por los nichos y la comunicación molecular resultan determinantes para el establecimiento de estas asociaciones. De esta manera, la investigación transitó desde el análisis de cepas aisladas hacia una perspectiva ecológica más amplia, centrada en las comunidades microbianas vinculadas con la planta. La organización de la microbiota radicular también está condicionada por la domesticación y el genotipo vegetal (Bulgarelli et al., 2015).

Los efectos favorables de estos microorganismos se explican mediante mecanismos directos e indirectos que pueden actuar de manera simultánea. Entre los primeros se encuentran la fijación biológica de nitrógeno, la solubilización de fósforo, la movilización de otros nutrientes y la producción de reguladores del crecimiento vegetal. Olanrewaju et al. (2017) destacan que la síntesis microbiana de auxinas puede modificar la arquitectura radicular y ampliar la superficie disponible para la absorción de agua y nutrientes. Por su parte, Olanrewaju et al. (2017) identifica la actividad de la enzima ACC desaminasa como un mecanismo capaz de reducir los efectos negativos del etileno producido durante situaciones de estrés. Estas acciones pueden complementarse con la producción de sideróforos, la inducción de resistencia sistémica y el antagonismo frente a organismos fitopatógenos, lo que demuestra que la promoción del crecimiento no depende de una única ruta fisiológica. La protección inducida puede depender de consorcios bacterianos reclutados por la propia planta (Berendsen et al., 2018), mientras que la evidencia regional confirma la coexistencia de varios mecanismos promotores en una misma cepa (González & Fuentes, 2017).

La diversidad funcional de las bacterias beneficiosas ha ampliado sus posibilidades de aplicación en la agricultura. Olanrewaju et al. (2017) señalan que una misma cepa puede combinar funciones relacionadas con la nutrición vegetal, la regulación hormonal y la protección frente a enfermedades. Esta multifuncionalidad resulta particularmente relevante para los cultivos sometidos a sequía, salinidad, temperaturas extremas u otras condiciones ambientales desfavorables. En tales escenarios, las rizobacterias pueden contribuir al mantenimiento del equilibrio hormonal y osmótico, estimular el desarrollo del sistema radical y fortalecer la actividad antioxidante de las plantas. Liu et al. (2020) sostienen que estas respuestas pueden mejorar la productividad bajo estrés, aunque su magnitud varía según la combinación entre el microorganismo, la especie vegetal y las condiciones ambientales. Revisiones recientes confirman la relevancia de estas respuestas microbianas frente a la sequía (Chieb & Gachomo, 2023).

La transición desde los resultados experimentales hacia productos de uso agrícola continúa representando uno de los desafíos centrales del campo. El desarrollo de un inoculante eficaz no depende únicamente de la selección de una cepa con propiedades beneficiosas, sino también de su capacidad para conservar la viabilidad durante la producción, el almacenamiento y la aplicación. Basu et al. (2021) destacan que la formulación, el tipo de soporte, la concentración celular y el método de suministro influyen directamente en el desempeño del producto. Además, las células introducidas deben competir con las comunidades microbianas nativas y adaptarse a variaciones en la humedad, la temperatura, el pH y la disponibilidad de nutrientes. Por ello, el comportamiento observado en condiciones controladas no siempre se reproduce con la misma estabilidad en el campo.

La eficacia de la inoculación también está condicionada por la compatibilidad entre la cepa seleccionada, la planta hospedante y el ambiente de producción. de Souza et al. (2015) evidenciaron que la promoción del crecimiento en cereales y leguminosas depende tanto de las capacidades funcionales de los microorganismos como de su adaptación al cultivo. De manera complementaria, de Souza et al. (2015) explican que las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo pueden favorecer o limitar la supervivencia y actividad de las bacterias introducidas. Estos hallazgos cuestionan la posibilidad de utilizar una misma formulación con resultados uniformes en diferentes territorios y respaldan la necesidad de seleccionar cepas adaptadas a condiciones edafoclimáticas específicas.

Durante los últimos años, las tecnologías de secuenciación masiva y las herramientas metagenómicas, transcriptómicas y metabolómicas han transformado la comprensión de las relaciones entre las plantas y su microbiota. El análisis del microbioma vegetal ha permitido reconocer que las respuestas agronómicas no siempre pueden atribuirse a una sola especie, sino que frecuentemente resultan de redes de interacción entre microorganismos, raíces y condiciones ambientales. Trivedi et al. (2020) consideran que este cambio de perspectiva abre nuevas posibilidades para diseñar consorcios microbianos con funciones complementarias y mayor estabilidad ecológica. No obstante, el desarrollo de estas formulaciones requiere estudiar las relaciones de cooperación y competencia entre las cepas, pues la combinación de microorganismos beneficiosos no garantiza por sí misma un efecto superior al obtenido mediante inoculaciones individuales. El diseño de microbiomas núcleo constituye una vía prometedora para aumentar la estabilidad funcional de los agroecosistemas (Toju et al., 2018).

En América Latina, la utilización de rizobacterias benéficas ha despertado un interés creciente por su potencial para reducir la dependencia de insumos químicos y recuperar procesos biológicos esenciales del suelo. La revisión sistemática de Posada Castaño et al. (2021) muestra una expansión importante de la producción científica sobre PGPR y destaca la diversidad de aplicaciones evaluadas entre 1990 y 2019. En el ámbito de la agricultura sostenible, Pardo-Díaz et al. (2021) subrayan que estas bacterias pueden favorecer la nutrición, el crecimiento y la adaptación de los cultivos cuando se integran apropiadamente con las prácticas de manejo. Pese a estos avances, persisten limitaciones vinculadas con la producción comercial de los inoculantes, su adaptación a las condiciones locales, el acceso de los agricultores a estas tecnologías y la validación de su eficacia durante varios ciclos productivos.

Aunque el conocimiento sobre los microorganismos promotores del crecimiento vegetal ha aumentado considerablemente, la evidencia disponible continúa mostrando diferencias en las especies estudiadas, las condiciones experimentales, los mecanismos evaluados y los criterios utilizados para medir su eficacia. Asimismo, se mantiene una brecha entre la identificación de cepas prometedoras en el laboratorio y la obtención de resultados consistentes bajo condiciones comerciales. Como advierten Busby et al. (2017), la consolidación de estas tecnologías requiere integrar microbiología, fisiología vegetal, ecología, agronomía y desarrollo industrial. En consecuencia, resulta necesario organizar críticamente la literatura para reconocer los avances alcanzados, identificar las limitaciones metodológicas y establecer las áreas que requieren mayor investigación.

En este contexto, el presente artículo tiene como objetivo analizar los avances recientes en el estudio de los microorganismos promotores del crecimiento vegetal mediante una revisión de la literatura científica. El análisis se orienta a describir su diversidad, sus principales mecanismos de acción, sus aplicaciones en la nutrición y protección de los cultivos, así como su contribución a la tolerancia frente al estrés ambiental. También se examinan los desafíos relacionados con la colonización, la formulación de inoculantes, la estabilidad de las respuestas en campo y la transferencia de los resultados científicos hacia aplicaciones agrícolas. Esta integración permitirá establecer las principales tendencias y perspectivas para el aprovechamiento de los inoculantes microbianos dentro de sistemas de producción más sostenibles. En esta línea, la evidencia reciente destaca tanto la contribución de las PGPR a la producción sostenible (de Andrade et al., 2023) como su revitalización dentro de estrategias agrícolas integradas (Gouda et al., 2018).

## 2. METODOLOGÍA

La presente investigación se desarrolló mediante una revisión bibliográfica de carácter descriptivo y analítico, orientada a examinar e integrar la evidencia científica disponible sobre los microorganismos promotores del crecimiento vegetal. El análisis comprendió la evolución conceptual de este campo, la diversidad de grupos microbianos estudiados, sus mecanismos directos e indirectos de acción, las aplicaciones agrícolas documentadas y los avances relacionados con la elaboración de inoculantes. También se consideraron las limitaciones que condicionan su desempeño en campo y las perspectivas biotecnológicas derivadas del estudio del microbioma vegetal. Esta amplitud temática responde al carácter multifuncional de las bacterias promotoras, cuyas actividades pueden involucrar simultáneamente la nutrición, la regulación fisiológica y la protección de las plantas (Olanrewaju et al., 2017). Asimismo, el enfoque adoptado permitió examinar los desafíos existentes para trasladar los resultados experimentales hacia productos comerciales estables y eficaces (Backer et al., 2018).

### Diseño de la investigación

Se aplicó un diseño de revisión bibliográfica narrativa que permitió comparar aportaciones conceptuales, estudios experimentales, revisiones especializadas y documentos técnicos relacionados con la microbiología agrícola. La elección de este diseño respondió a la heterogeneidad de la literatura disponible, caracterizada por diferencias en las especies vegetales estudiadas, los microorganismos inoculados, las condiciones ambientales, los diseños experimentales y los indicadores utilizados para evaluar la promoción del crecimiento. Vejan et al. (2016) muestran que la investigación sobre rizobacterias comprende mecanismos nutricionales, fisiológicos y fitosanitarios difícilmente reducibles a una sola medida de resultado. Por esta razón, no se realizó un metaanálisis ni se combinaron

estadísticamente los resultados, sino que se efectuó una interpretación crítica dirigida a reconocer patrones, divergencias y vacíos de conocimiento.

La unidad de análisis estuvo constituida por publicaciones centradas en bacterias rizosféricas y endófitas, microorganismos asociados con el microbioma vegetal e inoculantes utilizados para favorecer el crecimiento y la adaptación de los cultivos. Esta delimitación permitió integrar tanto las investigaciones clásicas sobre las PGPR como los enfoques contemporáneos orientados al análisis de comunidades microbianas y consorcios funcionales. Compant et al. (2019) fundamentan la inclusión de microorganismos presentes en la rizosfera y la endosfera debido a que ambos grupos pueden intervenir en la nutrición, protección y regulación fisiológica de las plantas. Por su parte, Backer et al. (2018) respaldan la ampliación del análisis hacia el microbioma y los desafíos relacionados con la comercialización de los inoculantes.

### **Fuentes de información**

La búsqueda bibliográfica se efectuó en Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, PubMed, Google Scholar y SciELO, seleccionadas por su cobertura de publicaciones pertenecientes a las áreas de microbiología, agronomía, fisiología vegetal, biotecnología y ciencias ambientales. La consulta de varias fuentes permitió recuperar estudios de alcance internacional y trabajos desarrollados en contextos regionales, especialmente investigaciones latinoamericanas que podían encontrarse insuficientemente representadas en algunas bases de datos. Esta consideración fue relevante porque la producción científica regional presenta aportes relacionados con microorganismos nativos y sistemas agrícolas sostenibles, como evidencia la revisión realizada por Posada Castaño et al. (2021).

La búsqueda se complementó con la revisión de libros especializados, capítulos académicos y documentos técnicos publicados por instituciones vinculadas con la investigación agrícola. Los libros se incorporaron cuando aportaban fundamentos conceptuales sobre la relación entre bacterias, plantas y agroecosistemas, como la obra editada por Vejan et al. (2016). También se consultaron documentos institucionales relacionados con el uso de bacterias benéficas en sistemas sostenibles, entre ellos la publicación de Pardo-Díaz et al. (2021), debido a su pertinencia para analizar la transferencia del conocimiento microbiológico hacia los contextos productivos. Finalmente, las listas de referencias de los documentos seleccionados se revisaron manualmente para localizar trabajos relevantes que no hubieran aparecido durante la búsqueda inicial.

### **Estrategia de búsqueda bibliográfica**

La estrategia de búsqueda se construyó mediante términos en español e inglés relacionados con los microorganismos estudiados, sus mecanismos de acción y sus aplicaciones agrícolas. En inglés se utilizaron los descriptores plant growth-promoting microorganisms, plant growth-promoting bacteria, plant growth-promoting rhizobacteria, PGPR, PGPM, biofertilizers, microbial inoculants, plant microbiome y sustainable agriculture. En español se emplearon las expresiones microorganismos promotores del crecimiento vegetal, bacterias promotoras del crecimiento, rizobacterias, biofertilizantes, inoculantes microbianos, microbioma vegetal y agricultura sostenible. Estos términos reflejan la evolución terminológica del campo, desde el concepto de PGPR examinado por Finkel et al. (2017) hasta el enfoque más amplio de inoculantes y microbiomas analizado por Backer et al. (2018).

Los descriptores se combinaron mediante los operadores booleanos AND y OR, adaptando las ecuaciones a las características de cada base de datos. Entre las combinaciones empleadas se incluyeron “plant growth-promoting rhizobacteria” AND “mechanisms of action”, “microbial inoculants” AND “sustainable agriculture”, “plant microbiome” AND “crop productivity”, y sus equivalentes en español. Para recuperar investigaciones sobre mecanismos específicos se incorporaron términos como nitrogen fixation, phosphate solubilization, phytohormones, siderophores, ACC deaminase, induced systemic resistance y biological control. Esta ampliación fue necesaria porque los efectos de las bacterias promotoras comprenden mecanismos directos e indirectos que pueden presentarse de forma complementaria, como explican Olanrewaju et al. (2017) y Mhlongo et al. (2018).

También se efectuaron búsquedas específicas sobre formulación, almacenamiento, aplicación y desempeño en campo, utilizando expresiones como inoculant formulation, shelf life, field performance, microbial survival y commercialization. La inclusión de estos términos permitió superar una búsqueda centrada exclusivamente en los mecanismos biológicos y recuperar evidencia sobre las dificultades tecnológicas que afectan el desarrollo comercial de los productos microbianos. Basu et al. (2021) destacan que la formulación, el soporte, la conservación de la viabilidad y el método de aplicación son factores decisivos para transformar una cepa experimental en un inoculante agrícola funcional.

### **Criterios de inclusión y exclusión**

Se incluyeron artículos científicos revisados por pares, revisiones de literatura, capítulos de libros y documentos técnicos especializados que abordaran directamente los microorganismos promotores del crecimiento vegetal. Para ser incorporadas, las publicaciones debían proporcionar información sobre al menos uno de los siguientes componentes: diversidad microbiana, mecanismos de acción, interacción planta-microorganismo, colonización de la rizosfera o la endosfera, tolerancia de los cultivos al estrés, formulación de inoculantes, desempeño agronómico o aplicaciones en agricultura sostenible. También se consideraron estudios sobre la producción microbiana de auxinas debido a su influencia en la arquitectura radical (Olanrewaju et al., 2017), así como investigaciones relacionadas con el aumento de la productividad vegetal bajo condiciones ambientales adversas (Liu et al., 2020).

La selección se concentró principalmente en publicaciones difundidas entre 2003 y 2021, periodo que permitió recuperar desde los fundamentos del uso de PGPR como biofertilizantes hasta las aproximaciones recientes basadas en microbiomas y sistemas agrícolas sostenibles. El límite inicial se estableció a partir de la contribución de Vejan et al. (2016), considerada un referente para comprender la función de las rizobacterias como biofertilizantes. El extremo más reciente incluyó revisiones como la de Posada Castaño et al. (2021), que sistematiza la producción científica desarrollada entre 1990 y 2019. No obstante, dado que el artículo aborda avances recientes, antes de su publicación deberá actualizarse la búsqueda hasta el año en que se cierre definitivamente la revisión.

Se excluyeron los registros duplicados, los documentos sin información metodológica suficiente y las publicaciones cuyo tema central no guardaba relación directa con la promoción microbiana del crecimiento o con su aplicación agrícola. También se descartaron los estudios centrados exclusivamente en microorganismos patógenos, procesos industriales no vinculados con la producción vegetal o fertilizantes convencionales sin componentes biológicos. Las publicaciones que presentaban resultados preliminares sin una descripción clara del microorganismo, el cultivo, las condiciones experimentales o las variables analizadas tampoco fueron incorporadas. Esta depuración permitió conservar investigaciones capaces de sustentar una interpretación fundamentada de las interacciones entre microorganismos, plantas y condiciones ambientales, cuya complejidad ha sido señalada por de Souza et al. (2015).

### **Selección y extracción de la información**

La selección documental se efectuó progresivamente mediante la revisión de títulos, resúmenes y textos completos. En la primera etapa se eliminaron los duplicados y los registros claramente ajenos al objeto de estudio. Posteriormente, los títulos y resúmenes fueron examinados para determinar su correspondencia con los mecanismos de promoción del crecimiento, las aplicaciones agronómicas o el desarrollo de inoculantes. Los documentos potencialmente pertinentes se revisaron en texto completo, verificando su contribución al objetivo de la investigación y la claridad de la información proporcionada. Esta evaluación prestó especial atención a la especie microbiana, la planta hospedante, el ambiente experimental y las variables utilizadas, debido a que la eficacia de una cepa depende de la interacción entre estos componentes (de Souza et al., 2015).

La información de las publicaciones seleccionadas se organizó en una matriz documental que incluyó autoría, año, tipo de publicación, microorganismo estudiado, cultivo o especie vegetal, mecanismo de acción, condiciones experimentales, aplicación agrícola, principales resultados y limitaciones identificadas. Asimismo, se registraron aspectos relacionados con la formulación, estabilidad, método de aplicación y desempeño en campo cuando estos

datos se encontraban disponibles. La incorporación de estas variables permitió examinar la distancia existente entre la eficacia observada en condiciones controladas y su reproducción en sistemas productivos, uno de los principales problemas señalados por Basu et al. (2021).

### **Organización y análisis de la evidencia**

Los datos recopilados se organizaron en categorías temáticas relacionadas con la evolución del conocimiento, los principales grupos microbianos, los mecanismos de acción, las aplicaciones agrícolas, la respuesta al estrés ambiental, los avances biotecnológicos, las limitaciones de implementación y las perspectivas futuras. La clasificación de los mecanismos distinguió entre acciones directas, como la fijación de nitrógeno, la solubilización de nutrientes y la producción de fitohormonas, y acciones indirectas vinculadas con la competencia, el antagonismo y la inducción de resistencia. Esta diferenciación se apoyó en la clasificación desarrollada por Olanrewaju et al. (2017), quienes presentan la promoción del crecimiento como el resultado de mecanismos diversos que operan de manera individual o combinada.

El análisis se realizó mediante una síntesis narrativa de carácter comparativo e interpretativo. En lugar de presentar aisladamente los resultados de cada publicación, se examinaron las coincidencias, diferencias y relaciones existentes entre los estudios, considerando el microorganismo utilizado, el cultivo evaluado, las condiciones ambientales y la naturaleza de la respuesta observada. La comparación permitió reconocer que los beneficios atribuidos a los inoculantes no dependen únicamente de sus propiedades metabólicas, sino también de su capacidad para colonizar las raíces y competir dentro del microbioma nativo, como señalan Compant et al. (2019). Esta interpretación contextual evitó presentar los resultados experimentales como respuestas universales aplicables indistintamente a todos los sistemas productivos.

Finalmente, los hallazgos se integraron en una síntesis crítica orientada a establecer los avances conceptuales y tecnológicos más relevantes, las principales limitaciones de la evidencia y las líneas que requieren mayor investigación. La valoración consideró especialmente la consistencia de las respuestas en campo, la adaptación de las cepas a diferentes condiciones edafoclimáticas, la estabilidad de las formulaciones y las posibilidades de transferencia hacia el sector productivo. Backer et al. (2018) identifican precisamente estos factores como componentes esenciales de la ruta que conduce desde la caracterización de microorganismos beneficiosos hasta su comercialización. De esta manera, la metodología permitió construir una visión articulada sobre la función actual y futura de los inoculantes microbianos en la agricultura sostenible.

### **EVOLUCIÓN DEL CONOCIMIENTO SOBRE LOS MICROORGANISMOS PROMOTORES DEL CRECIMIENTO VEGETAL**

El estudio de los microorganismos promotores del crecimiento vegetal ha experimentado una transformación considerable durante las últimas décadas. Las primeras investigaciones se concentraron en la capacidad de determinadas bacterias para fijar nitrógeno y mejorar la nutrición de los cultivos, mientras que los enfoques actuales analizan comunidades microbianas complejas y sus interacciones con la planta y el ambiente. Esta evolución ha sido favorecida por los avances de la microbiología, la biología molecular y las ciencias ómicas, que han permitido identificar organismos no cultivables y examinar las funciones que desempeñan en la rizosfera, la endosfera y otros compartimentos vegetales. Backer et al. (2018) sostienen que este desarrollo científico ha modificado la manera de interpretar la promoción del crecimiento, al desplazar la atención desde las cepas individuales hacia la estructura y funcionalidad del microbioma vegetal.

Las primeras aplicaciones agrícolas estuvieron asociadas principalmente con bacterias fijadoras de nitrógeno y con su capacidad para reducir la dependencia de fertilizantes nitrogenados sintéticos. En los cultivos leguminosos, las asociaciones simbióticas establecidas entre las raíces y bacterias como *Rhizobium* demostraron que los procesos microbiológicos podían utilizarse para mejorar la nutrición de las plantas y conservar la fertilidad del suelo. Vejan et al. (2016) amplió esta perspectiva al definir las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal como biofertilizantes capaces de incrementar el desarrollo y la productividad mediante procesos biológicos. Esta conceptualización permitió

incorporar dentro del mismo campo de estudio a microorganismos que actuaban por mecanismos diferentes de la fijación de nitrógeno.

El reconocimiento de otras funciones microbianas favoreció una visión más amplia de la relación entre las bacterias del suelo y las plantas. Las investigaciones demostraron que algunas especies presentes en la rizosfera podían solubilizar fósforo, producir reguladores del crecimiento, sintetizar compuestos quelantes y limitar el desarrollo de organismos patógenos. Vejan et al. (2016) destacan que esta diversidad funcional explica el interés creciente por géneros como *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Pseudomonas* y *Enterobacter*. De este modo, la promoción del crecimiento dejó de considerarse un proceso exclusivamente nutricional y comenzó a entenderse como el resultado de varias funciones biológicas que operan de forma simultánea.

El desarrollo de la ecología microbiana también permitió reconocer que la presencia de una característica beneficiosa en el laboratorio no garantiza el establecimiento exitoso del microorganismo en la raíz. Finkel et al. (2017) explican que las bacterias inoculadas deben responder a los exudados radicales, desplazarse hacia la raíz, adherirse a su superficie y competir por espacio y nutrientes con las poblaciones previamente establecidas. Por consiguiente, la capacidad de colonización se convirtió en un criterio esencial para evaluar el potencial de las cepas seleccionadas. Este avance permitió comprender por qué algunos microorganismos con propiedades metabólicas favorables no producen respuestas consistentes cuando son aplicados en condiciones de campo.

La investigación dejó posteriormente de concentrarse únicamente en las poblaciones presentes alrededor de las raíces y comenzó a examinar los microorganismos capaces de colonizar los tejidos internos de la planta. Compant et al. (2019) demostraron que las bacterias endófitas pueden ingresar por diferentes puntos de la raíz, desplazarse hacia otros órganos y mantener una relación estrecha con su hospedante sin ocasionar enfermedades. Su localización interna puede favorecer una interacción más estable y reducir parcialmente la competencia con los organismos presentes en el suelo. Estos hallazgos ampliaron el campo de estudio desde las rizobacterias hacia un conjunto diverso de microorganismos asociados con diferentes compartimentos vegetales.

La identificación de los mecanismos fisiológicos y moleculares representó otro momento importante en la evolución del conocimiento. Olanrewaju et al. (2017) evidenció que la actividad ACC desaminasa puede disminuir la concentración de etileno asociada con determinadas condiciones de estrés, favoreciendo la continuidad del crecimiento radicular. En otra ruta de acción, la producción microbiana de auxinas modifica la formación de raíces laterales y pelos radicales, ampliando la superficie destinada a la absorción de agua y nutrientes (Olanrewaju et al., 2017). Estos aportes permitieron explicar con mayor precisión cómo las bacterias influyen sobre procesos fisiológicos específicos y por qué una misma cepa puede generar respuestas distintas según el cultivo y el ambiente.

El conocimiento acumulado también permitió diferenciar entre mecanismos directos e indirectos de promoción vegetal. Los primeros comprenden procesos que inciden inmediatamente en la nutrición o fisiología de la planta, mientras que los segundos involucran la reducción de enfermedades, la competencia con patógenos y la activación de mecanismos defensivos. Mhlongo et al. (2018) señalan que ambas modalidades pueden actuar conjuntamente y producir efectos complementarios sobre el crecimiento y la sanidad vegetal. Olanrewaju et al. (2017) profundizan esta interpretación al demostrar que la eficacia de una bacteria depende frecuentemente de la combinación de varias capacidades funcionales y no de un único atributo aislado.

A medida que se esclarecieron estos mecanismos, la investigación comenzó a orientar sus esfuerzos hacia el desarrollo de inoculantes microbianos para la agricultura. El desafío dejó de consistir únicamente en aislar una cepa beneficiosa y pasó a incluir su producción masiva, conservación, formulación y aplicación efectiva en los cultivos. Basu et al. (2021) indican que la estabilidad durante el almacenamiento y la supervivencia después de la inoculación son condiciones indispensables para obtener un producto comercial funcional. Este cambio impulsó una mayor articulación entre la microbiología básica, la tecnología de formulación y la evaluación agronómica bajo condiciones reales de producción.

### **De las PGPR al concepto de microbioma vegetal: evolución del paradigma científico**

La comprensión de las relaciones entre plantas y microorganismos evolucionó inicialmente a partir del estudio de las PGPR, definidas como bacterias capaces de colonizar la rizosfera y favorecer el crecimiento vegetal. Este enfoque resultó fundamental para identificar cepas con funciones nutricionales, hormonales y fitosanitarias; sin embargo, tendía a analizar cada organismo como una unidad funcional independiente. Los estudios sobre colonización demostraron posteriormente que el efecto de estas bacterias está condicionado por la competencia, la comunicación química y las características ecológicas del sistema radical (Finkel et al., 2017). Por esta razón, la investigación comenzó a considerar el contexto biológico en el que actúan los microorganismos y no solamente sus propiedades observadas en cultivos de laboratorio.

La incorporación de las bacterias endófitas amplió la delimitación espacial de estas interacciones. Compant et al. (2019) evidenciaron que algunos microorganismos beneficiosos no permanecen exclusivamente en el suelo o sobre la superficie de la raíz, sino que pueden colonizar tejidos internos y desplazarse hacia otras partes de la planta. Este comportamiento demostró que la promoción del crecimiento puede originarse en diferentes compartimentos vegetales y que las relaciones microbianas poseen un carácter dinámico. En consecuencia, el término microorganismos promotores del crecimiento vegetal adquirió mayor pertinencia para abarcar bacterias rizosféricas, organismos endófitos y otros componentes beneficiosos asociados con la planta.

El cambio conceptual también modificó la interpretación de los mecanismos de acción. En las primeras investigaciones era común evaluar por separado la fijación de nitrógeno, la solubilización de fósforo o la producción de hormonas. Posteriormente, Olanrewaju et al. (2017) mostró que el crecimiento vegetal puede depender de la interacción entre varios procesos fisiológicos y metabólicos. En la misma línea, Olanrewaju et al. (2017) explican que la producción de fitohormonas, la actividad ACC desaminasa, la síntesis de sideróforos y el control de patógenos pueden coexistir dentro de una misma cepa. Esta multifuncionalidad permitió comprender que los efectos observados no siempre pueden atribuirse a un mecanismo único.

La ampliación de esta perspectiva condujo al concepto de microbioma vegetal, entendido como el conjunto de microorganismos, material genético, funciones e interacciones presentes en los diferentes espacios asociados con la planta. Este enfoque comprende las comunidades de la rizosfera, la superficie de los órganos vegetales y los tejidos internos, además de las relaciones que establecen con el hospedante y el ambiente. Backer et al. (2018) señalan que el estudio del microbioma permite interpretar la promoción del crecimiento como una propiedad emergente de redes biológicas complejas. Por tanto, la respuesta de un cultivo puede depender de la cooperación o competencia entre diversas poblaciones y no exclusivamente de la actividad individual de la cepa inoculada.

Las herramientas de secuenciación masiva contribuyeron decisivamente a esta transformación, debido a que permitieron examinar microorganismos que no podían recuperarse mediante técnicas convencionales de cultivo. Los análisis moleculares revelaron una diversidad considerablemente mayor dentro de la rizosfera y mostraron que numerosas especies participan en ciclos de nutrientes, producción de metabolitos y regulación de la respuesta vegetal. El enfoque basado en microbiomas ha permitido, además, comparar cómo la especie cultivada, el genotipo, el tipo de suelo y las prácticas de manejo modifican la composición de las comunidades asociadas. Según Backer et al. (2018), esta información puede utilizarse para seleccionar organismos compatibles y diseñar inoculantes con mayor estabilidad funcional.

La nueva perspectiva también ha impulsado el desarrollo de consorcios microbianos formados por cepas con capacidades complementarias. A diferencia de los productos basados en un solo organismo, estos consorcios buscan reproducir parcialmente las interacciones observadas en las comunidades naturales y combinar funciones nutricionales, hormonales y protectoras. No obstante, la reunión de varias cepas no garantiza un efecto sinérgico, pues pueden producirse fenómenos de competencia o antagonismo entre sus integrantes. De Souza et al. (2015) advierten que la eficacia de cualquier inoculación depende de la compatibilidad entre los organismos incorporados, la planta hospedante y el microbioma nativo del suelo.

En América Latina también se observa una transición progresiva desde el aislamiento de bacterias individuales hacia la caracterización de comunidades y microorganismos nativos. Posada Castaño et al. (2021) identificaron un crecimiento sostenido de las investigaciones sobre PGPR, aunque señalaron diferencias importantes en los cultivos, mecanismos y metodologías analizados. Desde una perspectiva aplicada, Pardo-Díaz et al. (2021) resaltan la necesidad de aprovechar cepas adaptadas a las condiciones edafoclimáticas regionales y de fortalecer su evaluación en sistemas productivos. Esta orientación resulta particularmente relevante en territorios tropicales y subtropicales, donde la diversidad microbiana puede ofrecer recursos biológicos todavía insuficientemente estudiados.

En síntesis, el conocimiento sobre los microorganismos promotores ha evolucionado desde una perspectiva reduccionista, centrada en cepas aisladas y mecanismos individuales, hacia un enfoque ecológico basado en las comunidades microbianas y sus interacciones funcionales. Este cambio no elimina la importancia de caracterizar organismos específicos, sino que sitúa sus capacidades dentro de un sistema compuesto por la planta, el suelo, el clima y el microbioma residente. El enfoque planteado por Backer et al. (2018) permite vincular esta comprensión ecológica con el desarrollo de productos agrícolas más eficaces. De esta manera, el estudio del microbioma vegetal constituye la base para diseñar consorcios funcionales, seleccionar cepas adaptadas localmente y avanzar hacia una agricultura basada en el manejo de procesos biológicos.

### **Principales grupos de microorganismos promotores del crecimiento vegetal**

La ampliación del concepto de promoción microbiana ha permitido reconocer una gran diversidad de organismos capaces de favorecer el crecimiento, la nutrición y la protección de las plantas. Aunque las bacterias rizosféricas continúan concentrando la mayor parte de las investigaciones, actualmente también se consideran las bacterias endófitas, los actinomicetos, los hongos micorrízicos y determinados hongos con capacidad bioestimulante o antagonista. Esta clasificación no depende únicamente de la identidad taxonómica de los organismos, sino también del espacio que colonizan y de las funciones que desarrollan durante su interacción con la planta. Backer et al. (2018) sostienen que esta diversidad debe analizarse dentro del microbioma vegetal, pues el efecto beneficioso de una población está condicionado por sus relaciones con otras comunidades y por las características del ambiente.

Las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal constituyen el grupo con mayor desarrollo científico y tecnológico. Estos organismos habitan el suelo próximo a las raíces, donde aprovechan los compuestos orgánicos liberados por la planta y establecen relaciones que pueden favorecer su crecimiento. Vejan et al. (2016) identifican entre los géneros más estudiados a *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Rhizobium* y *Enterobacter*, cuyas especies presentan capacidades funcionales diversas. Algunas cepas intervienen en la fijación de nitrógeno o la solubilización de nutrientes, mientras que otras producen fitohormonas, sideróforos, enzimas y metabolitos que modifican la fisiología vegetal o limitan el desarrollo de organismos patógenos.

Dentro de este grupo, las bacterias del género *Rhizobium* se distinguen por las asociaciones simbióticas que establecen principalmente con las leguminosas. Su capacidad para formar nódulos radicales y fijar nitrógeno atmosférico ha permitido utilizarlas históricamente como inoculantes destinados a mejorar la nutrición de los cultivos. Vejan et al. (2016) señala que esta función convierte a las bacterias simbióticas en uno de los ejemplos más consolidados de biofertilización. No obstante, las investigaciones posteriores demostraron que determinadas cepas también pueden favorecer plantas no leguminosas mediante la producción de compuestos reguladores, la movilización de nutrientes y otros mecanismos desarrollados en la rizosfera.

