



# Biodisponibilidad del fósforo en la rizosfera de café y cultivos alimentarios por actividad bacteriana.

## Bioavailability of phosphorus in the coffee rhizosphere and food crops by bacterial activity.

Ana Teresa Mosquera-Espinosa<sup>1</sup> ; Anne Nuscua Otero<sup>1</sup>; Zeneth García Marulanda<sup>1</sup>  
Saray Garcés Sanmartín<sup>1</sup>; Ricardo Cárdenas Varón<sup>2</sup>; Pedro Pablo Rodas<sup>2</sup>; Javier Rivera<sup>2</sup>  
Gustavo Suárez Rendón<sup>2</sup>; Didier Tabora Gálvez<sup>2</sup>; Disney Rodríguez Parra<sup>2</sup>; Harold Suárez-Barón<sup>1</sup> 

Recibido para publicación: 03 de abril de 2024 - Aceptado para publicación: 15 de mayo de 2024

### RESUMEN

Este artículo trata sobre microorganismos solubilizadores de fosfato - MSF, haciendo énfasis en bacterias - BSF, y compila información basada en resultados de investigación, que plantea la disponibilidad de fósforo en la rizosfera de las plantas por actividad del microbioma asociado, tomando como caso de estudio BSF en cultivos de café a nivel mundial. Se buscaron artículos científicos publicados hasta diciembre del año 2023 sobre MSF y BSF, su aislamiento y su uso en fitonutrición y fitosanidad. Se consultaron las bases de datos de Scopus, ScienceDirect, Jstore, Web of Science, Wiley Online Library usando acceso con licencia de la Pontificia Universidad Javeriana (PUJ). También, los portales de búsqueda de libre acceso ResearchGate, Scielo, Mendeley y Google Scholar. Se evidencia que son pocos los artículos publicados en los últimos cinco años de manera específica sobre disponibilidad de P por actividad microbiana en café, por lo cual toma importancia este tipo de publicación. En relación al uso de BSF, existen avances biotecnológicos que permiten considerarlas como alternativas para la biofertilización fosfórica, sin embargo, falta investigación para el cultivo de café principalmente en Colombia, y sobre todo, es baja la implementación de esta tecnología por parte de agricultores y técnicos

**Palabras clave:** Biofertilizantes, bacterias, fitonutrición, microbioma en rizosfera, microorganismos solubilizadores de fosfatos.

<sup>1</sup>Departamento de Ciencias Naturales y Matemáticas, Facultad de Ingeniería y Ciencias, Pontificia Universidad Javeriana, Cali, Colombia.

<sup>2</sup>Instituto Mayor Campesino - IMCA

\*Autor para correspondencia: Ana Teresa Mosquera-Espinosa  
Email: [atmosquera@javerianacali.edu.co](mailto:atmosquera@javerianacali.edu.co)

### ABSTRACT

This article is related to phosphate-solubilizing microorganisms - MSF, emphasizing on bacteria - BSF, and compiles information based on research results, which proposes the availability of phosphorus in the plant rhizosphere due to the activity of the associated microbiome, taking as a case study BSF in coffee crops worldwide. Scientific articles published until December 2023 on MSF and BSF, their isolation and their use in phytonutrition and phytosanitary were searched. The databases of Scopus, ScienceDirect, Jstore, Web of Science, Wiley Online Library were consulted using access licensed by the Pontificia Universidad Javeriana (PUJ). Also, the free access search portals ResearchGate, Scielo, Mendeley and Google Scholar. It is evident that there are few articles published in the last five years specifically on P availability due to microbial activity in coffee, which is why this type of publication is important. In relation to the use of BSF, there are biotechnological advances that allow them to be considered as alternatives for phosphorus biofertilization; however, there is a lack of research for coffee cultivation mainly in Colombia, and above all, the implementation of this technology by farmers and technicians.