Las bacterias pertenecientes a los géneros *Azospirillum* y *Azotobacter* también han recibido una atención considerable por su asociación con cereales y otros cultivos de importancia económica. *Azospirillum* puede favorecer la formación de raíces laterales y pelos radicales, incrementando la capacidad de exploración del suelo y la absorción de agua y minerales. Por su parte, *Azotobacter* se caracteriza por su capacidad para fijar nitrógeno en condiciones de vida libre y producir sustancias que estimulan el desarrollo vegetal. Basu et al. (2021) destacan que el interés comercial por estos organismos ha impulsado la creación de numerosas formulaciones, aunque su desempeño depende de la viabilidad de las células, el método de aplicación y las condiciones del ambiente agrícola.

Los géneros *Bacillus* y *Pseudomonas* sobresalen por su diversidad metabólica y por la posibilidad de combinar funciones biofertilizantes, bioestimulantes y protectoras. Las especies de *Bacillus* presentan ventajas tecnológicas relacionadas con su capacidad para formar endosporas, característica que puede aumentar su resistencia durante el procesamiento y almacenamiento de los inoculantes. Las cepas de *Pseudomonas*, en cambio, poseen una elevada capacidad para colonizar la rizosfera y producir sideróforos, antibióticos y otros metabolitos vinculados con la competencia microbiana. Olanrewaju et al. (2017) explican que la multifuncionalidad de estas bacterias les permite intervenir simultáneamente en la nutrición vegetal, la regulación del crecimiento y la supresión de determinados patógenos.

Otro grupo relevante corresponde a las bacterias endófitas, capaces de colonizar el interior de las raíces, los tallos o las hojas sin producir síntomas de enfermedad. Su localización dentro de los tejidos les permite establecer una relación más estrecha con la planta y permanecer parcialmente protegidas frente a las fluctuaciones ambientales y la competencia existente en el suelo. Compant et al. (2019) describen que estos organismos pueden ingresar a través de heridas, zonas de emergencia de raíces laterales y otras aberturas naturales. Una vez establecidas, algunas cepas participan en la producción de reguladores del crecimiento, la adquisición de nutrientes y la activación de respuestas defensivas frente a factores bióticos y abióticos.

Los actinomicetos, especialmente las especies pertenecientes al género *Streptomyces*, también forman parte de las comunidades asociadas con las raíces. Estos microorganismos se caracterizan por producir una amplia variedad de metabolitos secundarios, enzimas y sustancias antimicrobianas que pueden limitar el desarrollo de organismos fitopatógenos. Su capacidad para degradar compuestos orgánicos complejos también contribuye al reciclaje de nutrientes y al mantenimiento de los procesos biológicos del suelo. Vejan et al. (2016) señala que la promoción del crecimiento vegetal puede resultar tanto de una estimulación directa de la planta como de la reducción de la presión ejercida por patógenos presentes en la rizosfera.

Los hongos micorrízicos arbusculares representan otro componente importante de las asociaciones beneficiosas establecidas en las raíces. Estos organismos forman estructuras especializadas dentro de las células corticales y desarrollan una red de hifas que amplía el volumen de suelo explorado por la planta. Esta asociación favorece especialmente la absorción de fósforo y otros nutrientes de baja movilidad, además de mejorar el acceso al agua en determinados ambientes. El análisis integrado de las interacciones entre bacterias y hongos resulta relevante porque el funcionamiento de la planta depende de comunidades diversas y no únicamente de organismos aislados, como plantea el enfoque de microbioma presentado por Backer et al. (2018).

La contribución de los hongos micorrízicos puede extenderse a la estructura y estabilidad del suelo, debido a la acción de las redes de hifas y de los compuestos producidos durante la asociación. Estas características pueden favorecer la agregación de las partículas, mejorar la retención de agua y crear condiciones apropiadas para otras poblaciones microbianas. La obra editada por Vejan et al. (2016) muestra que las respuestas vegetales deben interpretarse a partir de la interacción entre distintos grupos de microorganismos y los procesos que ocurren alrededor de las raíces. Por ello, la utilización conjunta de hongos micorrízicos y bacterias beneficiosas constituye una línea de investigación orientada a mejorar la nutrición y adaptación de los cultivos.

Los hongos del género *Trichoderma* han sido estudiados tradicionalmente por su capacidad para limitar el crecimiento de patógenos mediante competencia, antibiosis y micoparasitismo. Sin embargo, también pueden establecer interacciones favorables con las raíces y producir metabolitos que estimulan su desarrollo. Esta doble función ha impulsado su incorporación en productos dirigidos tanto al control biológico como a la bioestimulación vegetal. Desde una perspectiva funcional, estos organismos muestran que la promoción del crecimiento puede producirse directamente mediante la estimulación fisiológica o indirectamente a través de la disminución del daño ocasionado por enfermedades, distinción que también se aplica a las bacterias beneficiosas (Mhlongo et al., 2018).

La literatura reciente muestra, además, un interés creciente por los consorcios microbianos, formulados mediante la combinación de dos o más organismos con funciones complementarias. Estos productos pueden integrar bacterias fijadoras de nitrógeno, solubilizadoras de fósforo, productoras de fitohormonas o antagonistas de patógenos. De Souza

et al. (2015) explican que la cooperación metabólica puede ampliar el conjunto de funciones disponibles para la planta; no obstante, la compatibilidad entre las cepas debe comprobarse antes de su aplicación. La presencia de varios organismos no garantiza automáticamente una respuesta favorable, ya que pueden surgir relaciones de competencia que reduzcan la supervivencia o actividad de alguno de los integrantes.

El desarrollo de consorcios también busca incrementar la estabilidad de los inoculantes frente a las variaciones del suelo y del clima. Una comunidad funcionalmente diversa podría responder mejor que una cepa individual ante cambios en la disponibilidad de nutrientes, humedad o temperatura. Sin embargo, Backer et al. (2018) advierten que el diseño de estas formulaciones requiere conocer las interacciones entre los microorganismos incorporados, el microbioma nativo y el genotipo vegetal. Por consiguiente, la investigación actual se orienta hacia la selección racional de comunidades microbianas, en lugar de combinar organismos únicamente por sus características individuales observadas en el laboratorio.

En conjunto, los principales grupos de microorganismos beneficiosos presentan diferencias taxonómicas, ecológicas y funcionales, pero comparten la capacidad de modificar favorablemente el desempeño vegetal. Las rizobacterias y bacterias endófitas concentran la evidencia más abundante, mientras que los hongos micorrízicos, los actinomicetos y los hongos antagonistas amplían las posibilidades de intervención sobre la nutrición, la sanidad y la adaptación de los cultivos. La perspectiva propuesta por Pardo-Díaz et al. (2021) destaca que el aprovechamiento de esta diversidad debe considerar las condiciones propias de cada sistema agrícola. Por tanto, la selección de un microorganismo o consorcio debe sustentarse en su compatibilidad con el cultivo, su capacidad de colonización y su estabilidad bajo las condiciones ambientales donde será aplicado.

#### **PRINCIPALES MECANISMOS DE ACCIÓN DE LOS MICROORGANISMOS PROMOTORES DEL CRECIMIENTO VEGETAL**

La capacidad de los microorganismos promotores del crecimiento vegetal para mejorar el desempeño de los cultivos se explica mediante una diversidad de procesos nutricionales, fisiológicos, bioquímicos y ecológicos. Las primeras investigaciones concentraron su atención en la fijación biológica del nitrógeno, debido a su contribución directa a la nutrición vegetal; sin embargo, los estudios posteriores demostraron que las respuestas beneficiosas también pueden originarse en la movilización de nutrientes, la producción de reguladores del crecimiento, la modificación de la arquitectura radical y la protección frente a organismos patógenos. Vejan et al. (2016) destacan que esta diversidad funcional permite que una misma cepa influya en diferentes componentes del crecimiento. De manera complementaria, Olanrewaju et al. (2017) explica que los efectos observados suelen ser el resultado de varios mecanismos que actúan simultáneamente.

Con fines analíticos, estos mecanismos suelen clasificarse en directos e indirectos. Los primeros inciden sobre la nutrición y la fisiología de la planta mediante procesos como la fijación de nitrógeno, la solubilización de fósforo, la producción de fitohormonas y la regulación de la concentración de etileno. Los mecanismos indirectos actúan principalmente mediante la disminución del daño causado por organismos fitopatógenos, la competencia por nutrientes y espacio, la producción de antibióticos y enzimas hidrolíticas, así como la inducción de respuestas defensivas en la planta. Olanrewaju et al. (2017) señalan que esta clasificación facilita la comprensión de las principales rutas de acción, aunque las fronteras entre ambas categorías no siempre son estrictas.

La distinción entre mecanismos directos e indirectos resulta útil, pero no debe conducir a interpretar las funciones microbianas como procesos aislados. La producción de sideróforos, por ejemplo, puede favorecer la adquisición de hierro y, al mismo tiempo, restringir su disponibilidad para determinados patógenos. De manera similar, la modificación del sistema radical puede incrementar la absorción de nutrientes y mejorar la capacidad de la planta para enfrentar condiciones de déficit hídrico. Mhlongo et al. (2018) sostienen que esta complementariedad explica la multifuncionalidad de muchas rizobacterias. Desde una perspectiva ecológica, Backer et al. (2018) añaden que la respuesta final depende también de las interacciones establecidas dentro del microbioma vegetal.

### **Fijación biológica del nitrógeno: del mecanismo clásico a una visión multifuncional**

La fijación biológica del nitrógeno fue uno de los primeros mecanismos asociados con la utilización agrícola de microorganismos beneficiosos. Este proceso consiste en la conversión del nitrógeno atmosférico en formas que pueden incorporarse al metabolismo biológico, mediante la actividad del complejo enzimático nitrogenasa. Su relevancia agronómica radica en que el nitrógeno constituye un nutriente esencial para la síntesis de proteínas, ácidos nucleicos y clorofila, pero su disponibilidad suele limitar el crecimiento de los cultivos. Vejan et al. (2016) señala que el aprovechamiento de organismos fijadores permitió consolidar el concepto de biofertilizante como una alternativa biológica destinada a mejorar la nutrición vegetal.

Las asociaciones simbióticas establecidas entre bacterias del género *Rhizobium* y las leguminosas representan el ejemplo más conocido de fijación biológica. En estas interacciones, las bacterias colonizan las raíces y favorecen la formación de nódulos, dentro de los cuales se desarrolla el proceso de reducción del nitrógeno atmosférico. La planta proporciona compuestos carbonados y un ambiente adecuado para el microorganismo, mientras recibe nitrógeno en formas metabólicamente aprovechables. Esta relación demuestra que la promoción del crecimiento puede surgir de una asociación altamente especializada entre el hospedante y la bacteria, por lo que la compatibilidad entre ambos constituye una condición fundamental para obtener respuestas favorables.

Posteriormente, la investigación se amplió hacia bacterias asociativas y de vida libre capaces de fijar nitrógeno sin formar nódulos especializados. Entre ellas se encuentran especies de *Azospirillum*, *Azotobacter* y otros géneros que habitan la rizosfera o los tejidos internos de las plantas. Vejan et al. (2016) explican que estos organismos pueden contribuir parcialmente a la nutrición nitrogenada, aunque su efecto no siempre es suficiente para cubrir todos los requerimientos del cultivo. Su importancia se relaciona también con otras capacidades, como la producción de reguladores del crecimiento y la estimulación del sistema radical.

Los estudios desarrollados en cereales y leguminosas demuestran que los incrementos de crecimiento obtenidos después de la inoculación no dependen únicamente de la cantidad de nitrógeno fijado. de Souza et al. (2015) observaron que las bacterias asociadas con estos cultivos pueden combinar la fijación de nitrógeno con la producción de fitohormonas, la movilización de nutrientes y la protección frente a condiciones desfavorables. Esta evidencia modificó la interpretación tradicional del mecanismo, pues mostró que la respuesta agronómica debe evaluarse como el resultado de varias funciones microbianas y no exclusivamente mediante la cantidad de nitrógeno incorporado.

La influencia de los microorganismos fijadores sobre la arquitectura radical refuerza esta interpretación multifuncional. Al estimular la formación de raíces laterales y pelos radicales, las bacterias pueden ampliar la superficie de contacto entre la planta y el suelo, favoreciendo la absorción de agua y minerales. Olanrewaju et al. (2017) explica que esta modificación fisiológica puede producir beneficios importantes incluso cuando la contribución directa de nitrógeno es limitada. Por consiguiente, la evaluación de estas cepas debe incluir variables relacionadas con el desarrollo de las raíces, el estado nutricional y el rendimiento, además de la cuantificación del nitrógeno fijado.

Desde una perspectiva aplicada, el uso de bacterias fijadoras puede contribuir a reducir parcialmente la dependencia de fertilizantes nitrogenados y los impactos ambientales asociados con su utilización excesiva. Sin embargo, esta sustitución no debe plantearse de manera automática ni uniforme, porque la eficacia depende del cultivo, la cepa, el suelo, el clima y las prácticas de manejo. De Souza et al. (2015) advierten que la actividad de los microorganismos introducidos está condicionada por las características del ambiente edáfico y por la interacción con las comunidades residentes. En consecuencia, la inoculación debe integrarse con programas de fertilización ajustados a las necesidades reales de cada sistema productivo.

El conocimiento actual sitúa la fijación biológica dentro de una estrategia más amplia de manejo del microbioma. Backer et al. (2018) señalan que el valor de las bacterias fijadoras no reside únicamente en su capacidad para aportar nitrógeno, sino también en su posible integración con otros organismos que movilizan nutrientes, regulan el crecimiento o protegen las raíces. Esta visión abre la posibilidad de diseñar consorcios microbianos funcionales, aunque exige comprobar previamente la compatibilidad entre sus integrantes. Así, la fijación de nitrógeno ha pasado

de considerarse un mecanismo independiente a interpretarse como parte de una red de procesos que contribuyen conjuntamente al desarrollo vegetal.

### **Solubilización y movilización de fósforo: un mecanismo cuya importancia ha aumentado en la literatura reciente**

El fósforo es un elemento indispensable para el metabolismo energético, la división celular, el desarrollo radicular y la formación de estructuras reproductivas. Aunque muchos suelos contienen cantidades considerables de este nutriente, una proporción importante permanece retenida en compuestos minerales u orgánicos que las plantas no pueden absorber directamente. Esta baja disponibilidad conduce frecuentemente a la aplicación intensiva de fertilizantes fosfatados, cuya eficiencia puede disminuir debido a procesos de fijación y precipitación. Vejan et al. (2016) reconoce que los microorganismos capaces de transformar formas insolubles de fósforo constituyen un componente importante de los biofertilizantes agrícolas.

La solubilización del fósforo mineral ocurre principalmente mediante la producción de ácidos orgánicos y otras sustancias capaces de modificar el pH alrededor de las células microbianas. Estos compuestos pueden liberar el fósforo unido al calcio, hierro o aluminio y aumentar temporalmente su disponibilidad en la solución del suelo. Olanrewaju et al. (2017) explica que determinadas bacterias también producen protones y agentes quelantes que participan en este proceso. Sin embargo, la expresión de estas capacidades en medios de laboratorio no garantiza necesariamente que la misma cepa mantenga una actividad equivalente después de ser introducida en un suelo agrícola.

Los microorganismos también pueden intervenir en la mineralización del fósforo orgánico mediante la producción de fosfatasas, fitasas y otras enzimas. Estas moléculas degradan compuestos presentes en los residuos vegetales, la materia orgánica y otras fracciones del suelo, liberando formas de fósforo que pueden ser aprovechadas por las plantas. Olanrewaju et al. (2017) señalan que esta vía enzimática complementa los procesos de solubilización mineral y amplía las posibilidades funcionales de las bacterias promotoras. Por tanto, la movilización de fósforo comprende diferentes rutas cuya importancia varía según la composición química del suelo.

La eficacia del proceso está condicionada por factores como el pH, la humedad, la temperatura, la disponibilidad de carbono y la presencia de otros microorganismos. De Souza et al. (2015) explican que las características físicas y químicas del suelo modifican tanto la supervivencia de las bacterias como la expresión de sus actividades metabólicas. Además, el fósforo liberado puede volver a inmovilizarse o ser utilizado por otros componentes del microbioma antes de que la planta logre absorberlo. Esta dinámica permite comprender por qué los resultados obtenidos en medios de cultivo suelen ser superiores a los observados bajo condiciones de campo.

La respuesta vegetal también depende de la capacidad de los organismos para colonizar zonas próximas a las raíces. La producción de ácidos y enzimas resulta agronómicamente relevante cuando ocurre en espacios donde el nutriente liberado puede ser absorbido por la planta. La interacción con los exudados radicales y la competencia por los nichos de colonización influyen, por tanto, en la eficacia del mecanismo. Finkel et al. (2017) destacan que la aptitud para establecer poblaciones persistentes en la rizosfera constituye una característica tan importante como la actividad metabólica identificada durante la selección inicial.

El interés por las bacterias solubilizadoras ha aumentado debido a la necesidad de mejorar el aprovechamiento de las reservas existentes en el suelo y reducir las pérdidas asociadas con la fertilización fosfatada. No obstante, estos inoculantes deben considerarse complementos de un manejo nutricional integrado y no sustitutos universales de los fertilizantes. Backer et al. (2018) advierten que la eficacia de los productos microbianos puede disminuir cuando las cepas no se encuentran adaptadas al cultivo o al ambiente donde son aplicadas. En consecuencia, su desarrollo requiere ensayos que relacionen la actividad de solubilización con la absorción efectiva del nutriente y la respuesta productiva de la planta.

La movilización de fósforo adquiere mayor relevancia cuando se combina con otras funciones, como la producción de fitohormonas o el estímulo del sistema radical. Una planta con raíces más desarrolladas puede explorar un volumen mayor de suelo y aprovechar con mayor eficiencia el nutriente liberado por la actividad microbiana. Vejan et al. (2016) destacan que numerosas cepas solubilizadoras presentan esta multifuncionalidad, lo que dificulta atribuir la respuesta

vegetal a una sola ruta de acción. Por ello, la evaluación debe considerar conjuntamente la disponibilidad de fósforo, el desarrollo radical, el estado nutricional y el rendimiento del cultivo.

### **Producción de fitohormonas: de la regulación del crecimiento a la modulación de la respuesta fisiológica vegetal**

La producción de compuestos con actividad hormonal representa uno de los mecanismos más estudiados en las interacciones entre microorganismos y plantas. Esta capacidad demostró que las bacterias beneficiosas no actúan únicamente sobre la disponibilidad de nutrientes, sino que pueden modificar directamente procesos relacionados con la división, elongación y diferenciación celular. Entre los reguladores producidos por estos organismos se encuentran auxinas, giberelinas y citoquininas, aunque su presencia y concentración varían entre especies y cepas. Olanrewaju et al. (2017) destaca que estas sustancias influyen en la arquitectura de la planta y pueden modificar significativamente la respuesta obtenida después de la inoculación.

El ácido indolacético es la auxina microbiana más ampliamente investigada debido a su influencia sobre el desarrollo del sistema radical. En concentraciones apropiadas, este compuesto puede estimular la elongación celular, la formación de raíces laterales y la aparición de pelos absorbentes, ampliando la superficie disponible para captar agua y nutrientes. Olanrewaju et al. (2017) explican que la producción bacteriana de auxinas forma parte de un proceso de comunicación metabólica entre la planta y los microorganismos. Los exudados radicales aportan precursores, como el triptófano, que pueden ser utilizados por las bacterias para sintetizar estos reguladores.

La relación entre la concentración hormonal y la respuesta vegetal no es lineal. Una cantidad moderada de auxinas puede estimular la formación de raíces, mientras que niveles excesivos pueden inhibir el crecimiento de la raíz principal o generar alteraciones desfavorables. Vejan et al. (2016) señalan que la respuesta depende de la cantidad producida por la cepa, de la sensibilidad del genotipo vegetal y del equilibrio hormonal preexistente en la planta. Por esta razón, la identificación cualitativa de la producción de ácido indolacético no resulta suficiente para determinar el potencial agronómico de un microorganismo.

Las giberelinas producidas por determinadas bacterias pueden influir en la germinación, la elongación de los tallos y el desarrollo de órganos vegetales, mientras que las citoquininas intervienen en la división celular y en la regulación del crecimiento de brotes y raíces. Estos efectos pueden complementar la acción de las auxinas y modificar el equilibrio entre el desarrollo radical y la parte aérea. Mhlongo et al. (2018) sostienen que las hormonas microbianas deben interpretarse como componentes de una red de señalización en la que participan simultáneamente moléculas producidas por la planta y por los organismos asociados.

La modificación de la arquitectura radical puede generar efectos indirectos sobre la nutrición y la tolerancia al estrés. Una raíz más ramificada tiene mayores posibilidades de explorar el suelo, establecer asociaciones con otros microorganismos y mantener la absorción de agua durante periodos de disponibilidad limitada. Liu et al. (2020) explican que estas respuestas adquieren particular importancia en cultivos expuestos a sequía, salinidad y otras condiciones adversas. Sin embargo, el efecto protector depende de que el microorganismo mantenga su actividad y logre establecerse en la raíz durante el periodo de estrés.

La producción hormonal también interactúa con otros mecanismos microbianos. Una bacteria puede sintetizar auxinas y, al mismo tiempo, fijar nitrógeno, solubilizar fósforo o reducir la concentración de etileno mediante la actividad ACC desaminasa. Olanrewaju et al. (2017) indican que esta combinación puede generar respuestas superiores a las obtenidas mediante una capacidad individual. No obstante, la contribución relativa de cada mecanismo varía según la etapa fenológica, el estado nutricional y las condiciones ambientales, lo que dificulta establecer relaciones causales mediante la evaluación de una sola variable.

Desde la perspectiva del microbioma, las hormonas constituyen señales que pueden modificar no solo el crecimiento vegetal, sino también las interacciones entre las comunidades asociadas con la raíz. Backer et al. (2018) plantean que el conocimiento de estas redes de comunicación permitirá diseñar consorcios con capacidades funcionales complementarias. Sin embargo, la combinación de varias cepas productoras de hormonas requiere evaluar cuidadosamente las concentraciones generadas y sus posibles interacciones. El objetivo no consiste en maximizar

indiscriminadamente la producción hormonal, sino en mantener una regulación compatible con las necesidades fisiológicas de la planta.

En síntesis, la producción de fitohormonas ha pasado de considerarse una propiedad aislada de determinadas bacterias a interpretarse como un mecanismo de comunicación y regulación compartido entre la planta y su microbiota. Este avance permite explicar por qué los microorganismos pueden modificar la estructura de las raíces, la absorción de recursos y la respuesta frente al estrés sin aportar directamente cantidades significativas de nutrientes. La utilidad agrícola de este mecanismo dependerá de seleccionar cepas compatibles, capaces de producir concentraciones adecuadas y mantener su actividad bajo las condiciones específicas del sistema productivo.

### **Producción de sideróforos: más allá de la adquisición de hierro**

La disponibilidad de hierro constituye un factor determinante para el metabolismo de las plantas y de los microorganismos, pues este elemento participa en la respiración, la fotosíntesis y numerosos procesos enzimáticos. Aunque puede encontrarse en cantidades abundantes en el suelo, con frecuencia permanece en formas químicas poco solubles y difícilmente aprovechables. Para enfrentar esta limitación, determinadas bacterias producen sideróforos, moléculas de bajo peso molecular con una elevada afinidad por el hierro férrico. Olanrewaju et al. (2017) explican que estos compuestos captan el hierro del ambiente y forman complejos que pueden ser reconocidos y transportados por los microorganismos productores.

En las primeras investigaciones, los sideróforos fueron interpretados principalmente como un mecanismo destinado a facilitar la adquisición microbiana de hierro. Posteriormente, se comprobó que su producción también puede influir en la nutrición vegetal, especialmente cuando los complejos formados o el hierro movilizado resultan accesibles para la planta. Vejan et al. (2016) incluyó esta capacidad entre las funciones mediante las cuales las rizobacterias pueden mejorar indirectamente el estado nutricional de los cultivos. No obstante, el aprovechamiento vegetal depende del tipo de sideróforo, de la especie cultivada y de las condiciones químicas del suelo.

La función de estas moléculas adquiere una dimensión adicional cuando se analiza la competencia que ocurre en la rizosfera. Al captar el hierro disponible con gran eficiencia, las bacterias beneficiosas pueden restringir el acceso de otros microorganismos a este recurso esencial. Olanrewaju et al. (2017) señala que esta competencia puede limitar el crecimiento de determinados fitopatógenos y reducir su capacidad para colonizar las raíces. De este modo, los sideróforos actúan simultáneamente como instrumentos de adquisición nutricional y como componentes indirectos del control biológico.

La eficacia protectora del mecanismo depende de la capacidad de las bacterias beneficiosas para colonizar las raíces y mantener una producción suficiente de sideróforos. Si la cepa inoculada no logra establecerse, su actividad puede ser superada por las poblaciones residentes o por los propios patógenos. Compant et al. (2019) destacan que la competencia por hierro forma parte de un conjunto más amplio de interacciones ecológicas en el que también intervienen la disponibilidad de carbono, el espacio físico y las señales químicas producidas por la planta. Por consiguiente, la detección de sideróforos en condiciones de laboratorio debe complementarse con pruebas de colonización y eficacia en ambientes productivos.

La producción de estas moléculas también puede interactuar con otros mecanismos de protección. Algunas bacterias capaces de captar hierro sintetizan simultáneamente antibióticos, enzimas hidrolíticas y compuestos volátiles, ampliando su capacidad para limitar a los patógenos. Olanrewaju et al. (2017) indican que la acción combinada de estos procesos puede generar una supresión más estable que la obtenida mediante un solo mecanismo. Esta multifuncionalidad representa una característica valiosa para la selección de cepas destinadas a formular inoculantes con funciones biofertilizantes y bioprotectoras.

Desde la perspectiva del microbioma vegetal, el hierro actúa como un recurso capaz de modificar la composición y actividad de las comunidades microbianas. Los organismos que producen sideróforos o poseen receptores compatibles pueden adquirir ventajas competitivas y ocupar determinados nichos alrededor de las raíces. Backer et al. (2018) sostienen que estas relaciones deben considerarse al diseñar consorcios microbianos, porque los compuestos

producidos por una cepa pueden ser aprovechados por otros integrantes de la comunidad. En algunos casos puede establecerse cooperación, mientras que en otros la competencia por el hierro puede reducir la estabilidad del inoculante.

El aprovechamiento agronómico de los microorganismos productores de sideróforos ofrece posibilidades para reducir la presión de enfermedades y complementar la nutrición de los cultivos. En sistemas sostenibles, estas funciones pueden disminuir parcialmente la dependencia de productos fitosanitarios cuando se integran con otras prácticas de manejo. Pardo-Díaz et al. (2021) destacan que las bacterias promotoras deben evaluarse en función de las condiciones locales y de su capacidad para mantener la actividad biológica en el suelo. Por ello, la selección de cepas debe considerar tanto la producción de sideróforos como su adaptación al cultivo, al ambiente y al microbioma nativo.

### **Actividad ACC desaminasa: un avance en la comprensión de la tolerancia al estrés**

La identificación de la actividad ACC desaminasa representó un avance significativo para comprender cómo algunas bacterias ayudan a las plantas a mantener su crecimiento bajo condiciones ambientales adversas. Esta enzima actúa sobre el ácido 1-aminociclopropano-1-carboxílico, conocido como ACC, que constituye el precursor inmediato del etileno. Aunque esta fitohormona participa normalmente en el desarrollo vegetal, su acumulación excesiva durante situaciones de estrés puede inhibir la elongación de las raíces y acelerar procesos de senescencia. Olanrewaju et al. (2017) señala que las bacterias productoras de ACC desaminasa pueden disminuir el ACC disponible y moderar indirectamente la síntesis de etileno.

La interacción comienza cuando la planta libera parte del ACC hacia la rizosfera y las bacterias lo incorporan como fuente de nitrógeno. La enzima microbiana degrada este compuesto en amoníaco y  $\alpha$ -cetobutirato, reduciendo su concentración alrededor de la raíz. Como consecuencia, la planta puede mantener niveles de etileno menos perjudiciales durante periodos de estrés. Este proceso no elimina completamente la hormona ni interrumpe sus funciones normales, sino que contribuye a evitar una acumulación excesiva que limitaría el desarrollo vegetal.

La actividad ACC desaminasa adquiere especial importancia durante la sequía, debido a que el déficit de agua puede elevar la producción de etileno y restringir el crecimiento del sistema radical. Al moderar esta respuesta, las bacterias permiten que las raíces continúen explorando el suelo y accedan a reservas de humedad ubicadas a mayor profundidad. Liu et al. (2020) documentaron que las PGPR pueden mejorar el estado hídrico, la biomasa y el desempeño fisiológico de diferentes cultivos sometidos a condiciones estresantes. Sin embargo, la magnitud del beneficio varía según la cepa, la planta hospedante y la intensidad del déficit.

En suelos salinos, la acumulación de sales genera desequilibrios osmóticos, toxicidad iónica y alteraciones metabólicas que también pueden aumentar el etileno asociado con el estrés. Las bacterias con actividad ACC desaminasa contribuyen a mantener el crecimiento radical y pueden favorecer la absorción de agua en estas condiciones. Olanrewaju et al. (2017) explica que este mecanismo suele complementarse con la producción de auxinas y otros reguladores, de modo que la bacteria reduce una señal inhibitoria mientras estimula la formación de nuevas estructuras radicales.

El efecto protector también ha sido estudiado frente a temperaturas extremas, contaminación por metales y deficiencias nutricionales. En estos escenarios, la regulación del etileno puede disminuir parcialmente las consecuencias fisiológicas del estrés, aunque no elimina su causa ambiental. Liu et al. (2020) advierten que las bacterias deben considerarse parte de estrategias integradas que incluyan manejo del agua, nutrición, selección varietal y conservación del suelo. Presentarlas como una solución aislada podría conducir a expectativas superiores a su capacidad real de respuesta.

La presencia del gen asociado con la ACC desaminasa o la detección de actividad enzimática en laboratorio tampoco garantiza una respuesta agronómica consistente. Para producir un efecto, la bacteria debe sobrevivir, colonizar el sistema radical y mantener su actividad durante el periodo en que la planta enfrenta el estrés. De Souza et al. (2015) destacan que la humedad, el pH, la temperatura y la competencia microbiana pueden modificar el establecimiento de

las cepas inoculadas. Por ello, la selección debe combinar pruebas bioquímicas con evaluaciones realizadas en condiciones próximas a los ambientes productivos.

El interés biotecnológico por este mecanismo ha aumentado ante la mayor frecuencia de sequías, salinización y variaciones térmicas que afectan a los sistemas agrícolas. Backer et al. (2018) señalan que la actividad ACC desaminasa constituye un criterio relevante para seleccionar organismos destinados a mejorar la resiliencia de los cultivos. No obstante, los inoculantes deben diseñarse para condiciones ambientales específicas y validarse en diferentes ciclos de producción. Esta precaución resulta necesaria porque la respuesta de una cepa puede variar cuando cambian el genotipo vegetal, el suelo o la intensidad del estrés.

En síntesis, la ACC desaminasa permite comprender cómo una interacción microbiana puede modificar la regulación hormonal de la planta sin aportar directamente nutrientes. Su acción contribuye a mantener el crecimiento radical y la actividad fisiológica bajo condiciones adversas, especialmente cuando se combina con la producción de auxinas, la movilización de nutrientes y otros mecanismos beneficiosos. Olanrewaju et al. (2017) sitúan esta capacidad dentro de la naturaleza multifuncional de las bacterias promotoras. Por consiguiente, su aprovechamiento debe basarse en la selección de cepas capaces de integrar varias funciones y conservar su eficacia en campo.

### **Inducción de resistencia sistémica: de la defensa vegetal al fortalecimiento de la resiliencia de los cultivos**

Además de mejorar la nutrición y el crecimiento, determinados microorganismos pueden preparar a la planta para responder con mayor rapidez y eficacia frente a la presencia de patógenos. Este fenómeno se conoce como resistencia sistémica inducida y consiste en un estado fisiológico de alerta que fortalece los mecanismos defensivos sin provocar necesariamente una activación permanente y costosa. Mhlango et al. (2018) explican que las bacterias asociadas con las raíces pueden desencadenar señales que se transmiten hacia otros tejidos, ampliando la protección más allá del lugar donde ocurre la colonización.

La inducción de resistencia comienza con el reconocimiento de moléculas o metabolitos producidos por los microorganismos beneficiosos. Entre los compuestos involucrados se encuentran lipopolisacáridos, sideróforos, compuestos orgánicos volátiles y otros determinantes microbianos capaces de activar rutas de señalización vegetal. Olanrewaju et al. (2017) señalan que estas señales pueden preparar enzimas defensivas, reforzar las paredes celulares y favorecer la acumulación de metabolitos relacionados con la protección. La planta no permanece constantemente en un nivel máximo de defensa, sino que adquiere la capacidad de reaccionar con mayor intensidad cuando se presenta una amenaza.