**Key words:** Biofertilizers, bacteria, phytonutrition, rhizosphere microbiome, phosphate-solubilizing microorganisms.

### Cómo citar

Mosquera-Espinosa, A.T., Nuscua Otero, A., García Marulanda, Z., Garcés Sanmartín, S., Cárdenas Varón, R., Rodas, P.P., Rivera, J., Suarez Rendon, G., Tabora Gálvez, D., Rodríguez Parra, D. y Suarez-Barón, H. Biodisponibilidad del fósforo en la rizosfera de café por la actividad microbiana *Temas Agrarios* 29(1): 22-39. <https://doi.org/10.21897/v2m77468>

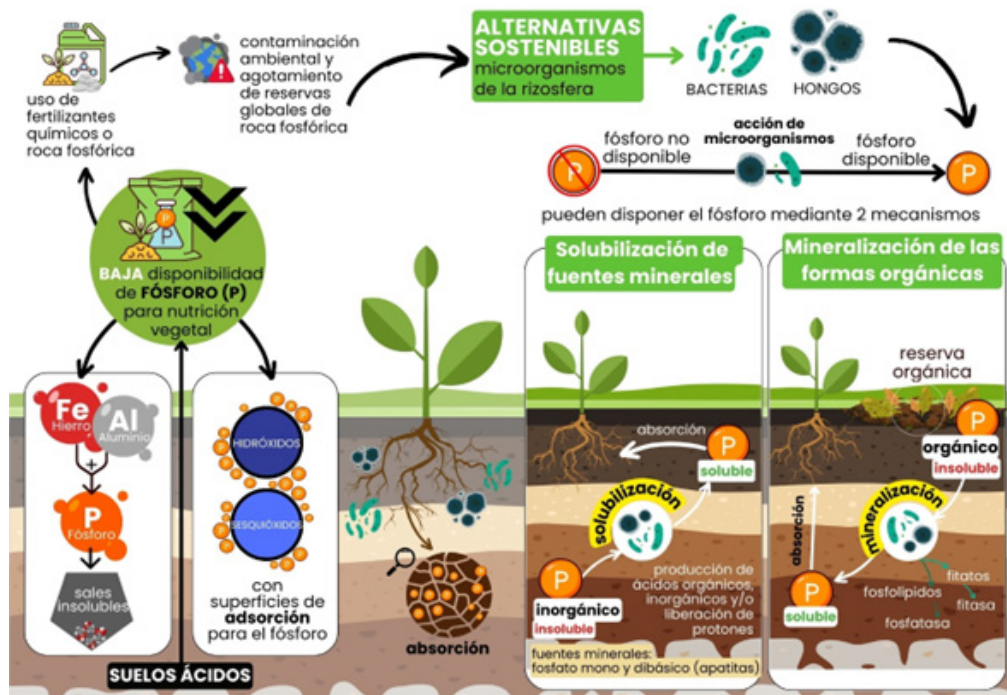


Temas Agrarios 2024. Este artículo se distribuye bajo los términos de la Licencia Creative Commons Attribution 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es>), que permite copiar, redistribuir, remezclar, transformar y crear a partir del material, de forma no comercial, dando crédito y licencia de forma adecuada a los autores de la obra.

## INTRODUCCIÓN

Los suelos ácidos en Colombia representan más del 80% del territorio, caracterizándose por la baja disponibilidad de fósforo (P) para la nutrición vegetal. Esta limitación se atribuye principalmente a dos factores: los elevados contenidos de hierro y aluminio que, al combinarse con el fósforo, precipitan en forma de sales insolubles; también, por la presencia de hidróxidos y sesquióxidos cuyas superficies actúan como sitios de adsorción para el fósforo. Estas condiciones generan un entorno no favorable para la absorción eficiente de fósforo por parte de las plantas, influyendo en la calidad y productividad de los cultivos (Figura 1). Lo anterior conlleva, a usar fertilizantes de síntesis química o roca fosfórica para suplir los requerimientos de la planta, generando contaminación ambiental y agotamiento de las reservas globales de la roca fosfórica. Por lo tanto, se buscan alternativas sostenibles para desarrollar agricultura en suelo ácidos,

reconociendo el alto potencial que poseen los microorganismos presentes en rizosfera (suelo que circunda las raíces y donde ocurre la mayor actividad microbiana) como promotores del crecimiento de las plantas, igualmente participando en los procesos biogeoquímicos de los nutrientes en el suelo, principalmente del P, haciéndolo disponible en sus diferentes formas químicas mediante procesos de solubilización de las fuentes minerales y/o mineralización de las formas orgánicas. Se ha encontrado que en la solubilización del P participan microorganismos que producen ácidos inorgánicos, ácidos orgánicos y/o liberan protones, que son metabolitos primarios producto de su metabolismo, para lo cual utilizan fuentes minerales como fosfato monobásico y dibásico (especialmente del tipo de las apatitas); en tanto, que la mineralización del P orgánico depende de la secreción de enzimas fosfatasas (principalmente fitasas) (Silva et al., 2023, Patiño-Torres y Sánchez de Prager 2012, Khan et al., 2020, Zaidi et al., 2009).