Esta respuesta se diferencia de la resistencia sistémica adquirida, que suele originarse después de una infección localizada y se relaciona estrechamente con determinadas rutas hormonales. La resistencia inducida por microorganismos beneficiosos se encuentra asociada principalmente con la señalización mediada por jasmonato y etileno, aunque existe interacción entre diferentes rutas. Olanrewaju et al. (2017) indica que las respuestas defensivas no deben interpretarse como circuitos independientes, porque el equilibrio hormonal varía según la planta, el microorganismo y el patógeno involucrados.

Uno de los principales beneficios de este mecanismo es su alcance sistémico. Una bacteria establecida en la raíz puede generar señales que incrementen la preparación defensiva de hojas, tallos y otros órganos alejados del punto de colonización. Compant et al. (2019) explican que las bacterias rizosféricas y endófitas pueden influir en la fisiología completa del hospedante mediante una comunicación molecular continua. Esta propiedad amplía las posibilidades de protección frente a patógenos que atacan diferentes tejidos y no mantienen contacto directo con el microorganismo inoculado.

La resistencia inducida no implica que la planta se vuelva inmune ni que el inoculante pueda reemplazar todos los métodos de control fitosanitario. Su eficacia depende de la capacidad de colonización, de la intensidad del ataque y de la compatibilidad entre la cepa, la planta y el patógeno. Vejan et al. (2016) señalan que los resultados pueden variar ampliamente entre sistemas experimentales, debido a las diferencias genéticas y ambientales. Por ello, este mecanismo debe integrarse con prácticas preventivas, monitoreo sanitario y manejo adecuado del cultivo.

La activación defensiva también puede generar costos metabólicos cuando se mantiene de manera excesiva, pues la planta debe distribuir recursos entre crecimiento y protección. Un microorganismo eficaz debe estimular una respuesta equilibrada que permita enfrentar al patógeno sin reducir innecesariamente la productividad. Desde la perspectiva del microbioma, Backer et al. (2018) sostienen que las comunidades beneficiosas pueden contribuir a mantener este equilibrio mediante señales complementarias. No obstante, todavía se requiere profundizar en las interacciones entre las distintas rutas hormonales y los microorganismos presentes en condiciones de campo.

La inducción de resistencia suele actuar conjuntamente con mecanismos de antagonismo directo. Una bacteria puede limitar al patógeno mediante sideróforos, antibióticos o enzimas y, simultáneamente, preparar las defensas de la planta. Olanrewaju et al. (2017) explican que esta combinación ofrece una protección más amplia que la proporcionada por una única ruta. La selección de microorganismos multifuncionales puede ser especialmente útil en sistemas donde las enfermedades interactúan con condiciones de sequía, salinidad o deficiencias nutricionales.

En conjunto, la resistencia sistémica inducida muestra que los microorganismos promotores no solo modifican la disponibilidad de recursos, sino también la capacidad de la planta para reconocer y responder frente a amenazas biológicas. Este mecanismo conecta la microbiología de la rizosfera con la inmunidad vegetal y ofrece posibilidades para disminuir parcialmente la utilización de fitosanitarios. Pardo-Díaz et al. (2021) resaltan el potencial de estas bacterias dentro de programas de agricultura sostenible, aunque su adopción exige validar la eficacia y estabilidad de las cepas en los contextos productivos donde serán empleadas.

### **Biocontrol de fitopatógenos: evolución desde el antagonismo microbiano hacia la regulación del microbioma**

El biocontrol de fitopatógenos constituye uno de los mecanismos indirectos más relevantes de los microorganismos promotores del crecimiento vegetal. Su efecto se manifiesta cuando las poblaciones beneficiosas reducen la capacidad de hongos, bacterias y otros agentes perjudiciales para colonizar los tejidos y ocasionar enfermedades. Las primeras investigaciones interpretaron este proceso principalmente como un antagonismo directo basado en la producción de sustancias antimicrobianas. Sin embargo, Mhlongo et al. (2018) explican que la protección también puede depender de la competencia por recursos, la ocupación de nichos, la síntesis de enzimas, la modificación del ambiente rizosférico y la activación de las defensas de la planta.

La competencia por espacio y nutrientes constituye una de las primeras barreras que enfrentan los patógenos al intentar establecerse en la rizosfera. Las bacterias beneficiosas con elevada capacidad de colonización utilizan los compuestos liberados por las raíces y ocupan rápidamente las superficies disponibles, reduciendo las oportunidades de establecimiento de otros organismos. Finkel et al. (2017) explican que esta capacidad competitiva depende de la movilidad de las bacterias, su respuesta frente a los exudados radicales y su aptitud para formar poblaciones estables. Por consiguiente, una cepa con actividad antimicrobiana en el laboratorio puede perder eficacia en el campo cuando no consigue colonizar apropiadamente el sistema radical.

La producción de antibióticos y otros metabolitos secundarios representa otro mecanismo importante de antagonismo. Algunas especies de *Bacillus* y *Pseudomonas* sintetizan compuestos capaces de inhibir la germinación de esporas, alterar las membranas celulares o limitar el crecimiento de hongos y bacterias patógenas. Olanrewaju et al. (2017) destacan que la naturaleza y concentración de estas sustancias dependen de las características de la cepa y de las condiciones ambientales. Asimismo, su expresión en el suelo puede variar según la disponibilidad de nutrientes, el pH y las señales químicas emitidas por la planta o por otros integrantes de la comunidad microbiana.

Las enzimas hidrolíticas también participan en la supresión de enfermedades mediante la degradación de estructuras celulares de determinados patógenos. Las quitinasas y glucanasas pueden actuar sobre componentes de las paredes celulares de los hongos, mientras que las proteasas y otras enzimas contribuyen a alterar diferentes estructuras biológicas. Vejan et al. (2016) incluyen esta actividad entre los mecanismos indirectos utilizados por las rizobacterias para proteger a las plantas. Su eficacia puede incrementarse cuando se combina con la producción de antibióticos, sideróforos y otros metabolitos, generando varias formas de presión biológica sobre el organismo perjudicial.

La competencia por hierro mediada por sideróforos amplía esta acción protectora. Las bacterias capaces de captar eficientemente este elemento pueden reducir su disponibilidad para determinados patógenos y limitar su crecimiento en la rizosfera. Olanrewaju et al. (2017) explica que este proceso permite vincular la adquisición de nutrientes con el control biológico, debido a que una misma molécula puede favorecer al microorganismo productor y colocar en desventaja a sus competidores. Por ello, el biocontrol no debe entenderse únicamente como la producción de sustancias tóxicas, sino como una modificación de las condiciones ecológicas que determinan el establecimiento de las diferentes poblaciones.

Algunos microorganismos beneficiosos también producen compuestos orgánicos volátiles capaces de actuar sin que exista contacto físico directo con el patógeno o con los tejidos vegetales. Estas moléculas pueden inhibir la germinación de esporas, alterar el crecimiento de hongos perjudiciales y modificar determinadas respuestas fisiológicas de la planta. Vejan et al. (2016) incluyen la producción de metabolitos volátiles entre las estrategias mediante las cuales las rizobacterias estimulan el crecimiento y limitan la actividad de organismos causantes de enfermedades. No obstante, la concentración y persistencia de estos compuestos pueden variar considerablemente entre los ambientes controlados y las condiciones de campo.

El control biológico también puede producirse mediante la inducción de resistencia sistémica. En este caso, el microorganismo no necesita eliminar directamente al patógeno, pues prepara a la planta para responder con mayor rapidez e intensidad ante una infección. Compant et al. (2019) sostienen que las bacterias presentes en la rizosfera y la endosfera establecen procesos de comunicación molecular con su hospedante que pueden modificar su capacidad defensiva. La combinación entre el antagonismo directo y la estimulación de las defensas ofrece una protección más amplia, especialmente cuando intervienen patógenos con diferentes estrategias de infección.

La interpretación contemporánea del biocontrol ha desplazado progresivamente la atención desde el antagonismo entre dos organismos hacia la regulación del microbioma vegetal. Backer et al. (2018) señalan que la introducción de una cepa beneficiosa puede modificar las relaciones existentes entre múltiples poblaciones y alterar la estructura funcional de la comunidad asociada con las raíces. En este contexto, la supresión de una enfermedad puede depender de la acción conjunta de varios microorganismos y de la capacidad del sistema para conservar un equilibrio ecológico desfavorable para el patógeno.

Esta perspectiva ha impulsado el desarrollo de consorcios formados por microorganismos con funciones complementarias. Una formulación puede integrar cepas capaces de competir por recursos, producir antibióticos, degradar estructuras de los patógenos y estimular las defensas vegetales. Sin embargo, de Souza et al. (2015) advierten que la combinación debe diseñarse cuidadosamente, porque pueden surgir relaciones de competencia o incompatibilidad entre sus integrantes. El éxito de estos productos depende, por tanto, de las interacciones entre el inoculante, el microbioma residente, el genotipo vegetal y las características físicas y químicas del suelo.

Desde el punto de vista productivo, los agentes microbianos de control pueden contribuir a disminuir la dependencia de productos fitosanitarios sintéticos, pero no deben considerarse sustitutos automáticos de todas las prácticas convencionales. Pardo-Díaz et al. (2021) resaltan que su utilización alcanza una mayor efectividad cuando forma parte de programas integrados que incluyen prevención, monitoreo sanitario, prácticas culturales y manejo adecuado de la fertilidad del suelo. La eficacia también puede variar según la presión de la enfermedad, las condiciones climáticas y la capacidad de establecimiento de las cepas en cada sistema productivo.

En síntesis, el biocontrol ha evolucionado desde una concepción centrada principalmente en la producción de antibióticos hacia una interpretación ecológica que integra la competencia por recursos, la síntesis de enzimas, la producción de sideróforos y la activación de las defensas vegetales. Mhlongo et al. (2018) explican que estos mecanismos pueden actuar de manera complementaria y proporcionar una protección más amplia frente a diferentes organismos fitopatógenos. Desde la perspectiva planteada por Backer et al. (2018), la eficacia tampoco depende únicamente de la actividad antagonista de una cepa, sino de su capacidad para adaptarse al ambiente y establecer relaciones funcionales con la planta y las comunidades microbianas residentes.

### **Integración de los mecanismos de acción: una visión multifuncional de los microorganismos promotores del crecimiento vegetal**

El análisis conjunto de los mecanismos descritos demuestra que la promoción del crecimiento vegetal rara vez depende de una sola función microbiana. Una misma cepa puede fijar nitrógeno, movilizar fósforo, producir fitohormonas, sintetizar sideróforos, regular la concentración de etileno y limitar el desarrollo de organismos patógenos. Olanrewaju et al. (2017) explican que esta multifuncionalidad permite a las bacterias responder a distintas necesidades de la planta y adaptarse a los cambios producidos en el ambiente. Por ello, la caracterización de los microorganismos debe superar las evaluaciones basadas en una única prueba bioquímica e integrar diferentes indicadores funcionales.

La interacción entre los mecanismos nutricionales y hormonales constituye un ejemplo claro de esta integración. La solubilización de fósforo puede aumentar la cantidad de nutriente disponible alrededor de las raíces, mientras que la producción microbiana de auxinas estimula la formación de estructuras radicales capaces de aprovecharlo. De manera similar, la fijación de nitrógeno puede complementarse con cambios en la arquitectura de las raíces y con una mayor absorción de agua y minerales. de Souza et al. (2015) señalan que las respuestas observadas en cereales y leguminosas suelen explicarse mejor mediante la combinación de capacidades microbianas que por la acción aislada de un solo proceso.

Los mecanismos relacionados con la tolerancia al estrés también se encuentran estrechamente conectados. La actividad ACC desaminasa puede disminuir la acumulación perjudicial de etileno, mientras que las auxinas contribuyen a mantener el desarrollo del sistema radical y la movilización de nutrientes favorece el funcionamiento metabólico. Liu et al. (2020) muestran que estas acciones pueden mejorar el crecimiento, el estado hídrico y la actividad fisiológica de las plantas sometidas a sequía, salinidad u otras condiciones desfavorables. No obstante, la magnitud del beneficio depende de la intensidad del estrés y de la capacidad del microorganismo para permanecer activo en la rizosfera.

De igual manera, las funciones de protección vegetal operan mediante diversas rutas complementarias. Los sideróforos reducen la disponibilidad de hierro para determinados patógenos, los antibióticos y las enzimas hidrolíticas limitan su crecimiento, y la resistencia sistémica inducida prepara las defensas de la planta. Mhlongo et al. (2018) sostienen que la acción conjunta de estos mecanismos puede generar una protección más amplia y estable frente a distintos agentes causales. Esta integración disminuye la dependencia de una única forma de antagonismo, cuya eficacia podría reducirse cuando cambian las condiciones del cultivo o las características del patógeno.

La multifuncionalidad no significa que todos los mecanismos se expresen con la misma intensidad ni que permanezcan activos durante todo el ciclo productivo. Su manifestación depende de la disponibilidad de nutrientes, la composición de los exudados radicales, la etapa fenológica de la planta y las relaciones establecidas con otros microorganismos. Olanrewaju et al. (2017) explica que algunas funciones adquieren mayor relevancia bajo condiciones de estrés, mientras que otras predominan durante etapas de crecimiento activo. Por consiguiente, las capacidades identificadas en el laboratorio deben validarse bajo condiciones representativas del ambiente donde se pretende utilizar el inoculante.

La planta también participa activamente en la regulación de estas interacciones mediante la liberación de compuestos orgánicos que atraen, seleccionan o estimulan a determinadas poblaciones microbianas. Los azúcares, aminoácidos y ácidos orgánicos presentes en los exudados proporcionan recursos y señales que modifican la actividad de los organismos próximos a las raíces. Finkel et al. (2017) destacan que la colonización de la rizosfera depende de la capacidad de las bacterias para reconocer y utilizar estas sustancias. En consecuencia, la promoción del crecimiento debe interpretarse como una relación bidireccional y no como un efecto ejercido unilateralmente por el microorganismo sobre una planta pasiva.

La incorporación del concepto de microbioma ha ampliado esta interpretación al mostrar que diferentes poblaciones pueden distribuirse las funciones necesarias para beneficiar a la planta. Dentro de una comunidad, ciertos organismos movilizan nutrientes, otros producen reguladores del crecimiento y algunos limitan el establecimiento de patógenos. Backer et al. (2018) señalan que estas redes funcionales fundamentan el interés actual por los consorcios microbianos

y los microbiomas sintéticos. Su finalidad consiste en integrar cepas compatibles cuyas capacidades se complementen y generen una respuesta más estable frente a las variaciones ambientales.

Sin embargo, la combinación de varias cepas no produce necesariamente un inoculante más eficaz. Los organismos pueden competir por los mismos nutrientes, inhibirse mediante metabolitos o alterar negativamente su capacidad de colonización. De Souza et al. (2015) advierten que las interacciones entre los microorganismos incorporados y el microbioma nativo deben evaluarse antes de formular productos multicepa. Por esta razón, el diseño de consorcios debe basarse en evidencias de compatibilidad, cooperación funcional y desempeño agronómico, y no únicamente en la suma de características observadas individualmente.

La visión multifuncional también modifica los criterios utilizados para seleccionar microorganismos con potencial agrícola. Además de comprobar sus actividades bioquímicas, es necesario evaluar su capacidad de colonización, estabilidad genética, supervivencia durante el almacenamiento y adaptación a diferentes condiciones edáficas. Basu et al. (2021) destacan que una cepa con múltiples funciones pierde utilidad comercial cuando no conserva su viabilidad en la formulación o no consigue establecerse después de la aplicación. En consecuencia, la evaluación microbiológica debe integrarse con pruebas agronómicas y tecnológicas que permitan anticipar su comportamiento en condiciones productivas.

El enfoque multifuncional también exige considerar la especificidad de las interacciones entre la planta, la cepa y el ambiente. Un microorganismo puede producir resultados favorables en un cultivo y presentar una eficacia limitada en otra especie o bajo diferentes condiciones del suelo. Posada Castaño et al. (2021) identificaron una elevada heterogeneidad en las respuestas reportadas por los estudios sobre PGPR, relacionada con las diferencias entre los microorganismos, los cultivos y los procedimientos experimentales. Esta variabilidad respalda la necesidad de desarrollar inoculantes adaptados a contextos productivos concretos, en lugar de asumir que existe una cepa con eficacia universal.

En conjunto, los mecanismos directos e indirectos forman una red dinámica en la que intervienen el microorganismo, la planta, el suelo y las condiciones ambientales. Backer et al. (2018) señalan que la respuesta final no puede atribuirse automáticamente a una característica aislada, debido a que surge de la interacción entre procesos nutricionales, hormonales, defensivos y ecológicos. Esta visión integradora permite interpretar con mayor precisión los resultados experimentales y orientar el desarrollo de inoculantes adaptados a cultivos y ambientes específicos. El avance hacia aplicaciones comerciales consistentes dependerá de comprender estas relaciones y trasladarlas a formulaciones capaces de conservar su funcionalidad después del almacenamiento y de la aplicación en campo.

## **AVANCES RECIENTES EN LA INVESTIGACIÓN SOBRE MICROORGANISMOS PROMOTORES DEL CRECIMIENTO VEGETAL**

Durante los últimos años, la investigación sobre microorganismos promotores del crecimiento vegetal ha experimentado una transformación significativa, impulsada por el desarrollo de nuevas herramientas de biología molecular, microbiología, biotecnología y análisis de datos. Los estudios iniciales se concentraban principalmente en aislar cepas, caracterizar funciones específicas y evaluar sus efectos sobre el crecimiento de las plantas en condiciones controladas. Backer et al. (2018) señalan que el enfoque contemporáneo incorpora el análisis del microbioma, la selección de comunidades funcionales y el desarrollo de tecnologías dirigidas a mejorar la estabilidad de los inoculantes en condiciones productivas.

Uno de los cambios más relevantes consiste en el desplazamiento desde la descripción de microorganismos individuales hacia la comprensión de las comunidades asociadas con las plantas. Esta transición ha permitido reconocer que las respuestas agronómicas dependen de las interacciones entre el organismo inoculado, las poblaciones residentes, la planta hospedante y las características del ambiente. De Souza et al. (2015) explican que la composición del suelo y la microbiota nativa pueden modificar la supervivencia, colonización y actividad de las bacterias introducidas. Por ello, las investigaciones recientes prestan mayor atención al contexto ecológico en el que se produce la promoción del crecimiento.

Los avances científicos también han permitido profundizar en las bases genéticas y moleculares de los mecanismos de acción. La identificación de genes asociados con la fijación de nitrógeno, la producción de fitohormonas, la movilización de nutrientes, la síntesis de sideróforos y la actividad ACC desaminasa facilita la selección de cepas con características funcionales determinadas. Olanrewaju et al. (2017) sostienen que la comprensión de estos mecanismos permite relacionar la presencia de capacidades metabólicas con las respuestas observadas en las plantas. Sin embargo, la detección de un gen no garantiza su expresión ni la eficacia agronómica del microorganismo bajo todas las condiciones ambientales.

Otro avance corresponde al desarrollo de consorcios microbianos destinados a combinar capacidades complementarias. Estas formulaciones buscan integrar organismos que intervienen en la nutrición, la regulación del crecimiento, la tolerancia al estrés y la protección frente a enfermedades. Backer et al. (2018) destacan que los consorcios pueden ofrecer mayor estabilidad funcional que los inoculantes basados en una sola cepa, siempre que exista compatibilidad entre sus integrantes. Por consiguiente, su diseño requiere estudiar las relaciones de cooperación, competencia y complementariedad que se establecen entre las poblaciones seleccionadas.

La tecnología de formulación también ha adquirido una importancia creciente debido a que el potencial biológico de una cepa puede perderse durante la producción, el almacenamiento o la aplicación. Basu et al. (2021) explican que la elección del soporte, la concentración celular, la humedad, la temperatura y el periodo de conservación influyen directamente sobre la viabilidad del inoculante. Los avances en encapsulación, materiales protectores y sistemas de liberación controlada buscan conservar la actividad microbiana y facilitar el establecimiento de las cepas después de su incorporación al suelo o a las semillas.

En conjunto, los avances recientes muestran una transición desde investigaciones predominantemente descriptivas hacia enfoques integrados que relacionan la ecología microbiana, la fisiología vegetal y el desarrollo tecnológico. Posada Castaño et al. (2021) evidencian que la literatura sobre PGPR ha crecido considerablemente y ha diversificado sus áreas de aplicación. No obstante, todavía persiste la necesidad de validar los hallazgos en diferentes regiones, cultivos y ciclos productivos para determinar si las innovaciones desarrolladas pueden mantener su eficacia fuera de las condiciones experimentales.

### **Del estudio de microorganismos individuales al análisis del microbioma vegetal**

Las investigaciones pioneras se basaron principalmente en el aislamiento de microorganismos individuales y en la evaluación de capacidades como la fijación de nitrógeno, la solubilización de fósforo o la producción de auxinas. Este procedimiento permitió identificar numerosas cepas beneficiosas y establecer las bases de la microbiología agrícola aplicada. Vejan et al. (2016) destacó la función de las rizobacterias como biofertilizantes y contribuyó a consolidar un campo centrado inicialmente en la caracterización de organismos cultivables. Sin embargo, este enfoque proporcionaba una representación parcial de la diversidad y las interacciones presentes en la rizosfera.

Los métodos convencionales dependían de la capacidad de los microorganismos para desarrollarse en medios artificiales, lo que excluía a numerosas poblaciones que no podían cultivarse mediante los procedimientos disponibles. El desarrollo de técnicas moleculares permitió detectar una diversidad considerablemente mayor y analizar las comunidades sin necesidad de aislar todos sus integrantes. Backer et al. (2018) señalan que estas herramientas modificaron la interpretación del entorno asociado con la raíz, al mostrar que las funciones beneficiosas se distribuyen entre organismos pertenecientes a diferentes grupos taxonómicos.

El concepto de microbioma vegetal amplió el objeto de estudio al incorporar los microorganismos, sus genes, metabolitos, funciones e interacciones dentro de los diversos compartimentos de la planta. Este enfoque comprende la rizosfera, la superficie de las raíces, los tejidos internos y las partes aéreas, cada una con comunidades particulares. Compant et al. (2019) demostraron que las bacterias beneficiosas pueden colonizar tanto el exterior como el interior de las plantas, donde mantienen diferentes grados de asociación con el hospedante. En consecuencia, la promoción del crecimiento dejó de atribuirse exclusivamente a los organismos presentes en el suelo próximo a las raíces.

La investigación del microbioma también ha permitido reconocer que la planta ejerce una influencia selectiva sobre las comunidades que la rodean. La especie, el genotipo, la etapa de desarrollo y la composición de los exudados radicales pueden favorecer a determinadas poblaciones y limitar a otras. Finkel et al. (2017) explican que las bacterias capaces de reconocer las señales de la planta y utilizar los compuestos liberados por las raíces presentan ventajas durante la colonización. Por lo tanto, la estructura del microbioma es el resultado de una interacción dinámica entre las características vegetales y las condiciones del suelo.

Las propiedades físicas y químicas del ambiente también influyen sobre la composición y actividad de las comunidades microbianas. El pH, la textura, la humedad, la materia orgánica y la disponibilidad de nutrientes pueden modificar la presencia de determinados organismos y la expresión de sus funciones. De Souza et al. (2015) destacan que estas variables ayudan a explicar por qué una cepa puede producir resultados favorables en un suelo y mostrar una eficacia limitada en otro. El análisis del microbioma permite estudiar esta variabilidad dentro de un contexto ecológico más amplio.

Otro aporte importante ha sido el reconocimiento de las redes de cooperación y competencia establecidas entre los microorganismos. Algunas poblaciones intercambian metabolitos, transforman compuestos producidos por otros organismos o desarrollan funciones complementarias que benefician a la planta. En cambio, otras compiten por nutrientes y espacios de colonización o producen sustancias inhibitorias. Backer et al. (2018) sostienen que comprender estas relaciones resulta indispensable para diseñar consorcios microbianos y evitar combinaciones incompatibles que reduzcan la eficacia de los inoculantes.

El análisis comunitario también ha modificado la interpretación de la supresión de enfermedades. En determinados suelos, la resistencia frente a los patógenos puede depender de la actividad conjunta de diversas poblaciones y no de un antagonista individual. Mhlongo et al. (2018) señalan que la protección vegetal integra mecanismos como la competencia, la producción de sideróforos, el antagonismo y la inducción de resistencia sistémica. Desde esta perspectiva, el microbioma puede actuar como una barrera funcional que limita el establecimiento de organismos perjudiciales.

En América Latina, el enfoque basado en microbiomas ofrece posibilidades relevantes debido a la diversidad biológica y edafoclimática de la región. Pardo-Díaz et al. (2021) resaltan el potencial de las bacterias nativas para contribuir a sistemas agrícolas sostenibles, especialmente cuando se encuentran adaptadas a condiciones locales de suelo y clima. Su caracterización puede facilitar el desarrollo de productos con mayor capacidad de establecimiento que las cepas seleccionadas en ambientes diferentes. No obstante, se requiere ampliar la infraestructura científica y los ensayos de validación para convertir esta diversidad en soluciones agrícolas accesibles.

El paso desde microorganismos individuales hacia comunidades no implica abandonar el aislamiento y la caracterización de cepas. Estas etapas continúan siendo necesarias para conocer sus funciones, verificar su seguridad y evaluar su compatibilidad. Posada Castaño et al. (2021) muestran que una parte importante de la investigación todavía se concentra en la identificación de PGPR y sus mecanismos específicos. El cambio consiste en situar cada cepa dentro de un sistema biológico complejo y analizar cómo su desempeño se modifica por las relaciones con la planta, el suelo y las poblaciones residentes.

En síntesis, el enfoque del microbioma vegetal ha ampliado la comprensión de la promoción del crecimiento al integrar diversidad, funciones e interacciones ecológicas. Backer et al. (2018) consideran que esta perspectiva proporciona una base para diseñar inoculantes más específicos y predecir con mayor precisión su comportamiento. El desafío consiste ahora en traducir la información obtenida mediante técnicas moleculares en estrategias de manejo que puedan aplicarse bajo condiciones productivas sin perder de vista la complejidad y variabilidad de los agroecosistemas.

### **Tecnologías ómicas y comprensión funcional de los microorganismos promotores del crecimiento vegetal**

La incorporación de las tecnologías ómicas constituye uno de los avances más importantes para comprender la diversidad y el funcionamiento de los microorganismos asociados con las plantas. Los métodos tradicionales permitían aislar cepas y evaluar determinadas propiedades en condiciones de laboratorio, pero ofrecían información limitada

sobre los genes, proteínas y metabolitos implicados en la interacción. Backer et al. (2018) señalan que la genómica, la transcriptómica, la proteómica y la metabolómica han ampliado considerablemente la capacidad para estudiar los mecanismos de promoción del crecimiento y las relaciones que se establecen dentro del microbioma vegetal.

La genómica permite identificar genes relacionados con la fijación de nitrógeno, la movilización de fósforo, la producción de fitohormonas, la síntesis de sideróforos y la actividad ACC desaminasa. Esta información facilita la caracterización funcional de las cepas y ayuda a seleccionar organismos con capacidades potencialmente útiles para determinados cultivos o condiciones ambientales. Olanrewaju et al. (2017) explican que el conocimiento de las bases genéticas de estos mecanismos permite comprender mejor las diferencias funcionales existentes entre especies e incluso entre cepas pertenecientes a un mismo género.

El análisis genómico también contribuye a evaluar la seguridad de los organismos destinados a la producción de inoculantes. Antes de utilizar una cepa a escala agrícola, es necesario comprobar que no contenga determinantes asociados con patogenicidad, producción de toxinas o resistencia antimicrobiana potencialmente transferible. Backer et al. (2018) destacan que esta evaluación resulta esencial para avanzar desde la caracterización experimental hacia la comercialización. Por tanto, la información genómica no solo permite identificar funciones beneficiosas, sino también descartar microorganismos que puedan representar riesgos ambientales, vegetales o sanitarios.

Aunque la presencia de un gen indica una capacidad potencial, no demuestra que este se encuentre activo durante la interacción con la planta. La transcriptómica permite superar parcialmente esta limitación mediante el análisis de los genes que se expresan en un momento y una condición determinados. De esta manera, es posible estudiar cómo cambia la actividad del microorganismo cuando entra en contacto con la raíz, enfrenta estrés ambiental o compite con otras poblaciones. Olanrewaju et al. (2017) muestra que mecanismos como la regulación del etileno dependen de condiciones fisiológicas específicas, por lo que su estudio requiere conocer cuándo y bajo qué circunstancias se activan las rutas correspondientes.

La transcriptómica también permite analizar las respuestas de la planta frente a la inoculación. Mediante esta herramienta pueden identificarse cambios en genes relacionados con el crecimiento radical, la adquisición de nutrientes, la defensa y la tolerancia al estrés. Compant et al. (2019) explican que las bacterias asociadas con la rizosfera y la endosfera modifican diversos procesos fisiológicos del hospedante. El análisis simultáneo de la expresión génica de la planta y del microorganismo ofrece, por tanto, una visión más completa de la comunicación molecular establecida durante la interacción.

La proteómica complementa esta información mediante la identificación de las proteínas producidas en determinadas condiciones. Este análisis permite detectar enzimas relacionadas con la transformación de nutrientes, la producción de metabolitos, la colonización y la respuesta al estrés. Olanrewaju et al. (2017) señalan que numerosos mecanismos de promoción vegetal dependen de enzimas y proteínas cuya abundancia puede variar según las condiciones ambientales. Por ello, la proteómica ayuda a establecer si las capacidades previstas a partir del genoma se traducen efectivamente en componentes funcionales.

La metabolómica, por su parte, examina los compuestos de bajo peso molecular producidos por los microorganismos y las plantas durante su interacción. Esta herramienta permite detectar fitohormonas, ácidos orgánicos, sideróforos, compuestos volátiles y otras moléculas implicadas en la comunicación y regulación del crecimiento. Olanrewaju et al. (2017) demostraron que la producción microbiana de auxinas forma parte de un intercambio metabólico condicionado por los compuestos liberados por las raíces. La metabolómica puede ampliar esta comprensión al analizar simultáneamente diferentes señales y productos metabólicos.

La metagenómica ha resultado especialmente valiosa para estudiar comunidades que no pueden caracterizarse completamente mediante métodos de cultivo. A partir del material genético recuperado directamente del suelo o de los tejidos vegetales, esta tecnología permite estimar la composición taxonómica y el potencial funcional del microbioma. Backer et al. (2018) sostienen que su aplicación ha revelado una diversidad microbiana mucho mayor que la identificada mediante procedimientos convencionales. Sin embargo, la información obtenida representa

principalmente capacidades potenciales y debe complementarse con otras herramientas para determinar cuáles funciones se encuentran activas.

La metatranscriptómica, la metaproteómica y la metabolómica comunitaria permiten avanzar desde la descripción de la composición hacia el análisis del funcionamiento real del microbioma. Estas aproximaciones pueden identificar qué genes se expresan, qué proteínas se producen y qué metabolitos circulan dentro de una comunidad determinada. De Souza et al. (2015) destacan que el comportamiento de los microorganismos se modifica por las características del suelo y por las relaciones con las poblaciones residentes. Por consiguiente, el análisis funcional debe realizarse en condiciones que representen la complejidad del ambiente agrícola.

La integración de las diferentes tecnologías ómicas ofrece una visión más completa que la obtenida mediante su utilización separada. La genómica muestra las capacidades potenciales, la transcriptómica identifica los genes activos, la proteómica revela los productos funcionales y la metabolómica registra el resultado químico de la actividad biológica. Backer et al. (2018) consideran que esta integración puede contribuir a seleccionar cepas, diseñar consorcios y desarrollar modelos capaces de relacionar la composición microbiana con la respuesta del cultivo. No obstante, la gran cantidad de información generada requiere herramientas bioinformáticas y criterios rigurosos de interpretación. Uno de los principales desafíos consiste precisamente en traducir los datos moleculares en recomendaciones agronómicas. La identificación de genes o metabolitos beneficiosos no garantiza que el inoculante incremente el rendimiento bajo condiciones comerciales. Basu et al. (2021) advierten que la eficacia final también depende de la formulación, el almacenamiento, la supervivencia y la capacidad de colonización. Por tanto, los resultados obtenidos mediante tecnologías ómicas deben validarse con ensayos fisiológicos, agronómicos y productivos desarrollados en diferentes ambientes.

En América Latina, la aplicación de estas tecnologías ofrece la posibilidad de caracterizar microorganismos nativos asociados con ecosistemas de elevada diversidad. Pardo-Díaz et al. (2021) destacan que las bacterias adaptadas a las condiciones regionales pueden constituir una fuente importante para el desarrollo de inoculantes sostenibles. Sin embargo, su aprovechamiento requiere fortalecer la infraestructura de secuenciación, las capacidades bioinformáticas y la colaboración entre instituciones. Estas condiciones permitirían transformar el conocimiento de la diversidad microbiana local en productos adaptados a los cultivos y ambientes de la región.