**Figura 1.** Ciclos biogeoquímicos de fósforo en suelos ácidos para su disponibilidad a nivel de rizosfera.

He y Wan (2021) indican, que para la transformación de P no disponible (como fosfato tricálcico ( $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ), fitato, fosfolípidos y ácidos nucleicos) a P disponible (como ácidos fosfóricos: fosfato di-hidrogenado ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) y fosfato de hidrogeno ( $\text{HPO}_4^{2-}$ )) para las plantas, deben participar microorganismos solubilizadores de fosfatos. En estos procesos, las bacterias son altamente eficientes solubilizando compuestos inorgánicos de P y mineralizan el P orgánico. Los fosfolípidos y los fitatos son compuestos de las reservas orgánicas del P en el suelo, que pueden ser hidrolizados por la fosfatasa y fitasa, respectivamente. Igualmente, las reservas inorgánicas de P pueden ser solubilizados por ácidos orgánicos moleculares pequeños, como ácido glucónico y ácido cítrico, en donde participa la deshidrogenasa para su conformación.

## DESARROLLO DEL TEMA

### 1. Microorganismos rizosfericos de diferentes cultivos alimentarios para la biodisponibilidad de P en el suelo

Se desconoce si la aplicación de BSF, puede facilitar la producción de P tanto inorgánico como orgánico y mejorar la función de las BSF ya existentes. He y Wan (2021), trabajaron en soya e integraron metodologías para su aislamiento, identificación y funcionalidad: utilizaron recuento de colonias en placas usando medio PVK con fosfato tricálcico, PCR cuantitativa, secuenciación Illumina MiSeq y múltiples análisis ecológicos. Los resultados mostraron que la inoculación de BSF, como *Acinetobacter pittii* gp-1, promueve significativamente el crecimiento de la soya expresada en características vegetativas como altura de la planta y P en raíz; igualmente, aumento de la

actividad de la fosfatasa (4,20–9,72  $\mu\text{g/g/h}$ ) y fitasa (0,69–1,53  $\mu\text{mol/g/día}$ ), así como el contenido de ácido indolacético (5,80–40,35  $\mu\text{g/g/h}$  de IAA). Además, al inocular la cepa *A. pittii* gp-1 aumentó significativamente la abundancia de sustancias relacionadas con genes que participan del ciclo del P tanto orgánico como inorgánico (es decir, *phoD*, *bpp*, *gcd* y *pstS*), los cuales pueden servir como biomarcadores para comprender la transformación del P del suelo rizosferico. La aplicación de *A. pittii* gp-1 podría aumentar la función representada por las enzimas relacionadas con el ciclo del P (p. ej., fosfotransferasa) en la comunidad bacteriana de la rizosfera basada en perfiles funcionales.

Para Fitriatin *et al.* (2020) la disponibilidad de fósforo es la principal limitación para crecimiento de plantas en suelos ácidos, debido su alta fijación por Hierro (Fe) y aluminio (Al). En este estudio se evaluaron cuatro aislados de BSF obtenidos de suelo ácido para solubilizar fosfato inorgánico no disponible, la producción de fosfatasa, ácido málico y ácido indolacético (IAA), así como aumentar la altura de plántulas de maíz (*Zea mays*) al inocular BSF. En un diseño experimental de bloques completos al azar con cinco repeticiones, los aislados RR 1 y SPR 4 tuvieron solubilización relativamente alta, además, todos los aislados de BSF presentaron la capacidad de disolver P y producir fosfatasa e IAA. El rendimiento de las plántulas inoculadas con BSF fue mejor visualmente y la longitud de la raíz aumentó en un rango de 66,7% a 74,5% en comparación con el control. Se debe hacer identificación molecular hasta especie de estos aislamientos, para fabricar biofertilizantes que aumenten la productividad del maíz en agroecosistemas con suelos ácidos.

En campo, la diversidad de especies de *Acinetobacter* se evaluó en la rizosfera de trigo de agroecosistemas sembrados con diferentes variedades. En tanto, *in vitro* la diversidad se evaluó a partir del gen 16S rRNA utilizando cebadores específicos, reportando a *Ac. calcoacético*, *Ac. baumannii*, *Ac. lwoffii*, *Ac. baylyi* y *Acinetobacter* sp. De la misma muestra utilizando medios selectivos, fueron aisladas las mismas especies excepto *Ac. baylyi*. La caracterización *in vitro* de aislados de *Acinetobacter* reveló que la mayoría de estas bacterias exhibieron rasgos que promueven el crecimiento de las plantas, como también fijación de nitrógeno, producción de sideroforos y solubilización de minerales. Estas cepas de *Acinetobacter* presentan potencial para el desarrollo de un biofertilizante que mejore el crecimiento y salud del cultivo de trigo (Sachdeva *et al.*, 2010).

En India, Kaur y Reddy (2014) evaluaron el efecto de BSF en cultivos de maíz y trigo de tres regiones agroclimáticas distintas (Región central plana, ondulada de submontaña y ondulada de submontaña). Las bacterias evaluadas fueron *Pantoea cypridedii* y *Pseudomonas plecoglossicida*, ambas aisladas de la rizosfera de *Stevia* en cultivo (*Stevia rebaudiana*) que no había recibido fertilización de síntesis química de fósforo. Las BSF fueron inoculadas durante dos años en los cultivos para evaluar sus efectos sobre el crecimiento de las plantas; los resultados arrojaron aumento en la producción de granos, mejor fertilidad del suelo y mayor absorción de fósforo en las semillas, los brotes y las raíces de ambos cultivos. Además, se determinó que los efectos de las BSF se potenciaban cuando se aplicaban junto con la fertilización de síntesis química de fósforo y estos eran mayores en la región agroclimática ondulada de submontaña en comparación con las otras dos regiones.

Lara *et al.* (2011), caracterizaron y evaluaron microorganismos nativos con capacidad solubilizadora de fosfato en Córdoba – Colombia. Se aislaron 61 cepas de BSF a partir de suelo rizosférico de guayaba agria (*Psidium araca*) utilizando medio cultivo agar Sundara y Sinha (1963) modificado (SMRS1, por sus siglas en inglés). Dentro de la población se registraron bacterias mayormente bacilos Gram negativos (93%), bacilos Gram positivos (5%) y cocos Gram positivos (2%); la clasificación taxonómica señaló los géneros *Bacillus*, *Micrococcus*, *Mycobacterium* y *Pseudomonas*. También se determinó que las especies con mayor capacidad solubilizadora de fosfato fueron *Burkholderia cepacia*, *Pantoea* sp., *Pseudomonas putida*, *P. luteola*, *Aeromona hydrophilia*, *Enterobacter sakasaki* y *E. cloacae*. Se evaluó el efecto de la especie *Burkholderia cepacia* como biofertilizante sobre el crecimiento de plantas de rábano (*Raphanus sativus*). Los biofertilizantes fueron aplicados en las semillas mediante imbibición por 60 minutos y posteriormente fueron sembradas. Pasados 8 días se realizaron mediciones de longitud la planta (cm), longitud de raíz (cm) y peso de planta (mg) realizando comparaciones estadísticas entre tratamientos. Se comprobó que *B. cepacia* en concentración de 108 ufc / mL, tiene efecto positivo sobre el crecimiento de las plantas de rábano *in vitro*, cuyos resultados pueden mejorar en campo.

Ortiz-Texon *et al.* (2016) evaluaron en cinco variedades de fresa, las especies *Pseudomonas polymyxa* y *Bacillus pumilus* como BSF. Aquí se discute, la poca efectividad de las BSF posiblemente por la diferencia del pH entre el suelo de donde fueron obtenidas (casi neutro) y el suelo en donde fueron aplicadas (pH 8.8); además, de otros factores como la competencia con microorganismos nativos y las características

fisicoquímicas del suelo utilizado, lo cual pudo afectar su desempeño en la solubilización de fosfatos. Igualmente, Arias (2019) evaluó *in vitro* la actividad como BSF de *Bacillus pumilus* en diferentes medios de cultivo con distinta disponibilidad de fósforo orgánico, buscando alternativas de fertilización artificial de fósforo. Esta especie produjo todas las enzimas solubilizadoras de fosfato, teniendo un alto potencial de uso en la agricultura al aumentar la fertilidad del suelo y minimizar la aplicación de fertilizantes de síntesis química.