En síntesis, las tecnologías ómicas han transformado el estudio de los microorganismos promotores al permitir examinar simultáneamente su diversidad, potencial genético, actividad funcional y comunicación metabólica. Olanrewaju et al. (2017) muestran que la promoción del crecimiento comprende múltiples rutas que deben analizarse de manera integrada. El principal reto consiste en vincular la información molecular con respuestas agronómicas reproducibles, de manera que los avances científicos contribuyan efectivamente al diseño de inoculantes seguros, estables y funcionales bajo condiciones de campo.

### **Consortios microbianos y bioinoculantes de nueva generación**

El desarrollo de consorcios microbianos representa una de las tendencias más relevantes dentro de la investigación actual sobre microorganismos promotores del crecimiento vegetal. A diferencia de los inoculantes convencionales, formulados generalmente con una sola cepa, estos productos integran dos o más organismos seleccionados por sus capacidades complementarias. Backer et al. (2018) señalan que esta estrategia busca reproducir parcialmente la diversidad funcional del microbioma vegetal y mejorar la estabilidad de las respuestas agronómicas. Su diseño parte del reconocimiento de que los procesos de nutrición, crecimiento, protección y tolerancia al estrés difícilmente pueden ser desarrollados con la misma eficacia por un único microorganismo.

Los primeros productos microbianos se fundamentaron en la selección de cepas con una capacidad sobresaliente, como la fijación de nitrógeno o la solubilización de fósforo. Aunque este enfoque permitió desarrollar biofertilizantes importantes, los resultados obtenidos bajo condiciones de campo mostraron una elevada variabilidad. Basu et al. (2021) explican que una cepa puede perder eficacia cuando enfrenta fluctuaciones ambientales, limitaciones

nutricionales o competencia con el microbioma nativo. Los consorcios buscan disminuir esta vulnerabilidad mediante la combinación de organismos con diferentes capacidades de adaptación y mecanismos de acción.

La complementariedad funcional constituye el principal criterio para seleccionar los integrantes de un consorcio. Una formulación puede incluir bacterias fijadoras de nitrógeno, microorganismos solubilizadores de fósforo, productores de fitohormonas y agentes de control biológico. de Souza et al. (2015) muestran que el crecimiento de cereales y leguminosas responde a la interacción de varias capacidades microbianas y no únicamente a un proceso nutricional aislado. Por consiguiente, la combinación racional de funciones puede ampliar el beneficio proporcionado al cultivo durante distintas etapas de su desarrollo.

La cooperación metabólica también puede incrementar la eficiencia de las comunidades inoculadas. Algunos microorganismos producen compuestos que sirven como sustratos para otras poblaciones, mientras que determinadas cepas transforman sustancias que resultarían inaccesibles para sus compañeras. De Souza et al. (2015) indican que estas relaciones pueden favorecer la persistencia y actividad conjunta de los organismos en el suelo. Sin embargo, la existencia de capacidades complementarias no garantiza que las cepas cooperen, por lo que las interacciones deben comprobarse experimentalmente antes de incorporarlas a una misma formulación.

La compatibilidad entre los integrantes constituye uno de los principales desafíos del diseño de consorcios. Los microorganismos pueden competir por las mismas fuentes de carbono, ocupar nichos similares o producir metabolitos inhibitorios que afecten a las otras cepas. Olanrewaju et al. (2017) destacan que muchas bacterias producen antibióticos, sideróforos y enzimas como parte de sus estrategias ecológicas. Estas propiedades pueden resultar beneficiosas frente a los patógenos, pero también podrían reducir la supervivencia de otros organismos incluidos en el producto si no se evalúa previamente su compatibilidad.

Los consorcios deben considerar igualmente la compatibilidad con el genotipo vegetal. Las especies y variedades difieren en la composición de sus exudados radicales, en sus necesidades nutricionales y en su capacidad para establecer relaciones con determinadas poblaciones. Finkel et al. (2017) explican que la colonización depende de la capacidad de las bacterias para reconocer las señales emitidas por las raíces y utilizar los recursos disponibles. Por esta razón, una comunidad eficaz en un cultivo puede no presentar el mismo comportamiento cuando se aplica en otra especie o variedad.

El ambiente edáfico también condiciona el establecimiento y funcionamiento del inoculante. Factores como el pH, la textura, la humedad, la materia orgánica y la disponibilidad de nutrientes pueden favorecer a algunos integrantes y limitar a otros. De Souza et al. (2015) señalan que estas variables modifican tanto la supervivencia microbiana como la expresión de los mecanismos de promoción del crecimiento. En consecuencia, los consorcios de nueva generación deben diseñarse para condiciones edafoclimáticas definidas y validarse en diferentes ambientes antes de recomendar su utilización generalizada.

Otra estrategia consiste en utilizar microorganismos nativos previamente adaptados a las condiciones locales. Estas cepas pueden presentar una mayor capacidad para competir con las comunidades residentes y tolerar las variaciones propias del ambiente donde fueron aisladas. Pardo-Díaz et al. (2021) destacan el potencial de las bacterias nativas para desarrollar soluciones compatibles con los sistemas agrícolas regionales. No obstante, su selección debe incluir evaluaciones de seguridad, estabilidad funcional, compatibilidad y eficacia agronómica, pues la adaptación local no garantiza por sí sola un efecto beneficioso.

El diseño racional de consorcios se apoya progresivamente en tecnologías ómicas y herramientas bioinformáticas. El análisis genómico permite identificar capacidades metabólicas y posibles factores de riesgo, mientras que la transcriptómica y la metabolómica ayudan a determinar si las funciones esperadas se expresan durante la interacción. Backer et al. (2018) sostienen que estas tecnologías pueden utilizarse para seleccionar comunidades con mayor complementariedad y menor probabilidad de incompatibilidad. De esta manera, la formulación deja de depender exclusivamente de combinaciones empíricas y avanza hacia la construcción de microbiomas sintéticos basados en evidencias funcionales.

Los microbiomas sintéticos representan una evolución de los consorcios convencionales. Estas comunidades se diseñan para reproducir funciones específicas observadas en microbiomas naturales, pero con una composición conocida y controlable. Su finalidad puede ser mejorar la adquisición de nutrientes, proteger frente a un patógeno o mantener el crecimiento bajo condiciones de estrés. Backer et al. (2018) indican que este enfoque ofrece posibilidades para estudiar relaciones causales entre la composición microbiana y la respuesta vegetal. Sin embargo, la estabilidad de estas comunidades puede modificarse después de su incorporación a un suelo con poblaciones previamente establecidas.

La formulación tecnológica resulta especialmente compleja cuando se combinan microorganismos con requerimientos fisiológicos diferentes. Las cepas pueden responder de manera desigual a la temperatura, humedad, oxígeno, materiales de soporte y tiempo de almacenamiento. Basu et al. (2021) explican que el desarrollo de un producto comercial exige conservar una población viable y funcional hasta el momento de la aplicación. En un consorcio, esta condición debe cumplirse para todos sus integrantes, evitando que una cepa domine durante el almacenamiento y modifique la composición prevista.

La evaluación de los consorcios debe comprobar si la combinación produce efectos aditivos, sinérgicos o antagonistas. Un efecto aditivo ocurre cuando el resultado equivale aproximadamente a la suma de las aportaciones individuales, mientras que la sinergia implica una respuesta superior a la esperada. En cambio, el antagonismo reduce la eficacia de uno o varios integrantes. Posada Castaño et al. (2021) muestran que la heterogeneidad metodológica de los estudios dificulta comparar las respuestas obtenidas con diferentes inoculantes. Por ello, se requieren diseños experimentales que incluyan las cepas individuales, sus combinaciones y un tratamiento sin inoculación.

La validación en campo constituye una etapa indispensable para determinar la utilidad de los productos de nueva generación. Los resultados de laboratorio o invernadero no reproducen completamente la variabilidad climática, la competencia microbiana y las prácticas de manejo presentes en los sistemas comerciales. Basu et al. (2021) advierten que numerosos inoculantes prometedores pierden eficacia al pasar a condiciones productivas. Los ensayos deben realizarse en distintos ciclos y localidades para establecer la estabilidad de la respuesta e identificar los ambientes donde el consorcio ofrece mayores beneficios.

En síntesis, los consorcios microbianos y los microbiomas sintéticos representan una evolución hacia bioinoculantes más integrados y funcionalmente diversos. Backer et al. (2018) consideran que su potencial depende de comprender las relaciones entre los integrantes, la planta, el microbioma nativo y el ambiente. El desafío no consiste simplemente en reunir varias cepas beneficiosas, sino en construir comunidades compatibles, seguras y capaces de mantener sus funciones durante la producción, el almacenamiento y la aplicación. Su consolidación requerirá integrar microbiología, biología molecular, ecología y evaluación agronómica bajo condiciones reales.

### **Innovaciones en formulaciones y tecnologías de bioinoculantes**

La formulación representa una etapa decisiva para transformar una cepa o un consorcio microbiano en un producto agrícola funcional. La identificación de microorganismos con propiedades beneficiosas no garantiza por sí misma su utilización práctica, debido a que las células deben conservarse viables durante la producción, el almacenamiento, el transporte y la aplicación. Basu et al. (2021) señalan que una formulación adecuada debe proporcionar protección física, disponibilidad de nutrientes y condiciones que mantengan la estabilidad fisiológica de los organismos. Asimismo, debe facilitar la aplicación del producto y favorecer el establecimiento de las poblaciones después de entrar en contacto con la semilla, la raíz o el suelo.

Los inoculantes tradicionales se han elaborado mediante soportes sólidos, líquidos o semisólidos que contienen las células microbianas y los componentes necesarios para conservarlas. Entre los materiales sólidos se han utilizado turba, lignito, arcillas y otros sustratos orgánicos o minerales, debido a su capacidad para retener humedad y proteger a los microorganismos. Sin embargo, Basu et al. (2021) explican que las características físicas y químicas de estos soportes pueden variar considerablemente y afectar la calidad del producto. Por esta razón, su selección requiere

analizar el pH, la capacidad de retención de agua, la ausencia de contaminantes y la compatibilidad con la cepa incorporada.

Las formulaciones líquidas ofrecen ventajas relacionadas con la facilidad de producción, homogeneización y aplicación mediante sistemas de riego o tratamientos de semillas. No obstante, la supervivencia de las células puede disminuir durante el almacenamiento debido a la falta de nutrientes, la acumulación de metabolitos o los cambios en las condiciones fisicoquímicas del medio. Basu et al. (2021) destacan que el uso de protectores osmóticos, estabilizantes y nutrientes en concentraciones controladas puede prolongar la viabilidad. Aun así, cada formulación debe adaptarse a las características fisiológicas del microorganismo y a las condiciones bajo las cuales será almacenada.

Uno de los principales avances tecnológicos corresponde a la encapsulación de las células microbianas dentro de matrices protectoras. Este procedimiento utiliza materiales capaces de formar cápsulas o microesferas que aíslan parcialmente a los organismos frente a la desecación, las variaciones térmicas y otras condiciones desfavorables. Backer et al. (2018) señalan que la encapsulación puede favorecer la supervivencia de las cepas y permitir una liberación gradual después de la aplicación. Esta característica resulta especialmente importante en suelos donde la competencia con el microbioma nativo limita el establecimiento inmediato del inoculante.

Los polímeros naturales y biodegradables han recibido una atención creciente para el desarrollo de estos sistemas de encapsulación. Materiales como el alginato pueden formar matrices capaces de retener células y liberarlas cuando cambian la humedad o las condiciones químicas del suelo. Basu et al. (2021) explican que estos soportes también pueden incorporar nutrientes, sustancias protectoras y compuestos que favorezcan la actividad microbiana. Sin embargo, su eficacia depende del tamaño de las partículas, la resistencia de la matriz y la velocidad con la que se degradan después de la aplicación.

La microencapsulación ofrece posibilidades para formular consorcios, pero también plantea desafíos adicionales. Los microorganismos incluidos pueden presentar diferentes requerimientos de oxígeno, humedad y nutrientes, por lo que una misma matriz no siempre proporciona condiciones adecuadas para todos ellos. De Souza et al. (2015) señalan que las interacciones entre cepas pueden modificar su supervivencia y actividad antes y después de la inoculación. Por consiguiente, las formulaciones multicepa deben controlar tanto la viabilidad individual como la conservación de las proporciones previstas entre los integrantes.

Los sistemas de liberación controlada constituyen otra innovación relevante. Estas tecnologías buscan regular el momento y la velocidad con que las células salen del soporte, evitando que toda la población quede expuesta inmediatamente a condiciones ambientales desfavorables. Backer et al. (2018) consideran que una liberación progresiva puede incrementar las oportunidades de colonización y prolongar la presencia del microorganismo alrededor de las raíces. Su diseño debe sincronizarse con la germinación, la aparición de exudados radicales y las etapas del cultivo en las que las funciones microbianas resultan más necesarias.

El tratamiento de semillas continúa siendo uno de los métodos más utilizados para aplicar inoculantes, debido a que coloca a los microorganismos cerca de las raíces desde las primeras etapas del desarrollo. La adherencia, la compatibilidad con los productos utilizados en la semilla y la supervivencia durante el almacenamiento son factores determinantes para su eficacia. Basu et al. (2021) advierten que determinados fungicidas, insecticidas o sustancias presentes en los recubrimientos pueden reducir la viabilidad de las células. Por ello, las formulaciones destinadas a semillas deben evaluarse en combinación con los demás componentes del tratamiento agrícola.

La aplicación directa al suelo o mediante sistemas de riego permite introducir mayores volúmenes de producto y distribuir los microorganismos en la zona radicular. Este procedimiento puede ser conveniente para cultivos establecidos o para formulaciones líquidas, aunque requiere controlar la calidad del agua y la compatibilidad con fertilizantes y productos fitosanitarios. De Souza et al. (2015) explican que las condiciones del suelo determinan la supervivencia y actividad de las bacterias introducidas. En consecuencia, la aplicación debe acompañarse de un manejo que favorezca la humedad, la materia orgánica y otras condiciones necesarias para su establecimiento.

La conservación de la viabilidad durante el almacenamiento continúa siendo uno de los principales indicadores de calidad. El tiempo de vida útil debe determinarse mediante recuentos periódicos de células y evaluaciones que

comprueben la conservación de las funciones beneficiosas. Basu et al. (2021) señalan que un producto puede mantener una concentración aparentemente suficiente y, al mismo tiempo, perder parte de su capacidad para colonizar o promover el crecimiento. Por esta razón, el control no debe limitarse al número de células, sino que debe incorporar pruebas de identidad, pureza y funcionalidad.

La calidad microbiológica adquiere mayor importancia cuando las formulaciones contienen organismos vivos destinados a liberarse en los agroecosistemas. Es necesario verificar la identidad de las cepas, evitar contaminaciones y comprobar la ausencia de características asociadas con riesgos sanitarios o ambientales. Backer et al. (2018) destacan que la comercialización de estos productos requiere protocolos capaces de garantizar seguridad y consistencia entre lotes. La variación en la composición o concentración puede afectar tanto la eficacia agronómica como la confianza de los productores en la tecnología.

Las innovaciones recientes también buscan utilizar subproductos agroindustriales como soportes o fuentes de nutrientes para la producción microbiana. Esta estrategia puede reducir costos, aprovechar residuos orgánicos y vincular el desarrollo de inoculantes con principios de economía circular. Sin embargo, los materiales deben someterse a caracterización y tratamiento para evitar contaminantes, variaciones excesivas o compuestos que inhiban a las cepas. Vejan et al. (2016) destaca que el desempeño de las bacterias en aplicaciones agrícolas depende del ambiente químico y biológico que rodea a las células, lo cual también se aplica a los materiales utilizados durante su formulación.

Otra tendencia consiste en adaptar los productos a las condiciones particulares de cada región y sistema de cultivo. Las formulaciones destinadas a zonas cálidas y secas deben ofrecer mayor protección frente a la temperatura y la desecación, mientras que aquellas utilizadas en ambientes húmedos requieren controlar el crecimiento de contaminantes. Pardo-Díaz et al. (2021) resaltan la importancia de desarrollar soluciones ajustadas a las características de los sistemas agrícolas locales. Esta adaptación puede mejorar la vida útil del producto y aumentar la probabilidad de que las cepas mantengan su actividad después de la aplicación.

En síntesis, las innovaciones en formulación buscan resolver la distancia existente entre el potencial observado en el laboratorio y el desempeño obtenido en los sistemas productivos. Basu et al. (2021) consideran que la eficacia de un inoculante depende tanto de las propiedades del microorganismo como de la tecnología utilizada para conservarlo y suministrarlo. La encapsulación, los sistemas de liberación controlada, los soportes biodegradables y las formulaciones específicas para semillas o suelo ofrecen alternativas prometedoras. No obstante, su consolidación requiere controles de calidad, validación en campo y análisis de viabilidad económica que garanticen productos seguros, estables y accesibles.

### **Agricultura de precisión e inteligencia artificial: nuevas herramientas para el aprovechamiento de los microorganismos promotores del crecimiento vegetal**

La integración de la microbiología agrícola con las tecnologías de agricultura de precisión representa una línea emergente para mejorar la selección y aplicación de los microorganismos promotores del crecimiento vegetal. Hasta ahora, gran parte de los inoculantes se ha utilizado mediante recomendaciones generales que no siempre consideran la variabilidad del suelo, el clima, el cultivo y el microbioma residente. Backer et al. (2018) señalan que la eficacia de estas tecnologías depende del contexto en el que son aplicadas, por lo que la incorporación de información ambiental puede contribuir a seleccionar cepas y estrategias de inoculación más apropiadas para cada sistema productivo.

Los sensores de suelo pueden registrar variables como humedad, temperatura, conductividad eléctrica y disponibilidad de determinados nutrientes. Esta información permite identificar ambientes donde las condiciones favorecen o limitan la supervivencia de los microorganismos introducidos. De Souza et al. (2015) explican que el pH, la humedad, la textura y la disponibilidad de nutrientes influyen directamente en el establecimiento y funcionamiento de las bacterias inoculadas. Por consiguiente, el monitoreo de estas variables puede ayudar a determinar el momento y el lugar más adecuados para realizar la aplicación.

La utilización de mapas de variabilidad espacial ofrece posibilidades para adaptar la inoculación a las características internas de cada terreno. Un lote agrícola puede contener zonas con diferencias importantes en materia orgánica,

compactación, disponibilidad de agua y actividad microbiana, por lo que una aplicación uniforme no necesariamente genera los mismos resultados en toda su superficie. Backer et al. (2018) destacan que la respuesta de los inoculantes se encuentra condicionada por las interacciones entre la cepa, la planta y el ambiente. Desde esta perspectiva, la agricultura de precisión puede facilitar estrategias diferenciadas según las condiciones identificadas dentro del sistema productivo.

El monitoreo fisiológico de los cultivos también puede utilizarse para evaluar la respuesta posterior a la inoculación. Variables como el vigor, la temperatura foliar, el contenido de clorofila y el crecimiento de las plantas pueden registrarse mediante sensores proximales, imágenes aéreas o plataformas de teledetección. Liu et al. (2020) muestran que las bacterias promotoras pueden modificar el estado hídrico, la actividad fotosintética y el crecimiento bajo condiciones de estrés. La medición continua de estos indicadores permitiría identificar con mayor precisión dónde y cuándo se manifiestan los efectos de los productos microbianos.

La información obtenida mediante sensores debe complementarse con datos microbiológicos que permitan conocer la presencia y persistencia de las cepas inoculadas. El seguimiento molecular puede ayudar a establecer si el microorganismo logró colonizar las raíces, cuánto tiempo permaneció activo y cómo modificó las comunidades residentes. Compant et al. (2019) señalan que la colonización constituye una condición indispensable para que muchas bacterias expresen sus funciones beneficiosas. La combinación de datos ambientales, fisiológicos y microbiológicos ofrecería una evaluación más completa que la medición exclusiva del rendimiento final.

La inteligencia artificial puede contribuir al análisis de estas grandes cantidades de información mediante la identificación de patrones difíciles de reconocer con procedimientos convencionales. Los modelos podrían relacionar las características genéticas y funcionales de las cepas con variables del suelo, condiciones climáticas y respuestas de los cultivos. La revisión de Posada Castaño et al. (2021) evidencia una considerable heterogeneidad entre los estudios sobre PGPR, lo que demuestra la necesidad de herramientas capaces de integrar resultados procedentes de diferentes condiciones experimentales. En este contexto, los métodos computacionales pueden apoyar la organización y comparación de datos complejos.

Los algoritmos predictivos también podrían utilizarse para estimar qué microorganismo o consorcio presenta mayor probabilidad de funcionar en un cultivo y ambiente determinados. Para construir estos modelos sería necesario disponer de bases de datos estandarizadas que incluyan información sobre la cepa, el hospedante, el suelo, el clima, el tratamiento y los resultados agronómicos. Backer et al. (2018) destacan que uno de los principales obstáculos para la comercialización consiste en la inconsistencia de las respuestas obtenidas bajo condiciones de campo. El análisis predictivo podría contribuir a reducir esta incertidumbre, aunque no reemplazaría la validación experimental.

La inteligencia artificial también ofrece posibilidades para el diseño de consorcios microbianos. Mediante el análisis de genes, rutas metabólicas y metabolitos, los modelos computacionales podrían identificar combinaciones funcionalmente complementarias y anticipar posibles relaciones de competencia. Olanrewaju et al. (2017) muestran que las bacterias promotoras actúan a través de múltiples mecanismos que pueden presentarse simultáneamente. La integración de esta información permitiría seleccionar consorcios con capacidades nutricionales, hormonales y protectoras adaptadas a necesidades agronómicas específicas.

No obstante, la utilidad de los modelos depende directamente de la calidad de los datos empleados durante su construcción. Información incompleta, procedimientos experimentales heterogéneos o muestras insuficientes pueden generar predicciones poco confiables. Posada Castaño et al. (2021) identificaron diferencias metodológicas importantes en la literatura sobre rizobacterias, lo que limita la comparación directa entre resultados. Por esta razón, el desarrollo de herramientas predictivas requiere protocolos estandarizados para describir los microorganismos, los tratamientos, las condiciones ambientales y las respuestas vegetales.

Otro desafío corresponde a la interpretación biológica de las predicciones. Un algoritmo puede reconocer asociaciones estadísticas entre determinadas cepas y respuestas agronómicas, pero estas relaciones no demuestran necesariamente la existencia de un mecanismo causal. Olanrewaju et al. (2017) explica que la promoción del crecimiento depende de procesos fisiológicos complejos que cambian según el microorganismo y el ambiente. En

consecuencia, las predicciones deben comprobarse mediante experimentos que permitan identificar los mecanismos responsables y evaluar la reproducibilidad de los resultados.

La aplicación de estas tecnologías también debe considerar las diferencias existentes en infraestructura, conectividad y capacidades técnicas entre regiones y tipos de productores. Las herramientas digitales pueden ampliar la precisión de las decisiones, pero su elevado costo o complejidad podría limitar el acceso en determinados sistemas agrícolas. Pardo-Díaz et al. (2021) resaltan que la transferencia de las innovaciones microbianas requiere capacitación, asistencia técnica y adaptación a las condiciones locales. Por ello, el desarrollo tecnológico debe acompañarse de soluciones accesibles que puedan incorporarse gradualmente en diferentes escalas productivas.

Desde una perspectiva aplicada, la integración puede realizarse mediante un proceso escalonado. En una primera etapa, los sensores permitirían caracterizar las condiciones del terreno; posteriormente, los modelos podrían recomendar las cepas o consorcios más compatibles; finalmente, el monitoreo del cultivo serviría para evaluar la respuesta y ajustar las aplicaciones futuras. De Souza et al. (2015) señalan que la eficacia de la inoculación depende de la interacción dinámica entre suelo, planta y microorganismo. Esta aproximación permitiría convertir dicha interacción en información útil para la toma de decisiones.

A pesar de su potencial, la incorporación de inteligencia artificial en el estudio y manejo de inoculantes microbianos todavía debe considerarse una perspectiva en desarrollo. La bibliografía analizada ofrece fundamentos sólidos sobre los factores que determinan la eficacia de estos organismos, pero proporciona evidencia limitada sobre aplicaciones agrícolas consolidadas de inteligencia artificial. Backer et al. (2018) identifican la necesidad de integrar información biológica, ambiental y tecnológica para mejorar la comercialización de los inoculantes. Por tanto, las afirmaciones sobre modelos predictivos deben presentarse como proyecciones de investigación y no como prácticas ya generalizadas.

En síntesis, la agricultura de precisión y la inteligencia artificial pueden favorecer una aplicación más contextualizada de los microorganismos promotores del crecimiento vegetal. Su principal aporte consistiría en integrar información sobre las cepas, el microbioma, el cultivo y el ambiente para reducir la variabilidad de las respuestas observadas en campo. Posada Castaño et al. (2021) muestran que dicha variabilidad constituye una característica persistente de la evidencia disponible. La consolidación de estas herramientas requerirá bases de datos estandarizadas, validación experimental, infraestructura tecnológica y estrategias que garanticen su accesibilidad en diferentes sistemas productivos.

## **APLICACIONES DE LOS MICROORGANISMOS PROMOTORES DEL CRECIMIENTO VEGETAL EN LA AGRICULTURA SOSTENIBLE**

El creciente interés por los microorganismos promotores del crecimiento vegetal (MPCV) ha favorecido su incorporación en diferentes sistemas agrícolas como una alternativa para mejorar la productividad, disminuir la dependencia de insumos químicos y fortalecer la sostenibilidad de los agroecosistemas. Sin embargo, la literatura La aplicación de microorganismos promotores del crecimiento vegetal se ha consolidado como una alternativa biológica orientada a mejorar la productividad y reducir parcialmente la dependencia de insumos agrícolas sintéticos. Su utilización puede favorecer la disponibilidad de nutrientes, estimular el desarrollo de las raíces, fortalecer la respuesta frente al estrés y limitar la incidencia de determinadas enfermedades. Vejan et al. (2016) destaca que las rizobacterias pueden actuar como biofertilizantes cuando incrementan la disponibilidad o aprovechamiento de nutrientes por parte de las plantas. No obstante, sus aplicaciones actuales superan esta función e incluyen procesos de bioestimulación, bioprotección y recuperación biológica del suelo.

El interés por estas tecnologías se relaciona con la necesidad de desarrollar sistemas productivos capaces de mantener los rendimientos sin incrementar los efectos negativos asociados con la fertilización y el control químico intensivos. Pardo-Díaz et al. (2021) señalan que las bacterias promotoras pueden complementar las prácticas de nutrición y manejo sanitario dentro de modelos agrícolas sostenibles. Sin embargo, estos organismos no deben presentarse como

sustitutos absolutos de los fertilizantes o productos fitosanitarios, pues su eficacia depende del cultivo, el ambiente y las prácticas de manejo aplicadas.

Las posibilidades de utilización comprenden el tratamiento de semillas, la aplicación directa al suelo, la inoculación de raíces y la incorporación mediante los sistemas de riego. Basu et al. (2021) explican que el método de suministro influye en la supervivencia del microorganismo y en sus posibilidades de entrar en contacto con la planta. El tratamiento de semillas facilita la colonización desde las primeras etapas del desarrollo, mientras que las aplicaciones al suelo o al sistema radical pueden utilizarse en cultivos ya establecidos. La selección del procedimiento debe considerar la formulación, el ciclo del cultivo y las condiciones ambientales.

La aplicación microbiana también puede mejorar la eficiencia con que los cultivos utilizan los fertilizantes incorporados. Los organismos fijadores de nitrógeno, solubilizadores de fósforo y productores de fitohormonas pueden ampliar el crecimiento radical y favorecer la absorción de recursos. Vujanovic et al. (2016) indican que estos mecanismos actúan de manera complementaria y pueden mejorar el estado nutricional de las plantas. Por consiguiente, los inoculantes pueden integrarse con programas de fertilización racional para reducir pérdidas y ajustar las dosis a las necesidades específicas del sistema productivo.

Otra aplicación relevante corresponde al fortalecimiento de la tolerancia frente a sequía, salinidad, temperaturas extremas y otras condiciones adversas. Liu et al. (2020) documentan que las rizobacterias pueden contribuir a mantener el crecimiento mediante la regulación hormonal, el desarrollo de las raíces y la mejora del estado hídrico. Estos beneficios adquieren importancia en regiones donde la variabilidad climática limita la estabilidad de los rendimientos. No obstante, la inoculación no elimina las causas del estrés y debe combinarse con prácticas de conservación del agua, manejo del suelo y selección de variedades adaptadas.

Los agentes microbianos también pueden participar en el manejo de enfermedades mediante la competencia por recursos, la producción de metabolitos y la activación de las defensas vegetales. Mhlomo et al. (2018) explican que estas acciones pueden reducir la capacidad de los fitopatógenos para establecerse y ocasionar daños. Su utilización resulta especialmente pertinente dentro del manejo integrado, donde se combinan medidas preventivas, prácticas culturales y métodos biológicos. La eficacia depende, sin embargo, de la capacidad de la cepa para colonizar la planta y mantener su actividad durante el periodo de riesgo.

Desde una perspectiva ecológica, la incorporación de microorganismos beneficiosos puede favorecer procesos relacionados con el reciclaje de nutrientes y la actividad biológica del suelo. De Souza et al. (2015) señalan que las bacterias introducidas interactúan con las comunidades residentes y con las propiedades físicas y químicas del ambiente edáfico. Esta interacción puede producir respuestas beneficiosas, neutras o variables según el contexto. Por ello, los inoculantes deben formar parte de estrategias que también conserven la materia orgánica, reduzcan la alteración excesiva del suelo y favorezcan la diversidad microbiana.

En conjunto, las aplicaciones agrícolas de estos microorganismos abarcan la nutrición, la bioestimulación, la protección, la tolerancia al estrés y el manejo biológico del suelo. Backer et al. (2018) señalan que el principal desafío consiste en trasladar estas capacidades hacia productos comerciales con respuestas consistentes. Su contribución a la sostenibilidad dependerá de una adecuada selección de cepas, formulaciones estables y recomendaciones ajustadas a cada cultivo y ambiente, evitando generalizar los resultados obtenidos bajo condiciones controladas.

### **Aplicaciones en cultivos extensivos**

Los cultivos extensivos constituyen uno de los principales ámbitos de aplicación de los microorganismos promotores debido a su importancia alimentaria y a las grandes superficies destinadas a su producción. Cereales como maíz, trigo y arroz requieren cantidades considerables de nutrientes y se encuentran expuestos a variaciones de humedad, temperatura y fertilidad del suelo. De Souza et al. (2015) señalan que las bacterias promotoras pueden favorecer el crecimiento de cereales y leguminosas mediante procesos nutricionales, hormonales y protectores. Su utilización ofrece posibilidades para mejorar la eficiencia del manejo agronómico en sistemas donde pequeñas variaciones del rendimiento producen efectos importantes a escala productiva.

En cereales, las bacterias asociativas de los géneros *Azospirillum* y *Azotobacter* han recibido una atención considerable por su capacidad para fijar nitrógeno, producir fitohormonas y modificar el sistema radical. La formación de raíces laterales y pelos absorbentes puede incrementar la exploración del suelo y mejorar el acceso a agua y nutrientes. Vejan et al. (2016) explican que estos efectos pueden ser tan importantes como la cantidad de nitrógeno incorporada por la actividad microbiana. Por ello, la respuesta de los cultivos debe evaluarse mediante variables de crecimiento, nutrición y rendimiento, y no exclusivamente a partir de la fijación biológica.

En el maíz, los inoculantes se han estudiado como complemento de la fertilización nitrogenada y fosfatada. La utilización de bacterias fijadoras o solubilizadoras puede favorecer el aprovechamiento de los nutrientes disponibles, aunque los resultados varían entre ambientes y genotipos. De Souza et al. (2015) destacan que el tipo de suelo, la humedad y la interacción con el microbioma nativo modifican la eficacia de las bacterias introducidas. En consecuencia, la respuesta observada en un sitio no debe extrapolarse automáticamente a otras regiones sin realizar evaluaciones locales.

El trigo también ha sido utilizado para evaluar bacterias capaces de estimular el crecimiento y mejorar la respuesta frente a condiciones de estrés. La producción de auxinas puede favorecer el desarrollo radical, mientras que la actividad ACC desaminasa ayuda a regular el etileno acumulado durante la sequía o la salinidad. Liu et al. (2020) señalan que la combinación de estos mecanismos puede mantener la actividad fisiológica y disminuir parcialmente las pérdidas de crecimiento. Sin embargo, la magnitud del beneficio depende de la etapa del cultivo en la que ocurre el estrés y de la permanencia de las cepas en la rizosfera.

En el arroz, la aplicación de microorganismos beneficiosos presenta posibilidades tanto en sistemas inundados como en condiciones de riego controlado. Las diferencias en oxigenación, disponibilidad de nutrientes y estructura de las comunidades microbianas influyen en el comportamiento de los inoculantes. Olanrewaju et al. (2017) explican que las capacidades funcionales de las bacterias se expresan de manera diferente según las condiciones ambientales. Por tanto, la selección debe considerar la adaptación de la cepa al régimen hídrico y a las características particulares del sistema de producción.

Las leguminosas representan el ejemplo más consolidado de aplicación microbiana debido a su asociación simbiótica con bacterias fijadoras de nitrógeno. Los inoculantes elaborados con cepas de *Rhizobium* y géneros relacionados favorecen la formación de nódulos y pueden reducir la necesidad de fertilización nitrogenada cuando existe compatibilidad con la especie cultivada. Vejan et al. (2016) destaca que estas asociaciones constituyen uno de los fundamentos del uso de biofertilizantes. No obstante, la acidez del suelo, la disponibilidad de nutrientes y la presencia de poblaciones nativas pueden modificar la nodulación y la eficiencia de la fijación.

La coinoculación de leguminosas con bacterias simbióticas y otros microorganismos promotores constituye una estrategia orientada a combinar funciones complementarias. Una cepa puede fijar nitrógeno, mientras otra moviliza fósforo o produce reguladores que favorecen el desarrollo de las raíces y los nódulos. de Souza et al. (2015) indican que las interacciones entre diferentes capacidades microbianas pueden mejorar la respuesta de las plantas. Sin embargo, la compatibilidad entre los organismos debe verificarse para evitar competencia o inhibición dentro de la formulación y después de la aplicación.

El tratamiento de semillas es particularmente apropiado para los cultivos extensivos porque permite aplicar cantidades relativamente pequeñas de producto sobre grandes superficies. Basu et al. (2021) explican que este método coloca las células cerca de las raíces emergentes y favorece una colonización temprana. Su eficacia depende de la adherencia, la supervivencia durante el almacenamiento y la compatibilidad con fungicidas o insecticidas utilizados en el recubrimiento. Estos factores deben evaluarse para evitar que otros componentes del tratamiento reduzcan la viabilidad del inoculante.

La aplicación de microorganismos también puede contribuir a mejorar la estabilidad productiva bajo condiciones ambientales variables. Las cepas capaces de mantener el crecimiento radical, regular el etileno y favorecer la absorción de agua pueden reducir parcialmente los efectos del estrés. Liu et al. (2020) destacan que estas funciones resultan

relevantes para los cultivos expuestos a sequía y salinidad. No obstante, los organismos beneficiosos deben integrarse con prácticas como rotación, cobertura del suelo, manejo eficiente del agua y utilización de variedades adaptadas.

La adopción en cultivos extensivos depende finalmente de que el beneficio obtenido justifique los costos de adquisición y aplicación. Un incremento pequeño pero consistente puede resultar económicamente relevante en grandes superficies, mientras que respuestas variables disminuyen la confianza de los productores. Backer et al. (2018) señalan que la comercialización de los inoculantes requiere demostrar eficacia bajo condiciones reales y desarrollar formulaciones estables. Por tanto, los ensayos deben realizarse en diferentes localidades y ciclos, incluyendo análisis productivos y económicos que permitan establecer recomendaciones confiables.

### **Aplicaciones en cultivos hortícolas y frutales**

Los cultivos hortícolas y frutales constituyen un ámbito importante para la aplicación de microorganismos promotores del crecimiento vegetal debido a su elevado valor económico y a las exigencias de calidad que caracterizan su comercialización. En estos sistemas, los beneficios de la inoculación no se limitan necesariamente al aumento del rendimiento, sino que pueden incluir mejoras en el establecimiento de las plantas, el desarrollo de las raíces, la absorción de nutrientes y la tolerancia frente a condiciones adversas. Vejan et al. (2016) explican que las rizobacterias pueden intervenir simultáneamente en procesos nutricionales, hormonales y defensivos, lo que amplía sus posibilidades de utilización en especies con ciclos y requerimientos productivos diversos.

La producción de plántulas en viveros ofrece condiciones favorables para incorporar bacterias beneficiosas desde las primeras etapas del cultivo. La inoculación del sustrato o del sistema radical puede facilitar el establecimiento de poblaciones microbianas antes del trasplante y favorecer la formación de raíces más ramificadas. Olanrewaju et al. (2017) señalan que la producción microbiana de auxinas modifica la arquitectura radical y puede incrementar la formación de raíces laterales y pelos absorbentes. Estas respuestas pueden mejorar la supervivencia de las plántulas después del trasplante y reducir el tiempo necesario para recuperar el crecimiento.

En hortalizas de fruto, como tomate, pimiento y berenjena, el desarrollo de un sistema radical activo resulta esencial para mantener la absorción de agua y nutrientes durante las etapas de floración y fructificación. Las bacterias productoras de fitohormonas o capaces de movilizar elementos minerales pueden contribuir al crecimiento y al equilibrio nutricional de las plantas. Olanrewaju et al. (2017) explica que los mecanismos de promoción actúan sobre diferentes procesos fisiológicos y que su efecto depende de la cepa, el hospedante y las condiciones del ambiente. Por esta razón, los resultados obtenidos en una especie hortícola no deben generalizarse automáticamente a otras.

La movilización de fósforo adquiere especial importancia durante el establecimiento de los cultivos, debido a la participación de este nutriente en el desarrollo de las raíces y en el metabolismo energético. Los microorganismos solubilizadores pueden liberar parcialmente el fósforo retenido en formas poco disponibles y complementar los programas de fertilización. Olanrewaju et al. (2017) señalan que esta función suele combinarse con la producción de fitohormonas y sideróforos, generando una respuesta multifuncional. Sin embargo, el beneficio depende del pH, la composición del suelo y la capacidad de la cepa para permanecer activa cerca de las raíces.

Los inoculantes microbianos también pueden utilizarse para mejorar la eficiencia en el uso del agua. En los sistemas hortícolas, la disponibilidad hídrica influye rápidamente sobre el crecimiento, la calidad y la productividad, especialmente en cultivos con raíces relativamente superficiales. Liu et al. (2020) documentan que determinadas rizobacterias ayudan a mantener el crecimiento bajo sequía mediante la regulación hormonal, el desarrollo radical y la mejora del estado hídrico. Estas funciones pueden complementar el riego eficiente, aunque no reemplazan la necesidad de proporcionar agua suficiente durante las etapas críticas.

La salinidad representa otra limitación frecuente en la horticultura, principalmente en ambientes protegidos y zonas donde el riego favorece la acumulación de sales. Las bacterias con actividad ACC desaminasa pueden moderar la concentración de etileno asociada con el estrés y favorecer la continuidad del crecimiento. Olanrewaju et al. (2017) destaca que este mecanismo suele actuar conjuntamente con la producción de auxinas y la movilización de nutrientes.

La selección de las cepas debe considerar su propia tolerancia a la salinidad, porque un microorganismo sensible puede perder viabilidad antes de producir un efecto beneficioso sobre el cultivo.

En los sistemas hortícolas intensivos, los agentes microbianos también pueden contribuir al manejo de enfermedades radicales y vasculares. La competencia por nutrientes y espacio, la producción de sideróforos, la síntesis de antibióticos y la inducción de resistencia sistémica pueden disminuir la capacidad de determinados patógenos para establecerse. Mhlongo et al. (2018) explican que estos mecanismos indirectos actúan de manera complementaria y pueden reducir la severidad de algunas enfermedades. No obstante, su utilización debe formar parte de programas integrados que incluyan higiene, manejo de sustratos, rotación y monitoreo fitosanitario.

Los microorganismos endófitos presentan un interés particular en las especies hortícolas y frutales porque pueden colonizar tejidos internos y mantener una interacción estrecha con el hospedante. Esta localización puede ofrecer una mayor protección frente a las fluctuaciones ambientales y a la competencia presente en el suelo. Compant et al. (2019) señalan que las bacterias endófitas pueden desplazarse desde las raíces hacia otros órganos y participar en la regulación del crecimiento y la defensa vegetal. Sin embargo, su comportamiento debe evaluarse cuidadosamente para comprobar la estabilidad de la colonización y su seguridad.

En los cultivos frutales, la inoculación puede realizarse durante la propagación, el establecimiento en campo o el mantenimiento de las plantas adultas. La aplicación en vivero permite introducir microorganismos antes de que las raíces entren en contacto con comunidades complejas del suelo, mientras que las aplicaciones posteriores buscan reforzar poblaciones beneficiosas alrededor del sistema radical. De Souza et al. (2015) explican que el éxito de la inoculación depende de la interacción con el microbioma residente y de las propiedades del suelo. En especies perennes, esta relación debe evaluarse durante periodos más prolongados que los utilizados habitualmente en cultivos de ciclo corto.

La persistencia constituye precisamente uno de los principales desafíos en los frutales. Un efecto favorable observado durante los primeros meses no garantiza que el microorganismo permanezca activo durante varios ciclos de crecimiento y producción. Backer et al. (2018) señalan que la estabilidad de la colonización es un factor fundamental para trasladar los resultados experimentales hacia aplicaciones comerciales. Por ello, las investigaciones deben incorporar evaluaciones temporales que permitan determinar la permanencia de las cepas y la necesidad de realizar aplicaciones repetidas.

La calidad comercial de las frutas y hortalizas también puede modificarse como consecuencia de un mejor estado nutricional y fisiológico de la planta. Una absorción equilibrada de nutrientes y una menor intensidad del estrés pueden favorecer variables como tamaño, uniformidad, firmeza o composición química. Sin embargo, las referencias utilizadas en esta revisión se concentran principalmente en el crecimiento, los mecanismos fisiológicos y la productividad general de los cultivos. En consecuencia, cualquier afirmación específica sobre mejoras nutricionales o poscosecha debe respaldarse con estudios experimentales dirigidos a esas variables, tal como exige la interpretación contextual propuesta por Backer et al. (2018).

Las formas de aplicación deben adaptarse a las características de cada sistema hortícola o frutal. En viveros pueden utilizarse tratamientos de semillas, inmersión de raíces o inoculación del sustrato; en campo abierto y ambientes protegidos, las formulaciones líquidas pueden suministrarse mediante el riego. Basu et al. (2021) destacan que el método de aplicación influye en la supervivencia y en las posibilidades de colonización. También debe verificarse la compatibilidad con fertilizantes, productos fitosanitarios y condiciones químicas del agua para evitar la pérdida de viabilidad.

La incorporación de microorganismos beneficiosos puede ser especialmente pertinente en sistemas de producción que buscan reducir gradualmente el uso de insumos sintéticos. Pardo-Díaz et al. (2021) destacan su potencial para complementar la nutrición y el manejo sanitario dentro de la agricultura sostenible. No obstante, la reducción de fertilizantes o productos fitosanitarios debe sustentarse en resultados agronómicos y no efectuarse automáticamente después de la inoculación. La respuesta debe evaluarse mediante indicadores de crecimiento, nutrición, sanidad, rendimiento, calidad y rentabilidad.

En síntesis, los cultivos hortícolas y frutales ofrecen múltiples oportunidades para utilizar microorganismos promotores durante la propagación, el trasplante, el crecimiento y la producción. Olanrewaju et al. (2017) evidencian que sus mecanismos pueden influir simultáneamente en la nutrición, la regulación fisiológica y la protección vegetal. Sin embargo, la diversidad de especies, ambientes y prácticas de manejo exige desarrollar recomendaciones específicas. La validación en viveros, invernaderos y campos comerciales será indispensable para establecer dosis, momentos de aplicación y formulaciones capaces de producir respuestas consistentes.

### **Agricultura regenerativa y recuperación de suelos degradados**

La agricultura regenerativa se orienta a recuperar la funcionalidad ecológica de los sistemas productivos mediante prácticas que favorecen la biodiversidad, el reciclaje de nutrientes, la acumulación de materia orgánica y la conservación de la estructura del suelo. Dentro de este enfoque, los microorganismos promotores del crecimiento vegetal adquieren relevancia porque participan en procesos relacionados con la nutrición de las plantas, la transformación de compuestos orgánicos y la estabilización de las comunidades de la rizosfera. Pardo-Díaz et al. (2021) destacan que las bacterias beneficiosas pueden complementar las prácticas de manejo sostenible y contribuir a reducir la dependencia de insumos químicos, especialmente cuando se integran con estrategias adaptadas a las condiciones locales.

La degradación del suelo comprende procesos físicos, químicos y biológicos que disminuyen su capacidad para sostener la producción vegetal. La pérdida de materia orgánica, la compactación, la erosión, la salinización y el uso intensivo de insumos pueden alterar la estructura del suelo y reducir la diversidad de sus comunidades microbianas. De Souza et al. (2015) explican que las propiedades edáficas influyen directamente en la supervivencia y actividad de las bacterias asociadas con las plantas. Por ello, la recuperación no debe limitarse a corregir las deficiencias nutricionales, sino que debe restablecer las condiciones necesarias para el funcionamiento de los procesos biológicos. Los microorganismos fijadores de nitrógeno pueden contribuir a la recuperación de la fertilidad mediante la incorporación biológica de este elemento. Esta función resulta particularmente importante en suelos con baja disponibilidad de nutrientes y escasa capacidad para sostener el crecimiento de la vegetación. Vejan et al. (2016) señala que las rizobacterias utilizadas como biofertilizantes pueden mejorar el estado nutricional de las plantas y complementar las fuentes convencionales de fertilización. Sin embargo, su eficacia depende de la presencia de materia orgánica, humedad adecuada y condiciones que permitan el establecimiento de las poblaciones inoculadas.

La movilización de fósforo y otros elementos representa otro proceso relevante para la restauración de la fertilidad. Determinadas bacterias producen ácidos orgánicos y enzimas que liberan nutrientes retenidos en formas poco disponibles, aumentando sus posibilidades de aprovechamiento por las plantas. Vejan et al. (2016) incluyen esta función entre los principales mecanismos de las rizobacterias promotoras del crecimiento. En los suelos degradados, su contribución puede favorecer el establecimiento inicial de los cultivos o de la vegetación utilizada para la recuperación, aunque no sustituye la necesidad de corregir limitaciones físicas o químicas severas.

El desarrollo del sistema radical también puede influir favorablemente en la recuperación del suelo. Las raíces contribuyen a formar poros, incorporar residuos orgánicos y estabilizar partículas mediante su crecimiento y descomposición. Olanrewaju et al. (2017) explican que las auxinas producidas por determinadas bacterias pueden estimular la formación de raíces laterales y pelos radicales. Esta respuesta incrementa la exploración del suelo y puede acelerar el establecimiento de coberturas vegetales, especialmente cuando la inoculación se combina con especies adaptadas a las condiciones del terreno degradado.

La utilización de microorganismos puede integrarse con cultivos de cobertura, rotaciones y sistemas con reducida perturbación mecánica. Estas prácticas aportan residuos, mantienen raíces vivas durante periodos más prolongados y proporcionan recursos para las poblaciones microbianas. Backer et al. (2018) señalan que la funcionalidad de los organismos beneficiosos depende de sus interacciones con la planta y el ambiente. Por tanto, la inoculación tendrá pocas posibilidades de mantener sus efectos cuando el manejo no proporciona hábitats, fuentes de carbono y condiciones físicas apropiadas para su supervivencia.

La formación y estabilidad de los agregados constituye otro componente importante de la calidad del suelo. Algunas bacterias producen exopolisacáridos y otras sustancias que favorecen la adhesión de partículas y la creación de microambientes alrededor de las raíces. Olanrewaju et al. (2017) incluyen la formación de biopelículas entre las características que facilitan la colonización y permanencia de las bacterias promotoras. Estas estructuras pueden contribuir indirectamente a la retención de humedad y a la protección de las células frente a fluctuaciones ambientales, aunque su impacto debe evaluarse según el tipo de suelo y el manejo aplicado.

En los suelos afectados por salinidad, las bacterias tolerantes pueden favorecer el establecimiento vegetal mediante mecanismos hormonales, nutricionales y osmóticos. La actividad ACC desaminasa puede moderar el etileno asociado con el estrés, mientras que la producción de fitohormonas contribuye a mantener el desarrollo de las raíces. Liu et al. (2020) muestran que las rizobacterias pueden mejorar el crecimiento bajo condiciones salinas, aunque su eficacia varía según la intensidad del estrés y la compatibilidad con la planta. Estos microorganismos deben integrarse con prácticas de drenaje, manejo del riego y control de la acumulación de sales.

La recuperación de suelos contaminados representa otra posible aplicación, debido a que algunas bacterias pueden favorecer el crecimiento vegetal en presencia de sustancias tóxicas. Un sistema radical más desarrollado y un mejor estado fisiológico permiten que las plantas se establezcan en ambientes donde su crecimiento se encuentra limitado. Olanrewaju et al. (2017) explica que la regulación del etileno mediante ACC desaminasa puede contribuir a reducir los efectos de diferentes tipos de estrés. No obstante, cualquier aplicación en suelos contaminados requiere estudios específicos sobre la seguridad de los microorganismos y el destino de los contaminantes.

El aprovechamiento de cepas nativas puede ser especialmente relevante en procesos de recuperación, pues estos organismos han estado expuestos a las condiciones locales y podrían presentar una mayor capacidad de adaptación. Pardo-Díaz et al. (2021) resaltan el potencial de las bacterias autóctonas para el desarrollo de inoculantes destinados a sistemas agrícolas sostenibles. Sin embargo, su aislamiento debe acompañarse de una caracterización funcional, genética y de seguridad que permita seleccionar cepas beneficiosas sin introducir riesgos para las plantas, el ambiente o la salud.

Desde una perspectiva de microbioma, la recuperación del suelo no consiste únicamente en agregar una cepa beneficiosa, sino en restablecer comunidades funcionales capaces de mantener los ciclos de nutrientes y las relaciones con las raíces. Backer et al. (2018) explican que los microorganismos introducidos interactúan con poblaciones previamente establecidas y que su comportamiento depende de esa red ecológica. Por consiguiente, el monitoreo debe evaluar no solo la permanencia del inoculante, sino también los cambios producidos en la diversidad y funcionalidad de la comunidad microbiana.

La evaluación de estas estrategias debe realizarse mediante indicadores físicos, químicos, biológicos y productivos. La materia orgánica, la estabilidad de los agregados, la infiltración, la disponibilidad de nutrientes, la actividad microbiana y el crecimiento vegetal ofrecen una visión más completa que el análisis aislado del rendimiento. De Souza et al. (2015) muestran que el funcionamiento de las bacterias promotoras está condicionado por varias propiedades del suelo. Por ello, el éxito de una intervención regenerativa debe medirse como una mejora sostenida del sistema y no únicamente como una respuesta temporal del cultivo.

Los efectos de la recuperación también requieren evaluaciones de mediano y largo plazo. Un incremento inicial del crecimiento después de la inoculación no demuestra que la calidad del suelo haya sido restablecida ni que la respuesta pueda mantenerse durante varios ciclos. Posada Castaño et al. (2021) identifican una importante heterogeneidad en las condiciones y procedimientos utilizados para estudiar las PGPR, lo que limita la comparación de resultados. El seguimiento prolongado permitiría determinar si los cambios biológicos persisten y si disminuye realmente la necesidad de insumos externos.

En síntesis, los microorganismos promotores pueden contribuir a la agricultura regenerativa mediante la movilización de nutrientes, la estimulación del sistema radical, la tolerancia al estrés y el fortalecimiento de la actividad biológica. Pardo-Díaz et al. (2021) sitúan estas funciones dentro de estrategias orientadas a una producción agrícola más sostenible. Sin embargo, la inoculación no puede recuperar por sí sola un suelo degradado; su efectividad dependerá

de la integración con cobertura vegetal, incorporación de materia orgánica, diversificación de cultivos, manejo eficiente del agua y reducción de las prácticas que originaron la degradación.

### **Contribución a la adaptación de la agricultura frente al cambio climático**

El cambio climático incrementa la exposición de los sistemas agrícolas a sequías, salinidad, temperaturas extremas y modificaciones en la disponibilidad de nutrientes y agua. Estas condiciones afectan el crecimiento vegetal, alteran los ciclos productivos y aumentan la inestabilidad de los rendimientos. Liu et al. (2020) señalan que los microorganismos promotores pueden contribuir a mejorar la respuesta de los cultivos frente a diferentes tipos de estrés mediante mecanismos nutricionales, hormonales y fisiológicos. Por esta razón, su utilización se estudia como un componente complementario de las estrategias destinadas a fortalecer la adaptación agrícola.

La sequía constituye uno de los factores con mayor incidencia sobre la productividad, debido a que reduce la expansión celular, la actividad fotosintética y la absorción de nutrientes. Determinadas bacterias favorecen el desarrollo de las raíces, permitiendo que las plantas exploren un volumen mayor de suelo y accedan a reservas de humedad. Olanrewaju et al. (2017) explican que las auxinas producidas por microorganismos pueden modificar la arquitectura radical y estimular la aparición de raíces laterales. Esta respuesta puede mejorar el aprovechamiento del agua, aunque su efectividad depende de la intensidad y duración del déficit hídrico.

La actividad ACC desaminasa también desempeña una función importante durante la escasez de agua. El estrés puede incrementar la producción de etileno hasta concentraciones que inhiben el crecimiento de las raíces y aceleran la senescencia. Olanrewaju et al. (2017) señala que las bacterias productoras de esta enzima degradan el precursor del etileno y contribuyen a moderar su acumulación. Al mantener el crecimiento radical durante periodos críticos, la planta conserva mayores posibilidades de absorber agua y nutrientes, especialmente cuando el mecanismo se combina con la producción de fitohormonas.

Algunas bacterias producen exopolisacáridos y forman biopelículas alrededor de las raíces, creando microambientes que pueden favorecer la retención de humedad y la estabilidad de las poblaciones microbianas. Olanrewaju et al. (2017) indican que la formación de biopelículas facilita la colonización y protege a las células frente a condiciones ambientales desfavorables. Estas estructuras también pueden influir sobre la agregación de las partículas del suelo. No obstante, su contribución a la tolerancia del cultivo debe comprobarse bajo condiciones de campo, donde la disponibilidad de agua y la estructura edáfica presentan una elevada variabilidad.

La salinidad constituye otro problema que puede intensificarse como consecuencia de la evaporación, el riego inadecuado y la intrusión de agua salina en zonas costeras. Las concentraciones elevadas de sales dificultan la absorción de agua, generan desequilibrios iónicos y alteran el metabolismo vegetal. Liu et al. (2020) documentan que las rizobacterias pueden mejorar el crecimiento de las plantas sometidas a salinidad mediante la regulación hormonal, el desarrollo de las raíces y una mayor eficiencia en la absorción de nutrientes. Sin embargo, la cepa utilizada también debe poseer tolerancia suficiente para sobrevivir y mantener su actividad en estas condiciones.

Las variaciones extremas de temperatura afectan tanto a las plantas como a las comunidades microbianas asociadas con sus raíces. El calor puede alterar las membranas, incrementar el estrés oxidativo y acelerar la pérdida de agua, mientras que las temperaturas bajas reducen la actividad metabólica y dificultan el establecimiento de los cultivos. Backer et al. (2018) explican que la eficacia de los inoculantes depende de la capacidad de las cepas para permanecer funcionales bajo las condiciones ambientales donde serán aplicadas. Por consiguiente, la selección de organismos destinados a escenarios climáticos futuros debe considerar su tolerancia térmica y no únicamente sus mecanismos de promoción.

El estrés climático también puede modificar la disponibilidad de nutrientes mediante cambios en la humedad, el pH, la actividad biológica y la descomposición de la materia orgánica. Los microorganismos fijadores de nitrógeno y solubilizadores de fósforo pueden contribuir a mantener parcialmente el suministro de elementos esenciales. Vejan et al. (2016) señalan que estas funciones mejoran la nutrición y pueden complementar otros mecanismos de adaptación.

Sin embargo, la actividad microbiana disminuye cuando las condiciones del suelo superan los límites fisiológicos de las cepas, por lo que es necesario seleccionar organismos adaptados a los ambientes de aplicación.

Los agentes microbianos también pueden fortalecer los sistemas antioxidantes y reducir los daños ocasionados por las especies reactivas de oxígeno generadas durante el estrés. Liu et al. (2020) muestran que la inoculación puede modificar diferentes respuestas fisiológicas y contribuir al mantenimiento de la actividad fotosintética. Estas respuestas no dependen exclusivamente de un compuesto producido por la bacteria, sino de la interacción entre la regulación hormonal, la nutrición y la capacidad defensiva de la planta. Por ello, su evaluación requiere integrar indicadores bioquímicos, fisiológicos y productivos.

La inducción de resistencia sistémica adquiere relevancia porque el cambio climático también puede modificar la distribución y severidad de determinadas enfermedades. Las plantas debilitadas por sequía, salinidad o temperaturas extremas pueden presentar una mayor susceptibilidad frente a algunos patógenos. Mhlongo et al. (2018) explican que las bacterias beneficiosas pueden estimular mecanismos defensivos y complementar su acción con procesos de antagonismo directo. Esta protección debe incorporarse a programas de manejo integrado, debido a que la inoculación no elimina la necesidad de monitorear los problemas fitosanitarios emergentes.

Los microorganismos nativos de regiones sometidas naturalmente a condiciones extremas representan una fuente potencial de cepas adaptadas. Las poblaciones aisladas de ambientes secos, salinos, cálidos o fríos pueden haber desarrollado características que favorezcan su supervivencia y funcionamiento bajo estrés. Pardo-Díaz et al. (2021) destacan la importancia de caracterizar microorganismos locales para desarrollar soluciones ajustadas a los sistemas agrícolas regionales. Aun así, la adaptación ambiental debe acompañarse de pruebas que demuestren su capacidad para beneficiar a los cultivos y su seguridad como componente de un inoculante.

La utilización de consorcios puede ampliar la diversidad de respuestas disponibles frente a los cambios ambientales. Una comunidad puede combinar cepas que regulan el etileno, producen auxinas, movilizan nutrientes y protegen frente a enfermedades. Backer et al. (2018) sostienen que los consorcios funcionales ofrecen posibilidades para mejorar la estabilidad de los productos microbianos. Sin embargo, su diseño debe verificar la compatibilidad entre los organismos y evaluar si las funciones se mantienen cuando la comunidad enfrenta condiciones de estrés.

La contribución microbiana a la adaptación climática debe integrarse con otras estrategias agronómicas. La conservación del suelo, el manejo eficiente del agua, la diversificación productiva y la selección de variedades tolerantes proporcionan condiciones que favorecen tanto a las plantas como a las comunidades beneficiosas. De Souza et al. (2015) explican que la actividad de las bacterias introducidas se encuentra condicionada por el ambiente edáfico y las prácticas de manejo. En consecuencia, la eficacia del inoculante será limitada cuando se aplica en sistemas altamente degradados sin corregir las causas que restringen su funcionamiento.

La evaluación de estos productos debe realizarse bajo escenarios climáticos realistas y durante varios ciclos productivos. Los ensayos de corta duración en ambientes controlados son útiles para identificar mecanismos, pero no reproducen completamente las fluctuaciones que ocurren en campo. Basu et al. (2021) advierten que numerosos microorganismos con resultados prometedores en laboratorio presentan respuestas variables después de su aplicación comercial. Los experimentos multilocales permiten establecer qué cepas mantienen su funcionalidad y bajo cuáles condiciones proporcionan beneficios consistentes.

En conjunto, la evidencia posiciona a los microorganismos promotores como herramientas complementarias para fortalecer la resiliencia de los cultivos frente al cambio climático. Liu et al. (2020) demuestran su potencial para mejorar el desempeño vegetal bajo diferentes condiciones de estrés, mientras que Backer et al. (2018) advierten que su eficacia depende de la interacción entre la cepa, el cultivo y el ambiente. Por tanto, su implementación debe basarse en inoculantes adaptados, validación en campo y estrategias integradas que combinen innovación microbiológica con prácticas sostenibles de manejo del suelo, el agua y la biodiversidad. El cambio climático incrementa la exposición de los sistemas agrícolas a sequías, salinidad, temperaturas extremas y modificaciones en la disponibilidad de nutrientes y agua. Estas condiciones afectan el crecimiento vegetal, alteran los ciclos productivos y aumentan la inestabilidad de los rendimientos. Liu et al. (2020) señalan que los microorganismos promotores pueden contribuir a mejorar la

respuesta de los cultivos frente a diferentes tipos de estrés mediante mecanismos nutricionales, hormonales y fisiológicos. Por esta razón, su utilización se estudia como un componente complementario de las estrategias destinadas a fortalecer la adaptación agrícola.

La sequía constituye uno de los factores con mayor incidencia sobre la productividad, debido a que reduce la expansión celular, la actividad fotosintética y la absorción de nutrientes. Determinadas bacterias favorecen el desarrollo de las raíces, permitiendo que las plantas exploren un volumen mayor de suelo y accedan a reservas de humedad. Olanrewaju et al. (2017) explican que las auxinas producidas por microorganismos pueden modificar la arquitectura radical y estimular la aparición de raíces laterales. Esta respuesta puede mejorar el aprovechamiento del agua, aunque su efectividad depende de la intensidad y duración del déficit hídrico.

La actividad ACC desaminasa también desempeña una función importante durante la escasez de agua. El estrés puede incrementar la producción de etileno hasta concentraciones que inhiben el crecimiento de las raíces y aceleran la senescencia. Olanrewaju et al. (2017) señala que las bacterias productoras de esta enzima degradan el precursor del etileno y contribuyen a moderar su acumulación. Al mantener el crecimiento radical durante periodos críticos, la planta conserva mayores posibilidades de absorber agua y nutrientes, especialmente cuando el mecanismo se combina con la producción de fitohormonas.

Algunas bacterias producen exopolisacáridos y forman biopelículas alrededor de las raíces, creando microambientes que pueden favorecer la retención de humedad y la estabilidad de las poblaciones microbianas. Olanrewaju et al. (2017) indican que la formación de biopelículas facilita la colonización y protege a las células frente a condiciones ambientales desfavorables. Estas estructuras también pueden influir sobre la agregación de las partículas del suelo. No obstante, su contribución a la tolerancia del cultivo debe comprobarse bajo condiciones de campo, donde la disponibilidad de agua y la estructura edáfica presentan una elevada variabilidad.

La salinidad constituye otro problema que puede intensificarse como consecuencia de la evaporación, el riego inadecuado y la intrusión de agua salina en zonas costeras. Las concentraciones elevadas de sales dificultan la absorción de agua, generan desequilibrios iónicos y alteran el metabolismo vegetal. Liu et al. (2020) documentan que las rizobacterias pueden mejorar el crecimiento de las plantas sometidas a salinidad mediante la regulación hormonal, el desarrollo de las raíces y una mayor eficiencia en la absorción de nutrientes. Sin embargo, la cepa utilizada también debe poseer tolerancia suficiente para sobrevivir y mantener su actividad en estas condiciones.

Las variaciones extremas de temperatura afectan tanto a las plantas como a las comunidades microbianas asociadas con sus raíces. El calor puede alterar las membranas, incrementar el estrés oxidativo y acelerar la pérdida de agua, mientras que las temperaturas bajas reducen la actividad metabólica y dificultan el establecimiento de los cultivos. Backer et al. (2018) explican que la eficacia de los inoculantes depende de la capacidad de las cepas para permanecer funcionales bajo las condiciones ambientales donde serán aplicadas. Por consiguiente, la selección de organismos destinados a escenarios climáticos futuros debe considerar su tolerancia térmica y no únicamente sus mecanismos de promoción.

El estrés climático también puede modificar la disponibilidad de nutrientes mediante cambios en la humedad, el pH, la actividad biológica y la descomposición de la materia orgánica. Los microorganismos fijadores de nitrógeno y solubilizadores de fósforo pueden contribuir a mantener parcialmente el suministro de elementos esenciales. Vejan et al. (2016) señalan que estas funciones mejoran la nutrición y pueden complementar otros mecanismos de adaptación. Sin embargo, la actividad microbiana disminuye cuando las condiciones del suelo superan los límites fisiológicos de las cepas, por lo que es necesario seleccionar organismos adaptados a los ambientes de aplicación.

Los agentes microbianos también pueden fortalecer los sistemas antioxidantes y reducir los daños ocasionados por las especies reactivas de oxígeno generadas durante el estrés. Liu et al. (2020) muestran que la inoculación puede modificar diferentes respuestas fisiológicas y contribuir al mantenimiento de la actividad fotosintética. Estas respuestas no dependen exclusivamente de un compuesto producido por la bacteria, sino de la interacción entre la regulación hormonal, la nutrición y la capacidad defensiva de la planta. Por ello, su evaluación requiere integrar indicadores bioquímicos, fisiológicos y productivos.

La inducción de resistencia sistémica adquiere relevancia porque el cambio climático también puede modificar la distribución y severidad de determinadas enfermedades. Las plantas debilitadas por sequía, salinidad o temperaturas extremas pueden presentar una mayor susceptibilidad frente a algunos patógenos. Mhlongo et al. (2018) explican que las bacterias beneficiosas pueden estimular mecanismos defensivos y complementar su acción con procesos de antagonismo directo. Esta protección debe incorporarse a programas de manejo integrado, debido a que la inoculación no elimina la necesidad de monitorear los problemas fitosanitarios emergentes.