De la rizosfera de uchuva (*Physalis peruviana* L.) en cultivo en el Dpto. de Boyacá - Colombia, se aislaron 12 cepas de BSF pertenecientes a los géneros *Pseudomonas* y *Bacillus* para evaluarlas sobre el desarrollo de semillas del mismo hospedero, buscando alternativas para disponer fósforo en suelos tropicales sin recurrir a fertilizantes químicos. Se identificaron cuatro cepas que promovieron el crecimiento de la planta, tres del género *Pseudomonas* y otra de *Bacillus*. Los mejores resultados se obtuvieron con una cepa de *Pseudomonas*, al permitir reducir la dosis de fertilización fosfórica en un 50%, demostrando ser una posible alternativa para el crecimiento del cultivo. Igualmente, se evidenció la influencia que tienen los factores ambientales y otros compuestos sobre la solubilización de fósforo en la rizosfera, por lo que es necesario considerar su composición para la implementación de estos microorganismos (Sánchez-López *et al.*, 2014).

Beltrán-Pineda (2014) tomó muestras de rizósfera de papa (*Solanum tuberosum*) en el municipio de Ventaquemada, Boyacá - Colombia, y aisló 21 cepas de BSF utilizando medio de cultivo NBRIP (National Botanical Research Institute Phosphate growth medium). La especie *Streptococcus porcinus* fue más eficiente solubilizando,

basándose en el diámetro de la colonia (2.3 mm) y del halo de solubilización (4.7 mm). Por otro lado, la especie *Enterobacter cloacae* presentó mayor capacidad de solubilización en medio de cultivo líquido, aunque no presentó halo de solubilización cuando fue evaluada en medio de cultivo sólido. Es importante señalar, que la mayoría de las BSF aisladas acidularon los medios de cultivo inoculados en relación con el pH inicial.

Poco se conoce acerca de la diversidad de BSF en suelos tipo Oxisoles en Colombia; por ello Moreno-Conn *et al.* (2021) tomaron muestras de estos en la altillanura del Dpto. del Meta, para aislar e identificar BSF de la rizósfera de maíz (*Zea mays*), soya (*Glycine max*), arroz (*Oryza sativa*) y pastura (*Brachiara* sp.). Se aislaron 42 cepas bacterianas, 14 fueron seleccionadas con base al índice de solubilización de fosfato (tres de soya, cuatro de maíz, cinco de arroz y dos de la pastura). Dos de las cepas, *Burkholderia ubonensis* y *B. cepacia*, mostraron mayor capacidad para solubilizar fosfatos, ambas se evaluaron en arroz como biofertilizante. Las plantas fueron inoculadas con tratamientos que combinaron BSF (de manera conjunta e individual) a distintas concentraciones y la fertilización de síntesis química con P. Estadísticamente, ambas especies tuvieron la capacidad de incrementar la biomasa seca foliar y radical en los cultivos a pesar de encontrarse en un suelo con poca disponibilidad de fósforo, por lo que podrían ser utilizadas como biofertilizantes.

En el caso de Patiño-Torres y Sánchez de Prager (2012), estudiaron chontaduro o pejiyabe (*Bactris gasipaes Kunth*) que es una palma nativa de la selva húmeda del pacífico, adaptada a condiciones de alta acidez y deficiencia de nutrientes, especialmente P, características propias de suelos esta región. Las bacterias aisladas

y purificadas en medio libre de fuentes de fósforo orgánico e inorgánico solubles, se identificaron usando secuencias del gen 16S rRNA y la técnica BOX-PCR. Se obtuvieron 22 BSF, con capacidad temporal de solubilización de fosfatos, y siete fueron estables para dicha característica. El género bacteriano con mayor frecuencia de aparición fue *Burkholderia*, incluyendo tres cepas de *B. ambifaria* y dos de *Burkholderia* sp. 383; también se aisló una cepa de *Pseudomonas putida*. Estas bacterias son registradas en literatura como eficientes PGPR, con actividades benéficas relacionadas con control de fitopatógenos, producción de sustancias hormonales en plantas, antibiótica, diazotrófica y enzimática.