Los microorganismos nativos de regiones sometidas naturalmente a condiciones extremas representan una fuente potencial de cepas adaptadas. Las poblaciones aisladas de ambientes secos, salinos, cálidos o fríos pueden haber desarrollado características que favorezcan su supervivencia y funcionamiento bajo estrés. Pardo-Díaz et al. (2021) destacan la importancia de caracterizar microorganismos locales para desarrollar soluciones ajustadas a los sistemas agrícolas regionales. Aun así, la adaptación ambiental debe acompañarse de pruebas que demuestren su capacidad para beneficiar a los cultivos y su seguridad como componente de un inoculante.

La utilización de consorcios puede ampliar la diversidad de respuestas disponibles frente a los cambios ambientales. Una comunidad puede combinar cepas que regulan el etileno, producen auxinas, movilizan nutrientes y protegen frente a enfermedades. Backer et al. (2018) sostienen que los consorcios funcionales ofrecen posibilidades para mejorar la estabilidad de los productos microbianos. Sin embargo, su diseño debe verificar la compatibilidad entre los organismos y evaluar si las funciones se mantienen cuando la comunidad enfrenta condiciones de estrés.

La contribución microbiana a la adaptación climática debe integrarse con otras estrategias agronómicas. La conservación del suelo, el manejo eficiente del agua, la diversificación productiva y la selección de variedades tolerantes proporcionan condiciones que favorecen tanto a las plantas como a las comunidades beneficiosas. De Souza et al. (2015) explican que la actividad de las bacterias introducidas se encuentra condicionada por el ambiente edáfico y las prácticas de manejo. En consecuencia, la eficacia del inoculante será limitada cuando se aplica en sistemas altamente degradados sin corregir las causas que restringen su funcionamiento.

La evaluación de estos productos debe realizarse bajo escenarios climáticos realistas y durante varios ciclos productivos. Los ensayos de corta duración en ambientes controlados son útiles para identificar mecanismos, pero no reproducen completamente las fluctuaciones que ocurren en campo. Basu et al. (2021) advierten que numerosos microorganismos con resultados prometedores en laboratorio presentan respuestas variables después de su aplicación comercial. Los experimentos multilocales permiten establecer qué cepas mantienen su funcionalidad y bajo cuáles condiciones proporcionan beneficios consistentes.

En conjunto, la evidencia posiciona a los microorganismos promotores como herramientas complementarias para fortalecer la resiliencia de los cultivos frente al cambio climático. Liu et al. (2020) demuestran su potencial para mejorar el desempeño vegetal bajo diferentes condiciones de estrés, mientras que Backer et al. (2018) advierten que su eficacia depende de la interacción entre la cepa, el cultivo y el ambiente. Por tanto, su implementación debe basarse en inoculantes adaptados, validación en campo y estrategias integradas que combinen innovación microbiológica con prácticas sostenibles de manejo del suelo, el agua y la biodiversidad.

## **LIMITACIONES Y DESAFÍOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LOS MICROORGANISMOS PROMOTORES DEL CRECIMIENTO VEGETAL**

A pesar de los avances científicos alcanzados, la aplicación generalizada de microorganismos promotores del crecimiento vegetal todavía enfrenta limitaciones biológicas, ecológicas, tecnológicas y productivas. Numerosas cepas producen resultados favorables en laboratorios e invernaderos, pero no mantienen la misma eficacia después de ser introducidas en ambientes agrícolas. Basu et al. (2021) señalan que esta diferencia constituye uno de los principales obstáculos para transformar microorganismos prometedores en inoculantes comerciales confiables. El problema no depende exclusivamente de las capacidades de la cepa, sino de su supervivencia, formulación, método de aplicación e interacción con las condiciones del sistema productivo.

La variabilidad del suelo representa una de las principales causas de inconsistencia. El pH, la textura, la humedad, la temperatura, la salinidad, la materia orgánica y la disponibilidad de nutrientes influyen en la supervivencia y actividad de los organismos introducidos. De Souza et al. (2015) explican que estas propiedades pueden modificar la colonización de las raíces y la expresión de los mecanismos beneficiosos. Por esta razón, una cepa seleccionada en un ambiente determinado puede presentar respuestas diferentes cuando se utiliza en otra región o sistema de producción.

La planta hospedante también condiciona el resultado de la inoculación. Las especies y variedades difieren en la composición de sus exudados, en su arquitectura radical y en su capacidad para establecer asociaciones con determinadas poblaciones. De Souza et al. (2015) muestran que la promoción del crecimiento en cereales y leguminosas depende de la compatibilidad entre las capacidades del microorganismo y las características del cultivo. En consecuencia, no resulta adecuado asumir que un inoculante tendrá una eficacia equivalente en todas las especies o genotipos vegetales.

La competencia con el microbioma nativo constituye otro desafío decisivo. Las comunidades residentes se encuentran adaptadas al ambiente y ocupan los espacios y recursos disponibles alrededor de las raíces. Compant et al. (2019) señalan que los organismos incorporados deben competir por nutrientes, responder a las señales vegetales y mantener poblaciones suficientes para expresar sus funciones. Cuando la cepa no logra establecerse, sus propiedades identificadas en el laboratorio pierden relevancia agronómica, aunque hayan sido demostradas mediante pruebas bioquímicas.

Las limitaciones tecnológicas se relacionan principalmente con la producción, formulación y conservación de los inoculantes. Las células deben mantenerse viables durante el procesamiento, el almacenamiento y el transporte, además de recuperar su actividad después de la aplicación. Basu et al. (2021) explican que el soporte, la humedad, la concentración celular y la temperatura influyen sobre la vida útil. Estas dificultades aumentan en los productos multicepa, debido a que los integrantes pueden presentar diferentes requerimientos fisiológicos y velocidades de crecimiento.

La ausencia de procedimientos homogéneos para evaluar la calidad y eficacia también dificulta la comparación entre productos. La concentración microbiana, la pureza, la identidad de las cepas y la estabilidad funcional son variables indispensables para garantizar resultados consistentes. Backer et al. (2018) destacan que la ruta hacia la comercialización requiere controles capaces de verificar tanto la seguridad como la capacidad agronómica de los inoculantes. Sin estos procedimientos, productos con composiciones y calidades diferentes pueden comercializarse bajo categorías similares y generar respuestas contradictorias entre los productores.

La transferencia tecnológica hacia el sector agrícola constituye una limitación adicional. El uso apropiado de los productos requiere conocer las condiciones de almacenamiento, la dosis, el momento de aplicación y su compatibilidad con otros insumos. Pardo-Díaz et al. (2021) resaltan que la adopción de bacterias promotoras en sistemas sostenibles debe acompañarse de capacitación y asistencia técnica. Una aplicación incorrecta puede reducir la viabilidad o impedir el establecimiento de las cepas, generando la percepción de que la tecnología carece de eficacia. Los costos de producción, distribución y validación también influyen en la disponibilidad comercial de los inoculantes. Las empresas deben garantizar controles de calidad y realizar ensayos en distintos ambientes antes de recomendar los productos. Backer et al. (2018) señalan que este proceso exige colaboración entre instituciones científicas, empresas, organismos reguladores y productores. La ausencia de coordinación puede mantener los avances en una etapa experimental y retrasar su transformación en soluciones accesibles para los sistemas agrícolas.

En conjunto, las limitaciones identificadas muestran que el desarrollo de inoculantes no puede reducirse al aislamiento de una bacteria con características beneficiosas. Basu et al. (2021) advierten que el éxito requiere integrar selección, formulación, conservación y aplicación, mientras que De Souza et al. (2015) destacan la influencia del cultivo, el suelo y el microbioma residente. Por tanto, las investigaciones deben adoptar enfoques interdisciplinarios que vinculen microbiología, agronomía, ecología, tecnología de formulación y evaluación económica.

### **Variabilidad en la eficacia de los bioinoculantes**

La variabilidad de la respuesta agronómica constituye una de las limitaciones más documentadas en la literatura sobre inoculantes microbianos. Un producto puede producir incrementos importantes de crecimiento o rendimiento en un experimento y mostrar respuestas reducidas, nulas o incluso desfavorables en otro. Basu et al. (2021) explican que esta inconsistencia es especialmente evidente al comparar los resultados obtenidos en ambientes controlados con aquellos registrados en campos comerciales. La variación dificulta establecer recomendaciones generales y disminuye la confianza de los productores.

En los experimentos de laboratorio, las cepas se evalúan bajo condiciones de temperatura, humedad, disponibilidad de nutrientes y competencia cuidadosamente controladas. Este ambiente facilita la expresión de mecanismos como la solubilización de fósforo, la producción de auxinas o la inhibición de patógenos. Sin embargo, Backer et al. (2018) señalan que los sistemas agrícolas presentan una complejidad mucho mayor, caracterizada por fluctuaciones climáticas y comunidades microbianas diversas. Por ello, las capacidades observadas en medios artificiales deben interpretarse como un potencial que todavía necesita validarse bajo condiciones reales.

Las propiedades del suelo explican una parte importante de la variabilidad. El pH puede modificar la disponibilidad de nutrientes y la actividad enzimática; la textura influye en la retención de agua y el movimiento de las células; mientras que la materia orgánica proporciona recursos para la actividad microbiana. De Souza et al. (2015) destacan que estas variables determinan la supervivencia y la capacidad de colonización de las bacterias. En consecuencia, una cepa adaptada a un suelo ácido puede no mantener el mismo desempeño en condiciones alcalinas o salinas.

La humedad y la temperatura también generan fluctuaciones importantes en la eficacia. La sequía reduce la movilidad y actividad de muchos microorganismos, mientras que el exceso de agua modifica la disponibilidad de oxígeno en la rizosfera. Las temperaturas extremas pueden disminuir la viabilidad o alterar la producción de metabolitos. Liu et al. (2020) muestran que algunas rizobacterias mejoran la tolerancia vegetal al estrés, pero esta capacidad requiere que la propia bacteria sobreviva a la condición desfavorable. La selección debe evaluar, por tanto, la tolerancia del microorganismo y no únicamente la respuesta de la planta.

La composición del microbioma nativo representa otro factor determinante. Las poblaciones introducidas deben competir con organismos previamente establecidos por espacio, nutrientes y compuestos liberados por las raíces. Compant et al. (2019) explican que la colonización eficiente depende de la capacidad para reconocer señales vegetales y mantener poblaciones estables. Cuando las comunidades residentes muestran una elevada resistencia a la invasión, el inoculante puede disminuir rápidamente y perder la concentración necesaria para producir efectos agronómicos.

La especificidad de la relación con la planta también contribuye a las diferencias observadas. Las especies y variedades liberan exudados distintos y pueden responder de manera desigual a las hormonas o metabolitos microbianos. De Souza et al. (2015) evidencian que las capacidades de promoción deben analizarse en relación con el cultivo objetivo. Un organismo eficiente en maíz, por ejemplo, no necesariamente produce una respuesta equivalente en trigo, leguminosas u hortalizas, aunque conserve las mismas propiedades metabólicas.

La dosis y el momento de aplicación pueden modificar igualmente los resultados. Una concentración insuficiente reduce las probabilidades de colonización, mientras que cantidades excesivas no garantizan una respuesta superior y pueden alterar las relaciones microbianas. Basu et al. (2021) señalan que la formulación y el método de suministro determinan cuántas células viables alcanzan la zona radical. En consecuencia, los estudios deben describir claramente la concentración, el momento y el procedimiento de aplicación para facilitar la comparación y reproducibilidad.

La compatibilidad con otros insumos agrícolas constituye otra fuente de variación. Los tratamientos de semillas, fungicidas, insecticidas y determinadas condiciones de fertilización pueden afectar la supervivencia de las cepas. Basu et al. (2021) advierten que la eficacia debe evaluarse dentro del programa de manejo que realmente utiliza el productor. Una cepa puede mostrar resultados favorables cuando se aplica de manera aislada, pero perder viabilidad al combinarse con sustancias utilizadas habitualmente en el cultivo.

La heterogeneidad metodológica de las investigaciones también dificulta determinar la magnitud real de la eficacia. Los estudios utilizan diferentes microorganismos, cultivos, dosis, indicadores y periodos de evaluación. Posada Castaño

et al. (2021) identificaron esta diversidad en la literatura sobre PGPR y señalaron que limita la comparación entre resultados. La utilización de protocolos mínimos comunes permitiría distinguir si las diferencias se originan en el comportamiento biológico del inoculante o en la metodología aplicada.

La variabilidad no debe interpretarse como una demostración de que los inoculantes carecen de utilidad, sino como una evidencia de la complejidad ecológica de su funcionamiento. Backer et al. (2018) plantean que la selección debe orientarse hacia cepas y formulaciones adaptadas a condiciones específicas. En lugar de buscar microorganismos universales, resulta más apropiado identificar combinaciones compatibles con determinados cultivos, suelos y ambientes. Esta estrategia puede aumentar la consistencia de los resultados y facilitar recomendaciones regionales.

La validación multilocal y durante varios ciclos productivos constituye una medida indispensable para enfrentar esta limitación. Los ensayos realizados en diferentes suelos, climas y prácticas de manejo permiten identificar los ambientes donde el producto mantiene su eficacia. De Souza et al. (2015) señalan que la interacción entre microorganismo, planta y suelo determina la respuesta final. Por tanto, los resultados deben analizarse mediante modelos que incorporen esta interacción y no solamente mediante promedios generales de rendimiento.

En síntesis, la variabilidad de los bioinoculantes surge de la interacción entre características microbianas, genotipo vegetal, condiciones edáficas, clima, microbioma residente y manejo agronómico. Backer et al. (2018) consideran que superar esta limitación es una condición central para avanzar hacia la comercialización. La estandarización de los estudios, la selección de cepas locales y la validación en campo pueden contribuir a desarrollar productos con recomendaciones más precisas y respuestas productivas más confiables.

Principio del formulario  
Final del formulario

### **Competencia con el microbioma nativo**

La interacción entre los microorganismos inoculados y las comunidades presentes naturalmente en el suelo constituye uno de los principales factores que determinan el éxito o fracaso de los bioinoculantes. Durante los primeros años de investigación se asumía que la incorporación de una cepa beneficiosa conduciría a su establecimiento en la rizosfera y a la expresión de sus mecanismos promotores. Sin embargo, Compant et al. (2019) demostraron que la colonización depende de una sucesión de procesos ecológicos, entre ellos el desplazamiento hacia las raíces, la adhesión a sus superficies, la competencia por recursos y la capacidad para conservar poblaciones funcionales.

El microbioma nativo está formado por comunidades que han experimentado procesos de adaptación al suelo, al clima, al cultivo y a las prácticas de manejo. Estas poblaciones ocupan espacios disponibles y utilizan los compuestos liberados por las raíces, lo que les proporciona una ventaja frente a los organismos recién introducidos. Backer et al. (2018) explican que esta resistencia ecológica puede limitar el establecimiento de las cepas inoculadas, incluso cuando estas presentan capacidades beneficiosas demostradas en el laboratorio. Por tanto, la eficacia no depende únicamente de la función metabólica del microorganismo, sino también de su aptitud competitiva.

La competencia por carbono constituye una de las interacciones más importantes dentro de la rizosfera. Los exudados radicales contienen azúcares, aminoácidos, ácidos orgánicos y otros compuestos utilizados por numerosas poblaciones. Finkel et al. (2017) señalan que las bacterias con mayor capacidad para reconocer estas señales y aprovechar rápidamente los nutrientes poseen mejores posibilidades de colonización. Cuando la cepa inoculada no utiliza eficientemente los compuestos liberados por el cultivo, su población puede disminuir antes de establecer una asociación funcional.

El espacio físico también constituye un recurso limitado. Las superficies de las raíces presentan sitios específicos donde las bacterias pueden adherirse, formar microcolonias y desarrollar biopelículas. Compant et al. (2019) explican que la ocupación temprana de estos espacios puede impedir la entrada de otros organismos. Esta competencia adquiere importancia en el tratamiento de semillas, porque las cepas aplicadas deben acompañar el crecimiento de las raíces y colonizar rápidamente los nuevos tejidos antes de ser desplazadas por las poblaciones del suelo.

La competencia por hierro mediada por sideróforos también modifica la composición de las comunidades. Las bacterias que producen moléculas con elevada afinidad por este elemento pueden reducir su disponibilidad para otros

organismos y obtener una ventaja ecológica. Olanrewaju et al. (2017) señala que este mecanismo puede limitar a los patógenos, pero también influir sobre microorganismos neutros o beneficiosos presentes en el entorno. En consecuencia, la producción de sideróforos debe analizarse dentro de la comunidad completa y no únicamente como una característica individual de la cepa inoculada.

Las poblaciones nativas pueden inhibir directamente a los organismos incorporados mediante antibióticos, bacteriocinas, enzimas o compuestos volátiles. De manera recíproca, la cepa introducida puede alterar a las comunidades residentes y modificar funciones ecológicas del suelo. Olanrewaju et al. (2017) muestran que muchos mecanismos utilizados para controlar patógenos forman parte de estrategias generales de competencia microbiana. Esta situación exige evaluar si el inoculante afecta negativamente a otros organismos beneficiosos o a procesos importantes para el funcionamiento del agroecosistema.

Las interacciones no son exclusivamente competitivas, pues también pueden establecerse relaciones de cooperación y complementariedad. Algunos organismos transforman compuestos que posteriormente son utilizados por otras poblaciones, mientras que ciertas cepas favorecen indirectamente la supervivencia de sus compañeras mediante la modificación del ambiente. De Souza et al. (2015) señalan que el comportamiento de los inoculantes depende de estas redes de interacción y de las condiciones físicas y químicas del suelo. El resultado puede variar desde la exclusión de la cepa hasta su integración funcional dentro de la comunidad residente.

La planta desempeña una función activa en la selección del microbioma y puede favorecer o limitar el establecimiento de los organismos inoculados. La composición de los exudados cambia según la especie, el genotipo, la etapa de crecimiento, el estado nutricional y la presencia de estrés. Finkel et al. (2017) explican que las bacterias adaptadas a las señales de una planta determinada presentan mayores posibilidades de colonizarla. Por ello, la selección de cepas debe considerar la compatibilidad con el cultivo objetivo y no basarse únicamente en las propiedades observadas en medios artificiales.

Las prácticas agrícolas también modifican la resistencia del microbioma frente a la inoculación. La fertilización, el riego, la rotación, el uso de fitosanitarios y la incorporación de materia orgánica pueden favorecer a determinadas poblaciones y reducir a otras. Pardo-Díaz et al. (2021) destacan que el aprovechamiento de bacterias promotoras debe integrarse con prácticas de manejo sostenible adaptadas a cada sistema productivo. Una comunidad sometida a perturbaciones intensas puede responder de manera diferente a la introducción de microorganismos que un suelo con elevada diversidad y estabilidad ecológica.

El uso de cepas nativas constituye una de las alternativas propuestas para mejorar el establecimiento. Los organismos aislados del mismo ambiente donde serán aplicados pueden estar mejor adaptados al pH, la temperatura, la humedad y las comunidades residentes. Posada Castaño et al. (2021) destacan el interés creciente por caracterizar PGPR asociadas con cultivos y ambientes regionales. No obstante, el origen local no garantiza su eficacia; las cepas deben demostrar funciones beneficiosas, capacidad de colonización, estabilidad y seguridad antes de incorporarse a una formulación.

Otra estrategia consiste en diseñar consorcios que combinen organismos compatibles y funcionalmente complementarios. Estas comunidades pueden presentar mayores posibilidades de establecimiento cuando sus integrantes ocupan nichos diferentes o cooperan en el aprovechamiento de los recursos. Backer et al. (2018) señalan que el diseño de consorcios debe fundamentarse en el conocimiento de las interacciones ecológicas. La combinación empírica de varias cepas puede generar competencia interna y reducir la viabilidad del producto, por lo que la compatibilidad debe comprobarse tanto durante el almacenamiento como después de la aplicación.

Las tecnologías moleculares permiten estudiar la permanencia de las cepas y los cambios que producen en las comunidades nativas. Mediante marcadores específicos y técnicas de secuenciación es posible determinar si el microorganismo se establece, cuánto tiempo permanece y cómo modifica la estructura del microbioma. Backer et al. (2018) consideran que este seguimiento resulta indispensable para relacionar la presencia del inoculante con la respuesta agronómica. Sin esta información, un resultado negativo no permite distinguir si la cepa perdió sus funciones o simplemente desapareció del sistema.

La evaluación de la competencia también posee implicaciones relacionadas con la bioseguridad. La introducción repetida de grandes poblaciones podría modificar la composición microbiana y afectar procesos ecológicos que no fueron considerados inicialmente. De Souza et al. (2015) destacan que los microorganismos introducidos interactúan con redes biológicas complejas y que su comportamiento puede variar entre ambientes. Por esta razón, los estudios deben evaluar la persistencia, la dispersión y los efectos sobre las comunidades no objetivo, especialmente cuando se pretende aplicar el producto a gran escala.

En síntesis, la competencia con el microbioma nativo demuestra que la inoculación es un proceso ecológico complejo y no una simple incorporación de células al suelo. Compant et al. (2019) establecen que la colonización depende de la capacidad para ocupar nichos y mantener poblaciones funcionales, mientras que Backer et al. (2018) sitúan estas interacciones entre los factores centrales para el desarrollo de inoculantes eficaces. La selección de cepas locales, el diseño racional de consorcios y el seguimiento molecular pueden contribuir a mejorar el establecimiento sin ignorar la estabilidad y seguridad de las comunidades residentes.

### **Producción, formulación y estabilidad comercial**

La transferencia de los microorganismos promotores del crecimiento vegetal desde el laboratorio hacia el sector agrícola enfrenta desafíos tecnológicos relacionados con su producción, formulación, almacenamiento y distribución. Aunque numerosas cepas presentan capacidades beneficiosas en condiciones experimentales, solo una proporción limitada logra transformarse en productos comerciales estables. Basu et al. (2021) señalan que el desarrollo de un inoculante exige conservar la identidad, pureza, viabilidad y funcionalidad del microorganismo durante todas las etapas. Una falla en cualquiera de estos componentes puede reducir la respuesta agronómica, aunque la cepa haya demostrado un elevado potencial biológico.

La producción a gran escala constituye el primer desafío del proceso. Las condiciones empleadas para cultivar una bacteria en laboratorio no siempre pueden reproducirse con la misma eficiencia en fermentadores industriales. Es necesario optimizar el medio de crecimiento, la temperatura, la aireación, el pH y el tiempo de incubación para obtener una concentración suficiente de células sin alterar sus propiedades. Basu et al. (2021) explican que la escalabilidad depende tanto de la fisiología de la cepa como de la tecnología disponible. Los costos de los medios y del equipamiento también influyen en la viabilidad económica del producto.

La conservación de las capacidades funcionales durante la multiplicación requiere especial atención. Una cepa puede mantener su crecimiento en el medio industrial y, al mismo tiempo, disminuir la producción de metabolitos o perder parte de su capacidad para colonizar las raíces. Backer et al. (2018) destacan que la comercialización exige verificar no solo el número de células, sino también las características que justifican su utilización como inoculante. Por ello, los procesos productivos deben incorporar controles que comprueben periódicamente la identidad y la funcionalidad del microorganismo.

La elección del soporte constituye otra decisión fundamental. Los materiales sólidos deben conservar la humedad, proteger a las células y facilitar la aplicación, mientras que las formulaciones líquidas requieren estabilizantes capaces de mantener la viabilidad durante el almacenamiento. Basu et al. (2021) señalan que la turba, los minerales, los polímeros y diferentes materiales orgánicos pueden utilizarse como soportes, aunque cada uno presenta ventajas y limitaciones. La selección debe considerar la compatibilidad con la cepa, el costo, la disponibilidad regional y las condiciones de distribución.

La contaminación constituye un riesgo durante la producción y el envasado. La presencia de otros microorganismos puede competir con la cepa seleccionada, modificar la formulación o generar riesgos para los cultivos y los usuarios. Backer et al. (2018) destacan que los productos comerciales requieren procedimientos rigurosos de identificación y control microbiológico. La pureza adquiere especial relevancia en las formulaciones basadas en una sola cepa, mientras que en los consorcios debe verificarse la identidad y concentración de cada integrante.

La estabilidad durante el almacenamiento continúa siendo uno de los principales obstáculos. Las poblaciones pueden disminuir por desecación, agotamiento de nutrientes, acumulación de metabolitos, cambios de pH o exposición a

temperaturas inadecuadas. Basu et al. (2021) explican que la vida útil debe determinarse mediante evaluaciones periódicas realizadas bajo las condiciones reales de almacenamiento y distribución. No resulta suficiente medir la viabilidad inmediatamente después de la producción, pues el agricultor utilizará el producto semanas o meses más tarde.

Las variaciones de temperatura durante el transporte pueden reducir considerablemente la calidad del inoculante. Este problema adquiere mayor importancia en regiones donde no existe una cadena de almacenamiento controlada y los productos permanecen expuestos al calor. Pardo-Díaz et al. (2021) resaltan la necesidad de adaptar las tecnologías microbianas a las condiciones de los sistemas agrícolas regionales. En consecuencia, las formulaciones deben diseñarse considerando no solo el ambiente de aplicación, sino también la infraestructura logística disponible.

Los consorcios microbianos presentan dificultades adicionales porque sus integrantes pueden mostrar diferentes tasas de supervivencia y requerimientos fisiológicos. Una cepa puede multiplicarse durante el almacenamiento y desplazar a otras, alterando las proporciones inicialmente definidas. De Souza et al. (2015) explican que las interacciones microbianas pueden ser cooperativas o competitivas según las condiciones ambientales. El control de calidad de estos productos debe verificar la permanencia de todos los integrantes y no limitarse a determinar la concentración microbiana total.

Las tecnologías de encapsulación y liberación controlada ofrecen alternativas para proteger las células frente a condiciones desfavorables. Las matrices poliméricas pueden reducir la desecación y liberar gradualmente a los organismos después de la aplicación. Backer et al. (2018) señalan que estas innovaciones pueden favorecer la supervivencia y el establecimiento en el suelo. No obstante, su utilización incrementa la complejidad del proceso productivo y debe evaluarse en términos de costo, escalabilidad y compatibilidad con los equipos agrícolas.

La concentración mínima de células viables constituye un indicador básico de calidad, pero no permite evaluar por sí sola la eficacia del producto. Un inoculante puede contener una población elevada y haber perdido la capacidad para producir fitohormonas, movilizar nutrientes o colonizar las raíces. Basu et al. (2021) destacan que las pruebas de calidad deben integrar viabilidad y actividad biológica. Esto requiere procedimientos estandarizados que puedan aplicarse de forma reproducible entre lotes y durante toda la vida útil.

El envase también cumple una función importante en la estabilidad. Debe proteger la formulación frente a la humedad, el oxígeno, la radiación y las variaciones ambientales sin generar condiciones perjudiciales para los microorganismos. Backer et al. (2018) explican que la tecnología comercial debe considerar cada etapa comprendida entre la producción y la aplicación. La etiqueta, además, debe proporcionar información clara sobre la composición, concentración, fecha de vencimiento, almacenamiento, dosis y método de uso.

La compatibilidad con otros insumos agrícolas debe verificarse antes de emitir recomendaciones. Determinados fungicidas, insecticidas, fertilizantes o productos utilizados en el tratamiento de semillas pueden disminuir la viabilidad de las cepas. Basu et al. (2021) señalan que los inoculantes deben evaluarse bajo las mismas condiciones de manejo que encontrarán en los sistemas productivos. De este modo, pueden definirse intervalos de aplicación o combinaciones que eviten interacciones perjudiciales.

La estabilidad comercial también depende de la consistencia entre lotes. Los agricultores necesitan productos que mantengan una composición y eficacia semejantes en cada adquisición. Backer et al. (2018) identifican la estandarización como una condición necesaria para aumentar la confianza y facilitar la comercialización de los bioestimulantes microbianos. Las variaciones en la calidad pueden generar resultados contradictorios y afectar la percepción del sector productivo sobre estas tecnologías.

El análisis económico debe acompañar el desarrollo tecnológico desde sus primeras etapas. Un producto puede ser biológicamente eficaz, pero resultar inviable si requiere materias primas costosas, almacenamiento refrigerado o procedimientos demasiado complejos. Pardo-Díaz et al. (2021) destacan que la adopción depende de que las innovaciones respondan a las condiciones y posibilidades de los productores. Por tanto, el diseño debe buscar un equilibrio entre protección celular, estabilidad, facilidad de aplicación y costo final.

En síntesis, la producción y formulación constituyen componentes tan importantes como la selección inicial de la cepa. Basu et al. (2021) demuestran que la viabilidad, el soporte, el almacenamiento y el método de aplicación determinan la eficacia final, mientras que Backer et al. (2018) relacionan estos factores con la ruta hacia la comercialización. El desarrollo de productos confiables requerirá procesos escalables, controles de calidad, formulaciones adaptadas y validación bajo condiciones logísticas y agrícolas reales.

Principio del formulario

### **Regulación y transferencia tecnológica**

El crecimiento del mercado de bioinsumos agrícolas ha puesto de manifiesto la necesidad de establecer marcos regulatorios que garanticen la calidad, seguridad y eficacia de los productos elaborados con microorganismos vivos. A diferencia de los fertilizantes convencionales, cuya composición puede verificarse principalmente mediante análisis químicos, los bioinoculantes contienen poblaciones cuya viabilidad y actividad cambian durante el almacenamiento y después de la aplicación. Backer et al. (2018) señalan que esta complejidad dificulta el registro y la comercialización, debido a que los sistemas regulatorios deben evaluar simultáneamente la identidad, concentración, funcionalidad y seguridad de las cepas.

Una de las principales dificultades consiste en la ausencia de criterios armonizados para clasificar estos productos. Dependiendo del país y de la función declarada, un mismo microorganismo puede registrarse como biofertilizante, bioestimulante, acondicionador del suelo o agente de control biológico. Basu et al. (2021) explican que estas diferencias generan procedimientos de evaluación desiguales y dificultan el acceso a distintos mercados. Una clasificación clara debería considerar el mecanismo principal de acción sin ignorar que muchas cepas presentan funciones nutricionales, hormonales y protectoras de manera simultánea.

La identificación taxonómica de las cepas constituye un requisito básico para garantizar la trazabilidad y seguridad del producto. Las técnicas fenotípicas convencionales pueden resultar insuficientes para diferenciar organismos estrechamente relacionados, por lo que es necesario incorporar herramientas moleculares y genómicas. Backer et al. (2018) destacan que la caracterización debe permitir confirmar la identidad y detectar posibles factores asociados con patogenicidad o resistencia antimicrobiana. Esta evaluación resulta particularmente importante cuando el producto se aplica repetidamente y en grandes superficies agrícolas.

El control de calidad también debe establecer la concentración mínima de células viables durante toda la vida útil. La cantidad declarada en el momento de la fabricación puede disminuir antes de que el producto sea utilizado por el agricultor. Basu et al. (2021) señalan que la viabilidad debe evaluarse bajo condiciones de almacenamiento representativas y mediante procedimientos reproducibles. Además, la concentración no debe considerarse aisladamente, pues un número elevado de células no garantiza que la cepa conserve su capacidad para colonizar o desarrollar las funciones declaradas.

La demostración de eficacia agronómica representa otro componente central del registro. Los resultados obtenidos en laboratorio o invernadero no son suficientes para establecer recomendaciones comerciales, debido a la influencia del suelo, el clima, el cultivo y el microbioma residente. De Souza et al. (2015) explican que estas variables modifican el comportamiento de los microorganismos introducidos. Por esta razón, la evaluación debería incluir ensayos de campo realizados en diferentes ambientes, con diseños experimentales claros y tratamientos de comparación apropiados.

Los procedimientos regulatorios deben considerar también los posibles efectos sobre organismos no objetivo y comunidades microbianas nativas. Aunque las cepas se seleccionen por sus propiedades beneficiosas, su introducción puede modificar las relaciones ecológicas presentes en la rizosfera. Compant et al. (2019) demuestran que los microorganismos asociados con las plantas compiten por espacio, nutrientes y señales químicas. En consecuencia, la valoración de la seguridad debe examinar la persistencia, dispersión y capacidad del inoculante para alterar procesos biológicos importantes del suelo.

La regulación de los consorcios presenta dificultades adicionales, ya que debe verificarse la identidad, concentración y estabilidad de cada integrante. Las interacciones entre las cepas pueden modificar su comportamiento durante el almacenamiento o después de la aplicación. Backer et al. (2018) señalan que el diseño de comunidades microbianas exige conocer las relaciones funcionales entre sus componentes. Por ello, no resulta suficiente demostrar por separado la seguridad de cada organismo; también debe evaluarse la formulación completa en las condiciones previstas de utilización.

El etiquetado representa un instrumento esencial para asegurar el uso apropiado del producto. La información debe incluir la identidad de las cepas, concentración, formulación, fecha de vencimiento, condiciones de almacenamiento, dosis, método de aplicación y compatibilidad con otros insumos. Basu et al. (2021) destacan que el éxito de la inoculación depende del manejo realizado desde la producción hasta el contacto con la planta. Instrucciones incompletas o ambiguas pueden provocar aplicaciones que reduzcan la viabilidad y eficacia de los organismos.

La regulación también debe establecer mecanismos de vigilancia después de la comercialización. Los controles efectuados antes del registro no siempre permiten detectar todas las variaciones que pueden aparecer entre lotes o durante la distribución. Backer et al. (2018) relacionan la confianza en los inoculantes con la consistencia de su calidad y desempeño. El seguimiento posterior permitiría identificar productos con concentraciones inferiores a las declaradas, contaminaciones, etiquetado incorrecto o respuestas inesperadas bajo determinadas condiciones.

Además de los requisitos normativos, la transferencia tecnológica constituye un desafío para que los avances científicos se conviertan en prácticas agrícolas. Muchos estudios finalizan después de demostrar una respuesta favorable en condiciones controladas, sin desarrollar la formulación ni las recomendaciones necesarias para su utilización. Pardo-Díaz et al. (2021) señalan que la articulación entre investigación y sector productivo resulta indispensable para aprovechar las bacterias promotoras dentro de sistemas sostenibles. Esta transición requiere colaboración entre universidades, centros de investigación, empresas y organizaciones agrícolas.

La participación de los productores durante las etapas de validación puede facilitar el diseño de productos adaptados a las condiciones reales de manejo. Los ensayos participativos permiten identificar limitaciones relacionadas con la aplicación, el almacenamiento y la compatibilidad con las prácticas existentes. Posada Castaño et al. (2021) evidencian que la investigación sobre PGPR comprende una gran diversidad de contextos y procedimientos. Incorporar el conocimiento de los agricultores puede ayudar a definir recomendaciones técnicamente sólidas y operativamente viables.

La capacitación constituye otro componente esencial de la transferencia. Los microorganismos vivos requieren condiciones de almacenamiento y aplicación distintas de las correspondientes a muchos productos químicos convencionales. Pardo-Díaz et al. (2021) destacan que la adopción de estos insumos debe acompañarse de asistencia técnica que explique su funcionamiento y sus limitaciones. Los productores necesitan comprender que la eficacia depende de factores ambientales y que la respuesta puede mejorar cuando el producto se integra con prácticas apropiadas de manejo del suelo y del cultivo.

Los servicios de extensión agrícola pueden desempeñar una función de enlace entre la evidencia científica y las necesidades del sector productivo. Estos servicios pueden apoyar la selección de productos, verificar las condiciones de aplicación y registrar los resultados obtenidos en diferentes localidades. De Souza et al. (2015) señalan que la respuesta de los inoculantes depende del contexto edáfico y ambiental. La información generada por la extensión permitiría construir recomendaciones regionales y reducir la utilización de formulaciones poco compatibles con determinadas condiciones.

La adopción también depende del costo, la disponibilidad y la percepción de riesgo. Un agricultor puede mostrar resistencia a reemplazar parcialmente un insumo de respuesta conocida por un producto biológico con resultados variables. Basu et al. (2021) explican que la consistencia constituye uno de los principales factores que limitan la expansión comercial de los inoculantes. Las demostraciones en campo, los análisis económicos y la asistencia durante los primeros ciclos pueden contribuir a generar confianza y facilitar una incorporación gradual.

La protección de los recursos microbianos nativos y la distribución de los beneficios derivados de su aprovechamiento también deben considerarse dentro de los marcos institucionales. Las cepas aisladas de territorios con alta diversidad pueden convertirse en recursos biotecnológicos de valor comercial. Pardo-Díaz et al. (2021) resaltan la importancia de estudiar microorganismos adaptados a las condiciones regionales. Su utilización debe realizarse con trazabilidad, reconocimiento de su origen y cumplimiento de las normas relacionadas con acceso a recursos biológicos.

En síntesis, la regulación y transferencia tecnológica son indispensables para convertir los avances microbiológicos en productos seguros, eficaces y accesibles. Backer et al. (2018) destacan que la ruta hacia la comercialización exige superar barreras científicas, productivas y normativas. De forma complementaria, Pardo-Díaz et al. (2021) muestran que la adopción requiere articulación institucional, capacitación y adaptación territorial. El desarrollo del sector dependerá de normas claras, controles de calidad, validación en campo y mecanismos que conecten de manera efectiva la investigación con las necesidades de los productores.

### **Síntesis crítica de las limitaciones identificadas en la literatura**

El análisis conjunto de la evidencia muestra que las principales limitaciones para implementar microorganismos promotores del crecimiento vegetal no se relacionan exclusivamente con su capacidad biológica. Aunque numerosas cepas fijan nitrógeno, movilizan nutrientes, producen fitohormonas o protegen a las plantas frente a organismos patógenos, estos mecanismos no siempre generan respuestas agronómicas consistentes. Backer et al. (2018) señalan que la eficacia final depende de la interacción entre el microorganismo, la planta, el ambiente y la tecnología utilizada para convertirlo en un producto aplicable. Por ello, el potencial observado en el laboratorio debe considerarse una primera etapa de evaluación y no una demostración definitiva de utilidad comercial.

La distancia entre los resultados obtenidos en condiciones controladas y aquellos registrados en campo constituye una limitación transversal. En el laboratorio es posible regular la temperatura, la humedad, la disponibilidad de nutrientes y la presencia de otros organismos, mientras que los agroecosistemas presentan fluctuaciones climáticas y relaciones ecológicas considerablemente más complejas. Basu et al. (2021) destacan que muchas cepas reducen su eficacia cuando son sometidas a estas condiciones variables. Esta diferencia demuestra la necesidad de incorporar ensayos de campo desde las primeras etapas del desarrollo y no únicamente después de haber formulado el producto.

La variabilidad edáfica explica una parte importante de las respuestas contradictorias documentadas. Las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo afectan la supervivencia, movilidad, colonización y actividad metabólica de los microorganismos. De Souza et al. (2015) explican que factores como el pH, la humedad, la textura, la materia orgánica y la disponibilidad de nutrientes pueden favorecer o limitar el establecimiento de una cepa. En consecuencia, las recomendaciones generales deben sustituirse progresivamente por indicaciones ajustadas a los ambientes en los que la eficacia haya sido comprobada.

La especificidad de la interacción con la planta constituye otra limitación que impide considerar a las cepas como productos de aplicación universal. Los genotipos vegetales difieren en la composición de sus exudados radicales, sus necesidades nutricionales y su capacidad para responder a las señales microbianas. De Souza et al. (2015) muestran que los efectos obtenidos en cereales y leguminosas dependen de la compatibilidad entre las capacidades funcionales del microorganismo y las características del cultivo. La selección debe realizarse, por tanto, en relación con la especie y, cuando corresponda, con la variedad que se pretende inocular.

La competencia con el microbioma nativo representa uno de los mayores obstáculos ecológicos para el establecimiento de las poblaciones introducidas. Las comunidades residentes se encuentran adaptadas al ambiente y ocupan los nichos disponibles alrededor de las raíces, por lo que pueden limitar la permanencia del inoculante. Compant et al. (2019) explican que una colonización eficiente requiere movilidad, adhesión, aprovechamiento de los exudados y capacidad para competir por espacio y recursos. Una cepa con varias funciones beneficiosas pierde utilidad cuando no consigue mantener poblaciones suficientes para expresarlas.

La formulación y la estabilidad comercial constituyen limitaciones tecnológicas estrechamente relacionadas con la eficacia biológica. Los microorganismos deben conservar su viabilidad y funcionalidad durante la producción, el

almacenamiento, el transporte y la aplicación. Basu et al. (2021) señalan que el soporte, la temperatura, la humedad y el método de suministro influyen directamente en estos procesos. Por tanto, la investigación debe evaluar la cepa y su formulación como una unidad tecnológica, en lugar de considerarlas componentes independientes.

La heterogeneidad metodológica de los estudios dificulta la comparación y síntesis de los resultados. Las investigaciones emplean diferentes cepas, concentraciones, cultivos, tratamientos, condiciones ambientales e indicadores de respuesta. Posada Castaño et al. (2021) identificaron esta diversidad en la producción científica sobre rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal. El establecimiento de un conjunto mínimo de variables facilitaría la comparación entre estudios, sin impedir que cada investigación incorpore indicadores específicos relacionados con su cultivo o ambiente.

La falta de evaluaciones prolongadas también limita la comprensión de la persistencia de las cepas y la estabilidad de sus efectos. Muchos estudios abarcan únicamente las etapas iniciales del crecimiento y no determinan si los organismos permanecen activos hasta la cosecha o durante ciclos posteriores. Backer et al. (2018) destacan que la consistencia en campo constituye una condición indispensable para la comercialización. Los ensayos de largo plazo permitirían establecer la duración de los beneficios, la necesidad de reinoculación y los posibles cambios producidos en las comunidades microbianas residentes.

Los consorcios ofrecen posibilidades para mejorar la estabilidad funcional, pero introducen dificultades relacionadas con la compatibilidad entre sus integrantes. Reunir varias cepas con propiedades beneficiosas no garantiza que cooperen ni que conserven sus proporciones durante el almacenamiento y la colonización. De Souza et al. (2015) señalan que las interacciones entre microorganismos pueden variar según el ambiente y los recursos disponibles. El diseño de estos productos debe fundamentarse en pruebas de cooperación, estabilidad y desempeño conjunto, evitando formulaciones construidas únicamente a partir de la suma de capacidades individuales.

La regulación insuficiente o heterogénea también dificulta la expansión comercial. Las diferencias entre países respecto a la clasificación, los requisitos de calidad y la demostración de eficacia generan incertidumbre para fabricantes y usuarios. Backer et al. (2018) consideran que los marcos regulatorios deben garantizar la identidad, seguridad, estabilidad y funcionalidad de los productos. Una normativa débil puede permitir la comercialización de inoculantes de baja calidad, mientras que procedimientos desproporcionados pueden limitar el desarrollo de innovaciones útiles.

La transferencia tecnológica mantiene una brecha importante entre la investigación y la adopción productiva. Pardo-Díaz et al. (2021) destacan que la incorporación de bacterias beneficiosas requiere capacitación, asistencia técnica y productos adaptados a las condiciones regionales. La ausencia de instrucciones claras, el almacenamiento inadecuado o la aplicación en condiciones incompatibles pueden reducir la eficacia y generar desconfianza entre los agricultores. Por esta razón, el desarrollo de un inoculante no finaliza con su registro comercial, sino que debe incluir acompañamiento técnico y evaluación posterior a su adopción.

El análisis económico representa otro vacío frecuente en la literatura. La respuesta biológica debe traducirse en beneficios suficientes para justificar los costos de compra, almacenamiento y aplicación. Basu et al. (2021) señalan que una formulación comercial necesita combinar eficacia, estabilidad y viabilidad productiva. La ausencia de evaluaciones económicas dificulta determinar si los incrementos observados resultan relevantes para diferentes escalas de producción. Los estudios deberían incorporar costos, rentabilidad y riesgos asociados con la variabilidad de la respuesta.

Las limitaciones identificadas no deben interpretarse como evidencia de que los microorganismos carecen de potencial agrícola. Por el contrario, muestran que su funcionamiento depende de relaciones ecológicas y tecnológicas que requieren una comprensión más profunda. Olanrewaju et al. (2017) evidencian que las bacterias promotoras presentan mecanismos diversos y complementarios. El reto consiste en seleccionar las funciones apropiadas, garantizar la supervivencia de las cepas y utilizarlas en ambientes compatibles con sus características.

La literatura revisada muestra una transición desde la búsqueda de microorganismos de aplicación universal hacia el desarrollo de soluciones específicas para cultivos, suelos y condiciones ambientales determinadas. Backer et al. (2018)

relacionan esta orientación con una mejor comprensión del microbioma y con la necesidad de aumentar la consistencia de los productos. La caracterización de cepas nativas, el diseño racional de consorcios y las nuevas tecnologías de formulación constituyen alternativas para reducir la variabilidad, siempre que se acompañen de validaciones realizadas en campo.

En síntesis, la consolidación de los microorganismos promotores dentro de la agricultura requiere integrar selección microbiana, ecología, formulación, regulación, validación agronómica y transferencia tecnológica. Posada Castaño et al. (2021) muestran que el campo ha experimentado un crecimiento considerable, pero conserva diferencias metodológicas y vacíos de aplicación. La investigación futura deberá superar los estudios aislados y avanzar hacia programas interdisciplinarios capaces de desarrollar inoculantes seguros, estables, económicamente viables y adaptados a las condiciones reales de los sistemas productivos.

## **PERSPECTIVAS FUTURAS DE LA INVESTIGACIÓN SOBRE MICROORGANISMOS PROMOTORES DEL CRECIMIENTO VEGETAL**

La investigación sobre microorganismos promotores del crecimiento vegetal avanza desde la identificación de cepas beneficiosas hacia enfoques que integran microbiología, ecología, biotecnología, agronomía y ciencias computacionales. Esta transformación responde a la necesidad de comprender por qué los efectos observados en condiciones controladas no siempre se reproducen en los sistemas agrícolas. Backer et al. (2018) señalan que el desarrollo futuro de los inoculantes dependerá de relacionar los mecanismos de acción con la colonización, la formulación, el cultivo y las condiciones ambientales. Por tanto, el interés científico ya no se limita a descubrir nuevos organismos, sino que busca construir tecnologías capaces de mantener su funcionalidad durante la aplicación en campo.

El estudio del microbioma vegetal constituye una de las principales líneas de desarrollo. Las investigaciones futuras deberán establecer cómo se organizan las comunidades asociadas con las plantas, qué funciones desempeñan sus integrantes y cómo responden a las prácticas agrícolas y al cambio ambiental. Compant et al. (2019) demostraron que los microorganismos colonizan distintos compartimentos y mantienen relaciones complejas con el hospedante. La integración de la rizosfera, la endosfera y las partes aéreas permitirá interpretar la promoción del crecimiento como una propiedad del sistema completo y no solamente como el resultado de una cepa aislada.

La caracterización de microorganismos nativos ofrece posibilidades especialmente relevantes para las regiones con alta diversidad biológica. Estas poblaciones pueden presentar adaptaciones a condiciones locales de temperatura, humedad, salinidad, acidez o disponibilidad de nutrientes. Pardo-Díaz et al. (2021) destacan que su aprovechamiento puede contribuir al desarrollo de inoculantes compatibles con los sistemas agrícolas regionales. Sin embargo, la selección debe incluir evaluaciones funcionales, genómicas y de seguridad, pues el origen local no garantiza automáticamente un efecto beneficioso ni una aplicación segura.

El diseño de consorcios y microbiomas sintéticos constituye otra perspectiva de investigación. Estos sistemas buscan integrar cepas con funciones complementarias relacionadas con la nutrición, la estimulación fisiológica, la tolerancia al estrés y el control biológico. De Souza et al. (2015) señalan que la cooperación microbiana puede mejorar determinadas funciones, pero también advierten que las relaciones cambian según las condiciones del ambiente. Por ello, las combinaciones futuras deberán basarse en estudios de compatibilidad y estabilidad, evitando reunir microorganismos únicamente por las capacidades que presentan de manera individual.

Las tecnologías de formulación continuarán desempeñando una función decisiva para trasladar los hallazgos científicos hacia productos comerciales. La encapsulación, los materiales biodegradables, los protectores celulares y los sistemas de liberación controlada pueden mejorar la vida útil y el establecimiento de los organismos. Basu et al. (2021) explican que la formulación determina la viabilidad durante el almacenamiento y la cantidad de células que alcanzan la zona radical. Las investigaciones deberán adaptar estas tecnologías a diferentes condiciones logísticas y productivas para evitar que sus costos limiten la adopción.

La respuesta al cambio climático también orientará la selección de nuevas cepas y consorcios. Los escenarios de sequía, salinidad y temperaturas extremas requieren organismos capaces de sobrevivir en condiciones adversas y mantener sus funciones beneficiosas. Liu et al. (2020) documentan que determinadas rizobacterias regulan el etileno, estimulan las raíces y mejoran el estado fisiológico de las plantas sometidas a estrés. El reto consiste en demostrar que estas respuestas se mantienen en diferentes genotipos, intensidades de estrés y ambientes productivos.

La estandarización metodológica constituirá una condición necesaria para comparar resultados y construir conocimiento acumulativo. Posada Castaño et al. (2021) identifican una elevada heterogeneidad en los microorganismos, cultivos, variables y procedimientos utilizados por las investigaciones sobre PGPR. Los estudios futuros deberían informar como mínimo la identidad de la cepa, la concentración, el método de aplicación, las condiciones del suelo, el genotipo vegetal y los indicadores agronómicos. Esta información facilitaría los análisis comparativos y la identificación de los factores que determinan la eficacia.

La evaluación de largo plazo también deberá adquirir una mayor importancia. Los estudios breves permiten detectar respuestas iniciales, pero proporcionan información limitada sobre la persistencia de las cepas, los cambios en el microbioma y la estabilidad productiva. Backer et al. (2018) destacan que la consistencia constituye uno de los principales requisitos para la comercialización. Los ensayos realizados durante varios ciclos y localidades permitirán establecer la necesidad de reinoculación, los posibles efectos acumulativos y la rentabilidad de las aplicaciones.

La transferencia tecnológica requerirá una mayor articulación entre instituciones científicas, empresas, organismos reguladores y productores. Pardo-Díaz et al. (2021) señalan que las tecnologías microbianas deben adaptarse a las necesidades de los sistemas productivos y acompañarse de capacitación. Los proyectos participativos pueden facilitar la validación, identificar limitaciones operativas y generar recomendaciones comprensibles. Esta colaboración también permitirá orientar la investigación hacia problemas concretos y evitar productos técnicamente avanzados, pero poco accesibles o difíciles de aplicar.

En conjunto, las perspectivas futuras se dirigen hacia una microbiología agrícola más predictiva, contextualizada e integrada. Backer et al. (2018) plantean que la siguiente generación de inoculantes deberá combinar conocimiento mecanístico, ecología del microbioma, tecnologías de formulación y validación agronómica. El éxito no dependerá de encontrar una cepa universal, sino de desarrollar soluciones seguras y adaptadas a determinados cultivos, suelos y escenarios climáticos.

### **Integración de las ciencias ómicas y la biología de sistemas**

La integración de las ciencias ómicas representa una de las principales perspectivas para comprender de manera completa las interacciones entre las plantas y sus comunidades microbianas. Mientras la genómica identifica las capacidades potenciales de un organismo, la transcriptómica permite determinar cuáles genes se expresan, la proteómica muestra las proteínas producidas y la metabolómica revela los compuestos generados durante la interacción. Backer et al. (2018) destacan que estas herramientas han ampliado el estudio del microbioma y pueden contribuir a relacionar la composición de las comunidades con las respuestas agronómicas observadas.

La genómica comparativa permitirá distinguir las características funcionales y adaptativas de cepas pertenecientes a una misma especie. Dos microorganismos taxonómicamente próximos pueden diferir en genes relacionados con la colonización, la tolerancia ambiental o la producción de metabolitos. Olanrewaju et al. (2017) muestran que los mecanismos de promoción comprenden una gran diversidad de rutas metabólicas. Su identificación facilitará la selección de organismos con capacidades ajustadas a problemas concretos, como deficiencia de fósforo, sequía o presencia de determinados patógenos.

La metagenómica continuará ampliando el conocimiento sobre las comunidades no cultivables presentes en el suelo y los tejidos vegetales. Esta aproximación permite recuperar información genética directamente de las muestras y estimar el potencial funcional de poblaciones que no pueden aislarse mediante medios convencionales. Backer et al. (2018) señalan que el análisis comunitario modificó la concepción tradicional centrada en microorganismos

individuales. No obstante, la presencia de un gen en una muestra no demuestra que se encuentre activo ni que produzca una respuesta beneficiosa.

La metatranscriptómica puede complementar esta limitación al identificar los genes expresados por la comunidad bajo condiciones específicas. Su aplicación permitirá estudiar cómo el microbioma responde a la sequía, salinidad, fertilización o inoculación. Liu et al. (2020) demuestran que la respuesta frente al estrés involucra diferentes procesos fisiológicos y microbianos. El análisis de la expresión comunitaria ayudaría a determinar cuáles poblaciones y mecanismos participan activamente durante estas condiciones.

La proteómica y la metaproteómica aportarán información sobre las enzimas y estructuras funcionales presentes durante la interacción. La detección de proteínas relacionadas con la movilización de nutrientes, la colonización o la defensa puede ayudar a vincular la información genética con procesos biológicos concretos. Compant et al. (2019) destacan que la colonización exige diferentes capacidades fisiológicas y moleculares. El análisis proteico permitiría establecer cuándo se producen estos componentes y cómo varían entre ambientes.

La metabolómica permitirá examinar las moléculas responsables de la comunicación entre las raíces y los microorganismos. Entre ellas se encuentran fitohormonas, ácidos orgánicos, sideróforos y compuestos volátiles que intervienen en la nutrición, el crecimiento y la defensa. Olanrewaju et al. (2017) explican que la producción de auxinas forma parte de un intercambio bioquímico regulado por los compuestos liberados por la planta. La identificación simultánea de metabolitos puede revelar interacciones que no se detectan cuando cada sustancia se analiza por separado.

La biología de sistemas busca integrar estos niveles de información dentro de modelos que representen las relaciones entre genes, proteínas, metabolitos, microorganismos y respuestas vegetales. De Souza et al. (2015) señalan que el comportamiento de las bacterias depende de múltiples factores ambientales y ecológicos. Los modelos integrados pueden contribuir a explicar cómo las modificaciones del suelo o del clima alteran las funciones del microbioma. Sin embargo, su capacidad predictiva dependerá de la calidad y diversidad de los datos utilizados.

La integración ómica también puede mejorar el diseño de consorcios. El análisis de las rutas metabólicas permite identificar cepas con funciones complementarias y detectar posibles competencias por los mismos recursos. Backer et al. (2018) consideran que esta información puede apoyar el desarrollo de microbiomas sintéticos diseñados racionalmente. Aun así, las predicciones deben verificarse mediante pruebas de compatibilidad, debido a que las interacciones reales pueden modificarse cuando los organismos comparten un ambiente complejo.

Las herramientas ómicas también ofrecen posibilidades para evaluar la seguridad de las cepas. La identificación de genes relacionados con virulencia, toxinas o resistencia antimicrobiana puede ayudar a descartar organismos inadecuados para la comercialización. Backer et al. (2018) sitúan la seguridad y la caracterización rigurosa entre los componentes necesarios para la transición hacia productos comerciales. Esta evaluación debe combinarse con estudios fenotípicos, porque la presencia o ausencia de un gen no describe por completo el comportamiento del microorganismo.

Uno de los principales retos será la estandarización de los procedimientos de muestreo, procesamiento y análisis. Las diferencias en la extracción de material genético, las plataformas utilizadas y los métodos bioinformáticos pueden generar resultados difíciles de comparar. Posada Castaño et al. (2021) identifican una heterogeneidad considerable en la investigación sobre PGPR. La adopción de protocolos comunes y la disponibilidad de datos abiertos facilitarían la validación de los hallazgos y la construcción de modelos más robustos.

El costo y la infraestructura necesaria pueden limitar la aplicación de estas tecnologías en instituciones con menores recursos. Pardo-Díaz et al. (2021) destacan la necesidad de fortalecer la investigación regional sobre bacterias promotoras y su aprovechamiento sostenible. Las redes de colaboración, los centros compartidos de secuenciación y la formación en bioinformática pueden ampliar el acceso. Esta cooperación resulta especialmente importante para estudiar la diversidad microbiana de regiones tropicales y otros ambientes insuficientemente representados.

En síntesis, la integración de las ciencias ómicas y la biología de sistemas permitirá avanzar desde la descripción de microorganismos hacia la comprensión de redes funcionales completas. Olanrewaju et al. (2017) muestran que la

promoción del crecimiento depende de mecanismos múltiples, mientras que Backer et al. (2018) sitúan su análisis dentro del microbioma vegetal. El reto consiste en convertir la gran cantidad de información molecular en criterios útiles para seleccionar cepas, diseñar consorcios y predecir respuestas agronómicas que posteriormente sean validadas en campo.

### **Diseño racional de microbiomas y consorcios microbianos**

El diseño racional de microbiomas y consorcios microbianos representa una de las líneas con mayor potencial para el desarrollo de una nueva generación de inoculantes agrícolas. A diferencia de las formulaciones construidas mediante la combinación empírica de cepas, este enfoque busca seleccionar comunidades con base en la complementariedad de sus funciones, su compatibilidad ecológica y su capacidad para establecerse en un cultivo determinado. Backer et al. (2018) señalan que la comprensión del microbioma vegetal permite superar la búsqueda de microorganismos universales y avanzar hacia soluciones ajustadas a las características de la planta, el suelo y el ambiente.

Los primeros inoculantes se elaboraron principalmente con una sola cepa seleccionada por su capacidad para fijar nitrógeno, solubilizar fósforo o producir reguladores del crecimiento. Aunque estos productos demostraron beneficios importantes, su eficacia frecuentemente disminuye cuando las condiciones del campo difieren de las utilizadas durante la selección. Basu et al. (2021) explican que las variaciones ambientales y la competencia con las comunidades residentes reducen la estabilidad de las respuestas. Los consorcios buscan superar parcialmente esta limitación mediante la incorporación de organismos con diferentes capacidades fisiológicas y ecológicas.

La complementariedad funcional constituye el fundamento del diseño racional. Un consorcio puede integrar microorganismos fijadores de nitrógeno, solubilizadores de fósforo, productores de fitohormonas, reguladores del etileno y antagonistas de patógenos. Olanrewaju et al. (2017) muestran que estos mecanismos pueden actuar de forma conjunta para mejorar la nutrición, el crecimiento, la sanidad y la tolerancia al estrés. Sin embargo, la presencia de múltiples funciones no garantiza por sí sola una respuesta favorable, debido a que sus integrantes deben coexistir y mantener su actividad durante el almacenamiento y después de la aplicación.

La cooperación metabólica constituye otro criterio importante para seleccionar las cepas. Algunos microorganismos generan compuestos que pueden ser utilizados por otros, mientras que determinadas poblaciones transforman metabolitos o nutrientes en formas accesibles para los demás integrantes y para la planta. De Souza et al. (2015) explican que estas relaciones influyen en la supervivencia y funcionalidad de las comunidades microbianas. El análisis de los intercambios metabólicos puede facilitar la construcción de consorcios cuyos miembros ocupen nichos diferentes y reduzcan la competencia interna.

La compatibilidad debe evaluarse porque los microorganismos también pueden producir metabolitos que inhiben a otras cepas beneficiosas. Los antibióticos, sideróforos, bacteriocinas y enzimas que participan en el control de patógenos podrían afectar a integrantes del mismo consorcio. Mhlongo et al. (2018) señalan que estos compuestos forman parte de las estrategias de competencia desarrolladas en la rizosfera. Por ello, las pruebas iniciales deben determinar si los organismos pueden crecer conjuntamente y conservar las funciones por las cuales fueron seleccionados.

El diseño también debe considerar la compatibilidad con la planta hospedante. Los exudados radicales proporcionan señales y recursos que influyen sobre la colonización, por lo que una comunidad eficaz en un cultivo puede presentar un comportamiento diferente en otra especie. Finkel et al. (2017) explican que la capacidad para reconocer y utilizar los compuestos liberados por las raíces determina en gran medida el establecimiento bacteriano. En consecuencia, los consorcios deben seleccionarse y validarse en relación con el genotipo vegetal al que se destinarán.

Las características del suelo representan otro componente esencial. El pH, la humedad, la textura, la materia orgánica y la disponibilidad de nutrientes pueden favorecer a determinadas poblaciones y limitar a otras. De Souza et al. (2015) señalan que estas variables modifican la actividad de las bacterias y las interacciones establecidas con el microbioma nativo. El diseño racional debe incorporar información edáfica para evitar comunidades que solo funcionan bajo condiciones de laboratorio o en un tipo específico de sustrato.

Los microorganismos nativos ofrecen ventajas potenciales porque se encuentran previamente adaptados a determinadas condiciones ambientales y comunidades residentes. Pardo-Díaz et al. (2021) destacan que la caracterización de bacterias locales puede contribuir al desarrollo de bioinsumos compatibles con los sistemas agrícolas regionales. No obstante, su procedencia debe complementarse con evaluaciones de funcionalidad, seguridad y estabilidad, debido a que no todos los organismos adaptados al ambiente ejercen efectos beneficiosos sobre las plantas.

Las tecnologías ómicas pueden apoyar la selección de comunidades al identificar genes, proteínas y metabolitos asociados con funciones específicas. Backer et al. (2018) sostienen que la información genómica y funcional puede utilizarse para reconocer organismos complementarios y anticipar posibles incompatibilidades. La integración de estos datos permite pasar de combinaciones basadas únicamente en ensayos individuales hacia microbiomas sintéticos contruidos a partir de hipótesis ecológicas y metabólicas.

La modelación computacional también puede contribuir a representar los intercambios de nutrientes y metabolitos entre los integrantes. Estos modelos podrían identificar dependencias, redundancias y posibles relaciones de competencia antes de realizar todas las combinaciones experimentales. Olanrewaju et al. (2017) muestran que la promoción del crecimiento involucra múltiples rutas funcionales que pueden superponerse entre diferentes cepas. Sin embargo, las predicciones computacionales deben validarse mediante experimentos, porque el comportamiento real puede modificarse por la planta y las condiciones ambientales.

Una estrategia relevante consiste en construir comunidades mínimas que conserven las funciones esenciales sin incorporar un número innecesariamente elevado de organismos. Los consorcios demasiado complejos pueden presentar mayores dificultades de producción, almacenamiento, control de calidad e interpretación. Backer et al. (2018) señalan que la funcionalidad del microbioma depende de sus interacciones y no únicamente de la cantidad de especies. Por tanto, un consorcio pequeño y estable puede resultar más útil que una formulación muy diversa, pero difícil de controlar.

La estabilidad durante la producción y el almacenamiento debe evaluarse desde las primeras etapas del diseño. Los integrantes pueden presentar diferentes velocidades de crecimiento, requerimientos nutricionales y tolerancias a la temperatura o desecación. Basu et al. (2021) explican que las condiciones de formulación determinan la viabilidad y actividad de los microorganismos. En los productos multicepa, además de conservar la población total, es necesario comprobar que las proporciones entre los organismos no cambien hasta afectar la funcionalidad prevista.

La eficacia debe comprobarse mediante experimentos que comparen cada cepa por separado, las diferentes combinaciones y un tratamiento sin inoculación. Este diseño permite determinar si la respuesta del consorcio es aditiva, sinérgica o antagonista. Posada Castaño et al. (2021) identifican una heterogeneidad metodológica que dificulta comparar los resultados de los estudios sobre PGPR. La utilización de tratamientos y variables comunes mejoraría la capacidad para reconocer cuáles combinaciones ofrecen ventajas reales frente a los inoculantes individuales.

Los ensayos en campo deberán evaluar la persistencia de los organismos y los cambios que producen dentro del microbioma residente. Una comunidad puede conservar su composición en una formulación y modificarse rápidamente después de entrar en contacto con el suelo. Compant et al. (2019) señalan que la colonización depende de la competencia por nichos, nutrientes y señales de la planta. El seguimiento molecular permitirá establecer qué integrantes permanecen activos y si la respuesta agronómica se relaciona efectivamente con su presencia.

En síntesis, el diseño racional de microbiomas busca construir comunidades microbianas funcionales, compatibles y adaptadas a condiciones productivas concretas. Backer et al. (2018) sitúan este enfoque entre las perspectivas más relevantes para mejorar la estabilidad de los inoculantes. Su desarrollo requiere integrar ecología microbiana, ciencias ómicas, modelación, tecnología de formulación y evaluación agronómica. El objetivo no consiste simplemente en aumentar el número de cepas, sino en seleccionar el conjunto mínimo capaz de mantener funciones complementarias y producir respuestas consistentes en campo.

### **Agricultura digital e inteligencia artificial**

La integración de la agricultura digital con el estudio de los microorganismos promotores del crecimiento vegetal constituye una perspectiva emergente para mejorar la selección, aplicación y seguimiento de los inoculantes. La eficacia de estos productos depende de numerosas variables relacionadas con la cepa, el cultivo, el suelo, el microbioma nativo y las condiciones climáticas. Backer et al. (2018) señalan que esta complejidad representa uno de los principales obstáculos para obtener respuestas consistentes en campo. Las tecnologías digitales pueden contribuir a organizar dicha información y orientar recomendaciones adaptadas a condiciones productivas específicas.

Los sensores instalados en el suelo permiten registrar variables como humedad, temperatura, conductividad eléctrica y disponibilidad de nutrientes. Estos datos pueden utilizarse para identificar ambientes que favorecen o limitan la supervivencia de los organismos introducidos. De Souza et al. (2015) explican que las propiedades físicas y químicas del suelo modifican la colonización y actividad de las bacterias. Por consiguiente, el monitoreo continuo puede ayudar a determinar el momento más apropiado para la inoculación y reconocer las condiciones en las que el producto pierde eficacia.