Por otro lado, la solubilización de fosfato por acción de los microorganismos como los hongos resulta importante para aumentar la disponibilidad de fósforo en los cultivos, sin embargo, es poca la investigación que se desarrolla para este reino. Coutinho *et al.* (2012), evaluaron el potencial solubilizador de *Aspergillus* y *Penicillium* aislados de *Vitis vinifera* en Brasil. Se evaluó su actividad sobre fosfato monocálcico ( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ ) y fosfato de amonio ( $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$ ), encontrando que aproximadamente un 90% de las cepas solubilizaron ambos compuestos, con mayor potencial el día siete de incubación proponiéndolos como biofertilizantes en los suelos de donde fueron aislados.

## 2. Microorganismos rizosféricos de café y su interacción con factores ambientales para la biodisponibilidad del P en el suelo.

En Anolaima (Cundinamarca – Colombia, 2015), se evaluó el efecto del manejo del agroecosistema de café (ecológico y convencional) sobre los grupos funcionales de microorganismos del suelo, con diferentes indicadores de resiliencia con relación a la

variabilidad climática (época de lluvia en abril y seca en junio). Los resultados mostraron diferencias significativas en cuanto a la disponibilidad de carbono orgánico, nitrógeno y boro en el suelo, las fincas con manejo ecológico presentaron contenidos considerablemente mayores en comparación con las fincas con manejo convencional. En el análisis del manejo, se categorizaron las bacterias y hongos celulolíticos según su abundancia, no obstante, no se observaron diferencias estadísticas en términos de la diversidad de microorganismos solubilizadores de fosfato o fijadores de nitrógeno. En relación con las condiciones climáticas, se encontró que las épocas de muestreo influyeron en la diversidad de grupos funcionales microbianos. Además, se observó que prescindir de la fertilización química, pesticidas y fertilizantes externos generó una relación positiva entre la diversidad microbiana de las fincas ecológicas y los parámetros de resiliencia ante la variabilidad climática. Asimismo, la intervención y gestión de los agricultores fue importante para los resultados obtenidos (Fernández Garzón *et al.*, 2020).

En San José de Pare (Boyacá - Colombia), Gómez-Pinzón *et al.* (2022) evaluaron en cafetales bajo diferentes coberturas (plátano, mandarina y una mezcla de cítricos), cambios de la calidad del suelo asociados a la implementación de técnicas de agricultura ecológica (AE). Las muestras de suelo se recolectaron cada dos meses durante diez meses; las variables consideradas fueron propiedades fisicoquímicas, abundancia de grupos funcionales de microorganismos (solubilizadores de fosfatos, celulolíticos y fijadores de nitrógeno) y actividades enzimáticas (fosfatasa ácida y alcalina,  $\beta$ -glucosidasa, ureasa, y proteasa). Los resultados mostraron modificaciones de los indicadores de calidad del suelo como consecuencia de la aplicación de

técnicas de AE en los meses ocho y diez, encontrando un aumento significativo en el contenido de fósforo, carbono, bacterias y hongos solubilizadores de fosfato, como también hongos celulolíticos. En contraste, no se observaron cambios significativamente relevantes en la actividad enzimática, excepto en la  $\beta$ -glucosidasa.

Según Yuliatin *et al.* (2019), las propiedades fisicoquímicas del suelo y los parámetros ambientales influyen en la densidad de las Rizobacterias Promotoras del Crecimiento de las Plantas (PGPR) en suelos de café arábica (*Coffea arabica* L.) y robusta (*Coffea canephora*). De estos dos materiales de café, se aislaron PGPR de la rizósfera implementando el método de dilución en serie. El número de bacterias productoras de ácido indolacético (IAA), solubilizadoras de fosfato y fijadoras de nitrógeno se determinó mediante agar tripticasa de soya (Tryptic Soy Agar – TSA, por sus siglas en inglés), medio Pikovskaya (PVK) y medio de agar con azul de bromotimol libre de nitrógeno. La densidad de bacterias productoras de IAA y bacterias fijadoras de nitrógeno, fue más alta en *Coffea arabica* que en *Coffea canephora* ( $1.5 \times 10^5$  ufc/g y  $2 \times 10^4$  ufc/g, respectivamente; ufc es la sigla para designar unidades formadoras de colonias); en relación a la densidad de bacterias solubilizadoras de fosfatos ocurrió lo contrario, *Coffea canephora* ( $1.7 \times 10^5$  ufc/g) fue mayor que *Coffea arabica*. Los parámetros ambientales donde se desarrollaron ambas especies de café fueron significativamente influenciados por la latitud, intensidad de luz y altura del árbol ( $p < 0.05$ ); la relación carbono/nitrógeno (C/N) fue significativamente mayor en el suelo de *Coffea arabica* 11,33 % que en suelo de *Coffea canephora* 8,66 %. La correlación más alta ( $> 0.86$ ) fue entre bacterias fijadoras de nitrógeno y bacterias productoras de IAA. Se sugiere, que los resultados pueden atribuirse a la densidad de las PGPR que varían