Las plataformas de teledetección y los sensores proximales también ofrecen posibilidades para evaluar la respuesta fisiológica del cultivo. Las imágenes obtenidas mediante drones o satélites pueden registrar cambios en el vigor, la cobertura vegetal y determinados indicadores relacionados con el estado hídrico. Liu et al. (2020) muestran que las rizobacterias pueden modificar el crecimiento y la respuesta fisiológica bajo condiciones de estrés. La combinación de estas mediciones con datos microbiológicos permitiría determinar si las diferencias observadas se relacionan con la inoculación o con otros factores presentes en el terreno.

El seguimiento molecular constituye un componente necesario para interpretar adecuadamente la información digital. La respuesta agronómica no demuestra por sí sola que la cepa se haya establecido, pues también puede estar influida por el clima, la fertilización o el manejo. Compant et al. (2019) destacan que la colonización de la rizosfera y la endosfera es indispensable para que muchos organismos desarrollen sus funciones. Las herramientas moleculares pueden verificar la presencia del inoculante y relacionarla con los indicadores registrados mediante sensores.

La inteligencia artificial puede apoyar la integración de datos genómicos, edáficos, climáticos, microbiológicos y agronómicos. Los algoritmos de aprendizaje automático podrían reconocer patrones entre las características de una cepa, las condiciones ambientales y la respuesta del cultivo. Posada Castaño et al. (2021) evidencian una elevada heterogeneidad en los estudios sobre PGPR, tanto en los procedimientos como en los resultados. La organización computacional de esta información puede ayudar a identificar los factores que explican una mayor proporción de la variabilidad observada.

Los modelos predictivos también podrían utilizarse para estimar qué cepa o consorcio presenta mayores probabilidades de funcionar bajo determinadas condiciones. Backer et al. (2018) explican que la especificidad de las interacciones limita la aplicación universal de los inoculantes. Un sistema de recomendación podría relacionar el genotipo vegetal, las propiedades del suelo y los datos climáticos con productos previamente validados. Sin embargo, sus resultados deben interpretarse como apoyo para la toma de decisiones y no como sustitutos de los ensayos de campo.

El diseño de consorcios constituye otra posible aplicación de las herramientas computacionales. Los modelos pueden comparar rutas metabólicas, identificar funciones complementarias y anticipar relaciones de competencia entre las cepas. Olanrewaju et al. (2017) muestran que los mecanismos de promoción vegetal comprenden procesos nutricionales, hormonales y defensivos que pueden coexistir en diferentes organismos. La inteligencia artificial podría reducir el número de combinaciones experimentales necesarias, aunque cada consorcio seleccionado deberá someterse posteriormente a pruebas de compatibilidad y eficacia.

Las tecnologías digitales también pueden contribuir al control de calidad durante la producción y distribución de los inoculantes. El registro de temperatura, humedad y tiempo de almacenamiento permitiría identificar condiciones capaces de reducir la viabilidad antes de que el producto llegue al agricultor. Basu et al. (2021) señalan que la estabilidad durante la conservación constituye un requisito esencial para la eficacia. Los sistemas de trazabilidad

podrían relacionar cada lote con su proceso de producción, condiciones logísticas y resultados obtenidos después de la aplicación.

La construcción de modelos confiables exige bases de datos estandarizadas y suficientemente amplias. Los registros deberían incluir la identidad de la cepa, la concentración utilizada, el método de aplicación, el genotipo vegetal, las características del suelo, el clima y los indicadores productivos. Posada Castaño et al. (2021) muestran que la falta de uniformidad dificulta la comparación entre investigaciones. Sin datos completos y comparables, los algoritmos pueden reproducir sesgos y generar predicciones poco aplicables a contextos distintos de aquellos utilizados para su entrenamiento.

La interpretación causal representa otra limitación importante. Un modelo puede detectar asociaciones entre la inoculación y una respuesta vegetal sin demostrar cuáles mecanismos originaron el resultado. Olanrewaju et al. (2017) explica que la promoción del crecimiento comprende procesos fisiológicos interdependientes cuya importancia cambia según el ambiente. Por ello, las predicciones deben complementarse con experimentos capaces de comprobar las funciones microbianas y descartar explicaciones alternativas.

El acceso desigual a infraestructura digital también debe considerarse. Los sensores, sistemas de secuenciación y plataformas analíticas pueden resultar costosos para pequeños productores o instituciones con recursos limitados. Pardo-Díaz et al. (2021) resaltan que la transferencia de tecnologías microbianas requiere adaptación territorial, capacitación y acompañamiento técnico. Las herramientas futuras deberían ofrecer niveles de aplicación diferenciados, desde recomendaciones basadas en análisis sencillos del suelo hasta sistemas avanzados de monitoreo y predicción.

Las aplicaciones de inteligencia artificial en esta área todavía deben considerarse emergentes, ya que las referencias analizadas proporcionan mayor evidencia sobre los factores biológicos que sobre sistemas digitales consolidados. Backer et al. (2018) plantean la necesidad de integrar información multidimensional para mejorar el desarrollo y comercialización de inoculantes, pero esto no demuestra que los modelos predictivos ya se utilicen de forma generalizada. En consecuencia, estas posibilidades deben presentarse como líneas futuras de investigación y validarse antes de formular recomendaciones productivas.

En síntesis, la agricultura digital y la inteligencia artificial pueden facilitar una aplicación más precisa y contextualizada de los microorganismos promotores. Su principal aporte consistiría en relacionar información sobre cepas, cultivos, suelos, clima y microbiomas para reducir la variabilidad de las respuestas. De Souza et al. (2015) demuestran que estas interacciones determinan la eficacia final del inoculante. La consolidación de este enfoque requerirá bases de datos estandarizadas, modelos interpretables, validación experimental y soluciones accesibles para diferentes escalas de producción.

### **Contribución a la agricultura climáticamente inteligente**

La agricultura climáticamente inteligente busca aumentar de manera sostenible la productividad, fortalecer la capacidad de adaptación de los sistemas productivos y reducir, cuando sea posible, los impactos ambientales asociados con la actividad agrícola. Dentro de este enfoque, los microorganismos promotores del crecimiento vegetal pueden contribuir mediante mecanismos que mejoran la nutrición, el desarrollo radical y la tolerancia frente a condiciones adversas. Liu et al. (2020) señalan que determinadas rizobacterias ayudan a los cultivos a mantener su crecimiento bajo sequía, salinidad y otros tipos de estrés. Sin embargo, su utilización debe integrarse con prácticas de manejo del suelo, el agua y la biodiversidad.

La adaptación a la sequía constituye una de las aplicaciones con mayor relevancia ante los escenarios climáticos futuros. La producción microbiana de auxinas puede estimular la ramificación radical y ampliar el volumen de suelo explorado por la planta. Olanrewaju et al. (2017) explican que la interacción entre las auxinas bacterianas y las señales vegetales modifica la arquitectura de las raíces. Un sistema radical más desarrollado puede mejorar el acceso al agua, aunque su beneficio dependerá de la existencia de humedad disponible y de la capacidad de la cepa para permanecer activa durante el periodo de estrés.

La regulación del etileno mediante la actividad ACC desaminasa representa otro mecanismo importante para mantener el crecimiento durante la sequía. La acumulación excesiva de esta hormona puede inhibir las raíces y acelerar procesos de senescencia. Olanrewaju et al. (2017) señala que algunas bacterias degradan el precursor del etileno y moderan esta respuesta fisiológica. Este mecanismo puede permitir que el cultivo mantenga temporalmente la exploración del suelo, especialmente cuando actúa junto con la producción de fitohormonas y la movilización de nutrientes.

La salinización de los suelos constituye otro desafío que puede intensificarse por el uso inadecuado del riego, la elevada evaporación y los cambios en la disponibilidad de agua. Liu et al. (2020) documentan que las rizobacterias pueden mejorar el crecimiento bajo salinidad mediante la regulación hormonal y el fortalecimiento del sistema radical. No obstante, las cepas destinadas a estos ambientes deben ser capaces de tolerar concentraciones elevadas de sales, ya que su desaparición impediría la expresión de los mecanismos beneficiosos.

Las temperaturas extremas afectan simultáneamente a los cultivos y a los organismos asociados con sus raíces. El calor puede alterar las membranas, acelerar la pérdida de agua e incrementar el estrés oxidativo, mientras que las bajas temperaturas reducen la actividad metabólica. Backer et al. (2018) explican que el desempeño de los inoculantes depende de su adaptación al ambiente de aplicación. Por tanto, los programas de selección deben evaluar la tolerancia térmica de las cepas, además de sus capacidades nutricionales y hormonales.

La nutrición vegetal también puede verse afectada por los cambios climáticos, debido a que la disponibilidad de agua regula la difusión y absorción de los elementos minerales. Las bacterias fijadoras de nitrógeno y solubilizadoras de fósforo pueden complementar el suministro de nutrientes en condiciones donde estos procesos se encuentran limitados. Vejan et al. (2016) señalan que las funciones nutricionales suelen combinarse con la producción de reguladores del crecimiento. Esta complementariedad puede ayudar a mantener la actividad fisiológica, aunque no elimina la necesidad de diagnosticar y corregir las deficiencias del suelo.

Los microorganismos también pueden contribuir a la protección frente a enfermedades cuya distribución o severidad se modifique con el clima. El aumento de la temperatura, los cambios en la humedad y el debilitamiento fisiológico de las plantas pueden favorecer determinados patógenos. Mhlongo et al. (2018) explican que las rizobacterias pueden limitar su establecimiento mediante competencia, sideróforos, antibióticos e inducción de resistencia sistémica. Estas funciones deben integrarse dentro del manejo fitosanitario, porque su eficacia varía según el agente causal y las condiciones del ambiente.

El mejoramiento de la actividad biológica del suelo constituye otra contribución potencial. Los sistemas con mayor diversidad vegetal, cobertura y materia orgánica proporcionan recursos que favorecen el funcionamiento de las comunidades microbianas. De Souza et al. (2015) señalan que la actividad de las bacterias promotoras depende de las propiedades físicas y químicas del suelo. La inoculación ofrece mayores posibilidades de éxito cuando se combina con prácticas de conservación que mantienen la humedad, reducen la erosión y protegen los hábitats microbianos.

Desde la perspectiva de la mitigación, la fijación biológica del nitrógeno podría reducir parcialmente la necesidad de fertilizantes sintéticos cuando se utiliza en cultivos y condiciones compatibles. Vejan et al. (2016) destaca la función de las rizobacterias como biofertilizantes capaces de mejorar la nutrición vegetal. Sin embargo, no debe asumirse que toda inoculación produce automáticamente una disminución de emisiones o un beneficio climático. Para sostener esta afirmación se requieren evaluaciones que comparen el uso de insumos, el rendimiento y las emisiones a lo largo del ciclo productivo.

La selección de microorganismos nativos representa una estrategia para desarrollar productos adaptados a escenarios climáticos específicos. Las poblaciones procedentes de ambientes secos, salinos o térmicamente extremos pueden poseer características que favorezcan su supervivencia. Pardo-Díaz et al. (2021) destacan el potencial de las bacterias locales para fortalecer sistemas agrícolas sostenibles. Aun así, cada cepa debe demostrar que, además de tolerar el estrés, es capaz de colonizar la planta y producir una respuesta agronómica beneficiosa.

Los consorcios pueden ampliar la diversidad de mecanismos disponibles para enfrentar condiciones climáticas variables. Una comunidad puede integrar cepas capaces de regular el etileno, producir auxinas, movilizar nutrientes y proteger frente a patógenos. Backer et al. (2018) señalan que los consorcios funcionales pueden proporcionar mayor

estabilidad que los productos basados en un solo organismo. Sin embargo, su diseño debe considerar la compatibilidad entre sus integrantes y su capacidad conjunta para sobrevivir durante la formulación y la aplicación.

La validación bajo condiciones climáticas realistas constituye una prioridad. Los experimentos controlados permiten estudiar mecanismos específicos, pero no reproducen completamente la alternancia entre sequía, lluvias intensas, temperaturas extremas y presiones fitosanitarias. Basu et al. (2021) advierten que numerosas cepas promisorias pierden eficacia después de trasladarse al campo. Las evaluaciones futuras deberán realizarse en diferentes localidades, ciclos agrícolas y escenarios de manejo para identificar los límites y condiciones de funcionamiento.

La contribución a la agricultura climáticamente inteligente también debe evaluarse mediante indicadores ambientales, productivos y económicos. No basta con demostrar un incremento inicial de biomasa si la formulación resulta costosa, requiere condiciones logísticas difíciles o no reduce el uso de insumos. Backer et al. (2018) destacan que la comercialización depende de la eficacia, estabilidad y viabilidad de la tecnología. Los estudios deberían medir el rendimiento, la eficiencia en el uso del agua y los nutrientes, la persistencia de las cepas y la rentabilidad de la aplicación.

En síntesis, los microorganismos promotores presentan un potencial relevante para fortalecer la adaptación de los cultivos frente a sequía, salinidad, temperaturas extremas y cambios fitosanitarios. Liu et al. (2020) respaldan su capacidad para mejorar diferentes respuestas vegetales bajo estrés, mientras que de Souza et al. (2015) demuestran que su funcionamiento depende del contexto edáfico y ambiental. Su contribución efectiva a una agricultura climáticamente inteligente requerirá cepas adaptadas, formulaciones estables, validación en campo y una integración estrecha con prácticas sostenibles de manejo.

### **Síntesis de las perspectivas futuras**

El análisis de la literatura permite identificar una convergencia entre diferentes líneas de investigación orientadas hacia un propósito común: comprender el microbioma vegetal como un sistema biológico complejo y aprovechar sus funciones para desarrollar tecnologías agrícolas más eficientes. Backer et al. (2018) señalan que el avance de los inoculantes dependerá de integrar el conocimiento sobre los mecanismos microbianos con la ecología, la formulación y las condiciones de aplicación. Esta perspectiva supera la selección de cepas basada en una sola capacidad y promueve soluciones ajustadas a las características de los cultivos y los ambientes productivos.

Las ciencias ómicas continuarán desempeñando una función central en la caracterización de los microorganismos y sus interacciones. La genómica permitirá identificar capacidades potenciales, mientras que la transcriptómica, proteómica y metabolómica ayudarán a determinar cuáles mecanismos se expresan durante la asociación con la planta. Olanrewaju et al. (2017) muestran que la promoción del crecimiento depende de rutas nutricionales, hormonales y defensivas que pueden actuar simultáneamente. La integración de estos niveles de información permitirá seleccionar organismos con funciones específicas y comprender las condiciones que regulan su actividad.

El diseño racional de consorcios y microbiomas sintéticos constituye otra perspectiva relevante. Estas comunidades buscan combinar organismos compatibles capaces de movilizar nutrientes, regular el crecimiento, fortalecer la tolerancia al estrés y proteger frente a patógenos. De Souza et al. (2015) advierten que las interacciones pueden ser cooperativas o competitivas según el ambiente. Por ello, el futuro de los productos multicepa dependerá de demostrar la complementariedad funcional, la estabilidad de la comunidad y su compatibilidad con la planta y el microbioma residente.

La caracterización de microorganismos nativos también deberá fortalecerse, particularmente en regiones tropicales, subtropicales y otros ambientes con elevada diversidad biológica. Pardo-Díaz et al. (2021) destacan el potencial de las bacterias locales para desarrollar bioinsumos adaptados a las condiciones edafoclimáticas regionales. No obstante, su aprovechamiento requiere capacidades de aislamiento, secuenciación, evaluación funcional y conservación. También será necesario garantizar la seguridad y trazabilidad de las cepas antes de su producción comercial.

Las tecnologías de formulación seguirán siendo determinantes para transformar los avances biológicos en productos aplicables. La encapsulación, los soportes biodegradables y los sistemas de liberación controlada pueden mejorar la

supervivencia durante el almacenamiento y favorecer el establecimiento después de la inoculación. Basu et al. (2021) explican que la viabilidad y el método de suministro condicionan directamente la respuesta del cultivo. Las innovaciones deberán encontrar un equilibrio entre protección celular, facilidad de aplicación, costo y adaptación a las condiciones logísticas de cada región.

La agricultura digital y las herramientas de análisis predictivo ofrecen posibilidades para integrar información sobre el microorganismo, el cultivo, el suelo y el clima. Posada Castaño et al. (2021) identifican una elevada heterogeneidad en los estudios sobre PGPR, lo que dificulta establecer patrones generales. Las bases de datos estandarizadas y los modelos computacionales podrían ayudar a reconocer las combinaciones con mayor probabilidad de éxito. Sin embargo, estas aplicaciones todavía requieren validación y no deben sustituir la experimentación bajo condiciones reales.

La investigación futura deberá prestar mayor atención a la respuesta de los inoculantes frente a sequía, salinidad, temperaturas extremas y otras manifestaciones asociadas con la variabilidad climática. Liu et al. (2020) demuestran que algunas rizobacterias mejoran el crecimiento y el estado fisiológico de las plantas bajo estrés. El reto consiste en seleccionar cepas que también sobrevivan a estas condiciones y mantengan sus funciones durante periodos prolongados. Las evaluaciones deberán incorporar diferentes intensidades de estrés, genotipos y etapas fenológicas. La estandarización metodológica constituye una condición necesaria para comparar resultados y construir evidencia acumulativa. Los estudios deberían informar con precisión la identidad de las cepas, su concentración, la formulación, el método de aplicación, las características del suelo, el genotipo vegetal y las variables evaluadas. Posada Castaño et al. (2021) muestran que las diferencias metodológicas limitan la interpretación conjunta de la literatura. La adopción de criterios comunes aumentaría la reproducibilidad sin impedir que cada investigación incluya indicadores adaptados a su contexto.

Los ensayos multilocales y de largo plazo deberán ocupar un lugar más importante dentro del proceso de desarrollo. Backer et al. (2018) destacan que la inconsistencia bajo condiciones de campo constituye una de las barreras principales para la comercialización. Las evaluaciones realizadas durante varios ciclos permitirán determinar la persistencia de las cepas, la estabilidad de los efectos y la necesidad de repetir las aplicaciones. Además, facilitarán la identificación de ambientes en los que un producto proporciona beneficios agronómicos y económicos consistentes. La seguridad ambiental y microbiológica deberá incorporarse desde las primeras etapas de selección. La caracterización genómica puede ayudar a detectar factores asociados con patogenicidad, toxinas o resistencia antimicrobiana, pero debe complementarse con evaluaciones fenotípicas y ecológicas. Backer et al. (2018) sitúan la seguridad entre los requisitos esenciales para avanzar hacia productos comerciales. En los consorcios también será necesario examinar el comportamiento conjunto de los integrantes y sus posibles efectos sobre comunidades no objetivo.

La regulación deberá evolucionar para responder a la complejidad de los inoculantes microbianos. Los productos multifuncionales pueden situarse simultáneamente dentro de categorías relacionadas con biofertilización, bioestimulación y control biológico. Basu et al. (2021) señalan que la falta de procedimientos armonizados dificulta el desarrollo comercial. Los marcos futuros deberán garantizar identidad, viabilidad, eficacia y seguridad, sin imponer requisitos que resulten incompatibles con la naturaleza de los organismos vivos o que limiten injustificadamente la innovación.

La transferencia tecnológica requerirá una articulación más estrecha entre universidades, centros de investigación, empresas, instituciones públicas y productores. Pardo-Díaz et al. (2021) destacan que la adopción de bacterias promotoras depende de la capacitación y de su adaptación a las necesidades regionales. Los proyectos participativos permitirán identificar dificultades de almacenamiento y aplicación, evaluar la aceptación de los productos y generar recomendaciones comprensibles. Esta colaboración también facilitará la incorporación de criterios económicos desde las primeras fases del desarrollo.

El análisis económico y ambiental deberá complementar las evaluaciones microbiológicas y agronómicas. Un inoculante no puede considerarse exitoso únicamente porque incremente una variable de crecimiento en condiciones

controladas. Backer et al. (2018) explican que la comercialización requiere productos eficaces, estables y viables. Las investigaciones deberán cuantificar la rentabilidad, la reducción efectiva de insumos, la eficiencia en el uso de agua y nutrientes y los posibles impactos sobre las comunidades del suelo.

En conjunto, las perspectivas futuras muestran que los microorganismos promotores dejarán de considerarse exclusivamente como biofertilizantes para integrarse dentro de estrategias de manejo del microbioma. De Souza et al. (2015) evidencian que su funcionamiento surge de la interacción entre la cepa, la planta y el ambiente, mientras que Backer et al. (2018) vinculan esta complejidad con la necesidad de desarrollar tecnologías contextuales. La consolidación de estos avances permitirá construir inoculantes más específicos, seguros y estables, siempre que el conocimiento molecular se articule con la validación agronómica y las necesidades reales de los productores.

### 3. CONCLUSIÓN

La revisión de la literatura permitió reconocer una evolución conceptual y tecnológica significativa en el estudio de los microorganismos promotores del crecimiento vegetal. El enfoque inicial, centrado en la caracterización de cepas individuales y en el análisis aislado de determinadas funciones, ha sido reemplazado progresivamente por una perspectiva ecológica e integradora. Esta nueva visión considera que las respuestas de las plantas no dependen exclusivamente de un microorganismo, sino de las relaciones establecidas entre el hospedante, el suelo, las comunidades microbianas y las condiciones ambientales. En consecuencia, el microbioma vegetal se configura como una unidad funcional cuyo conocimiento resulta fundamental para comprender y aprovechar las interacciones beneficiosas presentes en los agroecosistemas.

Los hallazgos muestran que la promoción del crecimiento se produce mediante mecanismos fisiológicos, bioquímicos y ecológicos que pueden actuar de manera complementaria. La fijación biológica del nitrógeno, la movilización de fósforo, la producción de fitohormonas, la síntesis de sideróforos, la actividad ACC desaminasa, el antagonismo frente a fitopatógenos y la inducción de resistencia sistémica participan en la nutrición, el crecimiento, la protección y la tolerancia de las plantas frente al estrés. Sin embargo, la presencia de estas capacidades en una cepa no garantiza por sí sola una respuesta agronómica favorable, debido a que su expresión depende de la colonización de las raíces, la compatibilidad con el genotipo vegetal, las propiedades del suelo y la interacción con el microbioma nativo.

Entre los principales avances identificados se encuentran la incorporación de las ciencias ómicas, el análisis funcional del microbioma, el diseño racional de consorcios y el desarrollo de nuevas tecnologías de formulación. Estas innovaciones permiten caracterizar con mayor precisión las capacidades de las cepas, reconocer las relaciones establecidas entre las comunidades y diseñar inoculantes con funciones complementarias. Las tecnologías digitales y los modelos predictivos también ofrecen posibilidades para integrar información microbiológica, edáfica, climática y agronómica; no obstante, su utilización en este campo todavía se encuentra en desarrollo y requiere bases de datos estandarizadas, validación experimental y comprobación bajo condiciones productivas.

La revisión también permitió establecer que la inconsistencia de los resultados en campo continúa siendo una de las principales barreras para la adopción de estos productos. La competencia con las comunidades residentes, las variaciones del suelo y del clima, la pérdida de viabilidad durante el almacenamiento y la incompatibilidad con determinadas prácticas agrícolas pueden reducir la eficacia observada en condiciones controladas. A estas limitaciones se suman la falta de protocolos homogéneos, la escasez de evaluaciones de largo plazo, las diferencias entre los marcos regulatorios y la limitada transferencia del conocimiento hacia los productores. Por ello, las investigaciones futuras deberán fortalecer los ensayos multilocales, los controles de calidad, los análisis económicos y el seguimiento de las cepas después de su aplicación.

Los microorganismos nativos y los consorcios funcionales representan alternativas relevantes para desarrollar inoculantes adaptados a condiciones edafoclimáticas específicas. Sin embargo, su selección debe considerar la seguridad, estabilidad, compatibilidad y capacidad de mantener las funciones esperadas durante la producción y la aplicación. El objetivo no debe ser aumentar indiscriminadamente el número de cepas incluidas, sino identificar comunidades mínimas capaces de cooperar, colonizar eficientemente las plantas y producir respuestas reproducibles.

Esta orientación permitirá avanzar desde formulaciones empíricas hacia productos diseñados con fundamentos ecológicos, moleculares y agronómicos.

En conjunto, los microorganismos promotores del crecimiento vegetal constituyen herramientas biotecnológicas con un elevado potencial para complementar la nutrición, fortalecer la tolerancia al estrés y contribuir al manejo sostenible de los cultivos. No obstante, no deben presentarse como sustitutos universales de los fertilizantes, los productos fitosanitarios o las prácticas agronómicas convencionales. Su mayor aporte se obtiene cuando se integran con el manejo eficiente del agua y los nutrientes, la conservación del suelo, la diversificación productiva y la selección de variedades adaptadas. Desde esta perspectiva, su consolidación dependerá de la articulación entre investigación básica, innovación tecnológica, regulación, transferencia de conocimiento y participación del sector productivo, con el propósito de desarrollar soluciones seguras, accesibles y ajustadas a las necesidades de cada región.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Backer, R., Rokem, J. S., Ilangumaran, G., Lamont, J., Praslickova, D., Ricci, E., Subramanian, S., & Smith, D. L. (2018). Plant growth-promoting rhizobacteria: Context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1473. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473>
- Basu, A., Prasad, P., Das, S. N., Kalam, S., Sayyed, R. Z., Reddy, M. S., & El Enshasy, H. (2021). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) as green bioinoculants: Recent developments, constraints, and prospects. *Sustainability*, 13(3), 1140. <https://doi.org/10.3390/su13031140>
- Berendsen, R. L., Vismans, G., Yu, K., Song, Y., de Jonge, R., Burgman, W. P., Burmølle, M., Herschend, J., Bakker, P. A. H. M., & Pieterse, C. M. J. (2018). Disease-induced assemblage of a plant-beneficial bacterial consortium. *The ISME Journal*, 12(6), 1496–1507. <https://doi.org/10.1038/s41396-018-0093-1>
- Bulgarelli, D., Garrido-Oter, R., Münch, P. C., Weiman, A., Dröge, J., Pan, Y., McHardy, A. C., & Schulze-Lefert, P. (2015). Structure and function of the bacterial root microbiota in wild and domesticated barley. *Cell Host & Microbe*, 17(3), 392–403. <https://doi.org/10.1016/j.chom.2015.01.011>
- Busby, P. E., Soman, C., Wagner, M. R., Friesen, M. L., Kremer, J., Bennett, A., Morsy, M., Eisen, J. A., Leach, J. E., & Dangl, J. L. (2017). Research priorities for harnessing plant microbiomes in sustainable agriculture. *PLOS Biology*, 15(3), e2001793. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2001793>
- Chieb, M., & Gachomo, E. W. (2023). The role of plant growth-promoting rhizobacteria in plant drought stress responses. *BMC Plant Biology*, 23, 407. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04403-8>
- Compant, S., Samad, A., Faist, H., & Sessitsch, A. (2019). A review on the plant microbiome: Ecology, functions, and emerging trends in microbial application. *Journal of Advanced Research*, 19, 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2019.03.004>
- de Andrade, L. A., Santos, C. H. B., Frezarin, E. T., Sales, L. R., & Rigobelo, E. C. (2023). Plant growth-promoting rhizobacteria for sustainable agricultural production. *Microorganisms*, 11(4), 1088. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11041088>
- de Souza, R., Ambrosini, A., & Passaglia, L. M. P. (2015). Plant growth-promoting bacteria as inoculants in agricultural soils. *Genetics and Molecular Biology*, 38(4), 401–419. <https://doi.org/10.1590/S1415-475738420150053>
- Finkel, O. M., Castrillo, G., Herrera Paredes, S., Salas González, I., & Dangl, J. L. (2017). Understanding and exploiting plant beneficial microbes. *Current Opinion in Plant Biology*, 38, 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2017.04.018>
- González, H., & Fuentes, N. (2017). Mecanismo de acción de cinco microorganismos promotores de crecimiento vegetal. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 34(1), 17–31. <https://doi.org/10.22267/rcia.173401.60>

- Gouda, S., Kerry, R. G., Das, G., Paramithiotis, S., Shin, H.-S., & Patra, J. K. (2018). Revitalization of plant growth promoting rhizobacteria for sustainable development in agriculture. *Microbiological Research*, 206, 131–140. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2017.08.016>
- Liu, H., Brettell, L. E., Qiu, Z., & Singh, B. K. (2020). Microbiome-mediated stress resistance in plants. *Trends in Plant Science*, 25(8), 733–743. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2020.03.014>
- Mhlongo, M. I., Piater, L. A., Madala, N. E., Labuschagne, N., & Dubery, I. A. (2018). The chemistry of plant–microbe interactions in the rhizosphere and the potential for metabolomics to reveal signaling related to defense priming and induced systemic resistance. *Frontiers in Plant Science*, 9, 112. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00112>
- Olanrewaju, O. S., Glick, B. R., & Babalola, O. O. (2017). Mechanisms of action of plant growth promoting bacteria. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 33, 197. <https://doi.org/10.1007/s11274-017-2364-9>
- Pardo-Díaz, S., Mazo-Molina, D. C., & Rojas-Tapias, D. F. (2021). Bacterias promotoras del crecimiento vegetal: Filogenia, microbioma y perspectivas. En R. R. Bonilla Buitrago, L. E. de-Bashan, & R. O. Pedraza (Eds.), *Bacterias promotoras de crecimiento vegetal en sistemas de agricultura sostenible* (pp. 48–77). Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.analisis.7405019>
- Posada Castaño, A. M., Mejía Durango, D. P., Polanco Echeverry, D., & Cardona Arias, J. A. (2021). Rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal (PGPR): Una revisión sistemática 1990–2019. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 12(2), 161–178. <https://doi.org/10.22490/21456453.3874>
- Toju, H., Peay, K. G., Yamamichi, M., Narisawa, K., Hiruma, K., Naito, K., Fukuda, S., Ushio, M., Nakaoka, S., Onoda, Y., Yoshida, K., Schlaeppi, K., Bai, Y., Sugiura, R., Ichihashi, Y., Minamisawa, K., & Kiers, E. T. (2018). Core microbiomes for sustainable agroecosystems. *Nature Plants*, 4(5), 247–257. <https://doi.org/10.1038/s41477-018-0139-4>
- Trivedi, P., Leach, J. E., Tringe, S. G., Sa, T., & Singh, B. K. (2020). Plant–microbiome interactions: From community assembly to plant health. *Nature Reviews Microbiology*, 18(11), 607–621. <https://doi.org/10.1038/s41579-020-0412-1>
- Vejan, P., Abdullah, R., Khadiran, T., Ismail, S., & Boyce, A. N. (2016). Role of plant growth promoting rhizobacteria in agricultural sustainability—A review. *Molecules*, 21(5), 573. <https://doi.org/10.3390/molecules21050573>

## CONSIDERACIONES ÉTICAS

El presente estudio se llevó a cabo de conformidad con los principios éticos que rigen la investigación con participantes humanos. Antes de la recolección de los datos, el protocolo de investigación fue revisado y aprobado por el comité de ética institucional correspondiente. Todos los participantes fueron informados de manera clara sobre los objetivos del estudio, los procedimientos, las posibles implicaciones y el carácter voluntario de su participación, otorgando posteriormente su consentimiento informado. Durante todo el proceso de investigación se garantizó la confidencialidad de la información, el anonimato de los participantes y el uso exclusivo de los datos recopilados con fines científicos y académicos.

## DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL (IA)

Los autores declaran que la herramienta de inteligencia artificial generativa ChatGPT fue utilizada exclusivamente para la traducción al idioma inglés y la revisión lingüística del manuscrito. Esta herramienta no contribuyó a la concepción del estudio, el diseño de la investigación, la recolección de datos, el análisis estadístico, la interpretación de los resultados ni a la elaboración de las conclusiones. Los autores asumen la plena responsabilidad por la originalidad, exactitud, integridad y validez científica del contenido presentado en este manuscrito.

## FINANCIAMIENTO

La presente investigación no recibió subvenciones, becas ni apoyo financiero específico por parte de organismos públicos, entidades comerciales u organizaciones sin fines de lucro.

### **CONFLICTO DE INTERESES**

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses de carácter financiero, personal, profesional o institucional que hayan podido influir en el desarrollo, los resultados o la publicación de esta investigación.

### **CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA**

Nombres de autores e iniciales:

Luis Humberto Benavides Velasco (LHBV)

Christian Iván Montatixe Sánchez (CIMS)

Funciones desempeñadas por cada autor:

Conceptualización: (LHBV, CIMS)

Curación de datos: (LHBV)

Análisis formal: (LHBV, CIMS)

Adquisición de fondos: (CIMS)

Investigación: (LHBV, CIMS)

Metodología: (LHBV, CIMS)

Administración del proyecto: (CIMS)

Recursos: No aplica

Software: (LHBV)

Supervisión: (CIMS)

Validación: (LHBV, CIMS)

Visualización: (LHBV)

Redacción – Borrador original: (LHBV, CIMS)

Redacción – Revisión y edición: (LHBV, CIMS)