debido a algunas propiedades del suelo, factores ambientales y características específicas de la planta.

Posada *et al.* (2012) que propusieron estudiar en campo la intensidad de manejo y variables edáficas (incluida la estabilidad de agregados) sobre las comunidades de hongos microscópicos filamentosos (HMF) solubilizadores de fosfato de hierro (HSF-Fe) y hongos solubilizadores tanto de fosfato de hierro como de calcio (HSF-(Fe+Ca)). Se analizaron 40 muestras edáficas de ocho plantaciones de café en Colombia y México, con diferentes intensidades de manejo (IMPC) y diferencias en sus variables edáficas; de estas, se aislaron y evaluaron las comunidades de HMF, HSF-Fe y HSF-(Fe+Ca) durante 2008-2009. Se encontró, que el carbono orgánico se relacionó positivamente con la riqueza y abundancia de HMF ( $\lambda > 0.58$ ) y fue variable con HSF-Fe y HSF-(Fe + Ca); las relaciones del fósforo disponible, pH y las fracciones de macro-agregados fueron altamente variables; mientras que, la IMPC se relacionó negativamente con HSF-Fe ( $\lambda \leq -0.21$ ) en cafetales colombianos. También, los resultados sugieren que los HSF en suelos ácidos como los estudiados, son mejor opción que utilizar bacterias, por su capacidad de desarrollarse en acidez. La interacción de los HSF con los hongos micorrízicos arbusculares (HMA), se plantea en diferentes estudios como sinergias. La intensidad del manejo agrícola no afectó, como tampoco la especie y el número de aislamientos obtenidos de los HMF en ninguna de las regiones estudiadas. No se identificaron patrones claros en la relación entre la intensidad de manejo de los cafetales y HSF, como también, la estabilidad de los agregados del suelo y el índice de abundancia normalizado.

### 3. Evaluación *in vitro* de microorganismos rizosféricos en café para la biodisponibilidad de P en el suelo.

En los suelos tipo Andisoles, la disponibilidad de P es muy baja y oscila entre 1,17 y 2,54 partes por millón (ppm). Las plantas de café requieren nutrientes ricos en P para su crecimiento y la disponibilidad de P en rizosfera, lo cual no ocurre en suelos con alto contenido de cenizas volcánicas. Por lo anterior, en este estudio se evaluó el uso de microorganismos solubilizadores de fosfato en conjunto con la cascara de café compostada. En invernadero se realizó un Diseño Factorial de Bloques Aleatorizados, con 3 repeticiones. Los factores a evaluar fueron **Factor I:** M0 = sin aplicación de microorganismos solubilizadores de fosfato, M1 = 6 g *Burkholderia cepacia*, M2 = 6 g *Talaromyces pinophilus*, M3 = 3 g *Burkholderia cepacia* + 3 g *Talaromyces pinophilus*. **Factor II:** cáscara de café compostada, K0 = sin cáscara de café compostada, K1 = 75 g, K2 = 150 g, K3 = 225 g y K4 = 300 g. **Factor III:** la interacción del Factor I y Factor II. Los parámetros observados fueron: altura de planta, contenido de P en la planta usando espectrofotometría, contenido de nitrógeno (N) de la planta usando el método de titulación Kjeldahl, contenido de potasio (K) de la planta usando fometría de llama, y peso seco de la planta expresado en gramos (g). Los resultados mostraron que, las interacciones de los MSF y la cáscara del café compostada pueden afectar positivamente la planta de café al incrementar su altura hasta en un 35 %, aumentar el peso seco hasta en un 32,17 % como también el contenido de nutrientes hasta en un 53 %. El mejor tratamiento para incrementar la altura de plantas fue *T. pinophilus* combinado con 50g/planta de cáscara de café compostada (Sembiring *et al.*, 2020). Resultados similares fueron obtenidos por Cisneros *et al.* (2016)

a partir de cultivos de café (*Coffea arabica* var. caturra) en Palmira (Valle del Cauca-Colombia), donde aislaron e identificaron dos cepas de BSF: *Kocuria* sp. y *Bacillus subtilis*; igualmente, dos cepas de HSF: *Sagenomella diversispora* y *Penicillium ochrochloron*.

En Etiopía, en invernadero se evaluó sobre el desarrollo plántulas la eficacia de la solubilización de fosfato por BSF y HSF de la rizosfera de café arábico (*Coffea arabica* L.) en cultivo. Se escogieron tres aislamientos bacterianos (RCHVCB1, RScB1.19 y RMaB2.11) y tres aislamientos fúngicos (RSCF1.19, RLVCF2 y RCHVCF2) para evaluarlos en un diseño experimental completamente al azar (DCA) con tres repeticiones. Al adicionar fósforo inorgánico al suelo e inocular BSF y HSF nativos, aumentaron significativamente el crecimiento en plántulas de café al mejorar la absorción de nutrientes (N, P y K). Uno de los hongos aislados (RSCF1.19) indujo mayor crecimiento de plántulas (altura de planta, longitud de la raíz, circunferencia del tallo, número de hojas, área foliar, peso seco y fresco), además, los inóculos bacterianos mostraron mayor potencial para ser utilizados como biofertilizantes en producción de café. La inoculación de este hongo junto con los aislados de *Pseudomonas* (RCHVCB1+RSCF1.19), mejoraron parámetros de crecimiento estadísticamente significativos en comparación con el control. También, este hongo inhibió ligeramente el crecimiento de *Fusarium xylarioides* fitopatógeno. Finalmente, RSCF1.19 y RCHVCB1 tuvieron mayor potencial como biofertilizantes, después de realizarse pruebas de campo mostrando reducción en el costo por fertilizantes químicos (Abawari *et al.*, 2021).

Acosta-Suárez *et al.* (2019), estudiaron el potencial de HSF de los géneros *Aspergillus*

y *Penicillium*, específicamente como promotores de crecimiento en plantas de café en invernadero (*Coffea canephora* var. caturra roja). Ambas cepas mostraron tener capacidad solubilizadora de fósforo; aunque los dos hongos promovieron la altura y la masa de los cultivos, el género *Aspergillus* demostró ser mejor candidato como biofertilizante, sin desconocer el potencial de *Penicillium* para promover el crecimiento en café.

En el caso de González-Osorio *et al.* (2020), estudiaron tres suelos de diferentes regiones de Colombia con plantaciones de café (Typic Udivitrand (QU), Pachic Fulvudand (CH) y Typic Melanudand (Ti), con alto contenido de cenizas volcánicas ya que la biodisponibilidad del P se restringe por su alta tasa de fijación. Se obtuvieron 55 aislamientos HSF con índices de solubilización de P entre 16 y  $106 \times 10^{-6}$  kg / dm<sup>3</sup> utilizando roca fosfórica como fuente de P. Los resultados sugieren que la solubilización de P por actividad microbiana, no sólo se asoció a la disminución del pH del medio de cultivo, sino a la producción de ácidos orgánicos por parte de HSF de forma eficaz, igualmente se asoció con un menor crecimiento de colonias fúngicas, probablemente debido a un drenaje de carbono/energía. La disminución del pH del medio no explica satisfactoriamente el potencial y eficacia del HSF para ser seleccionados en la solubilización de roca fosfórica. Por tanto, en condiciones *in vitro* es crucial considerar factores adicionales como la concentración y diversidad de ácidos orgánicos generados por los microorganismos. La capacidad de fijación de P del suelo parece estar asociada al contenido de materia orgánica y el grado de humificación, que influye en la abundancia relativa de HSF. En suelos cultivados con café en Colombia, se encontraron los géneros *Phlebia* y *Penicillium*, el primero

reportado por primera vez como HSF en este agroecosistema.

Los efectos de la interacción entre hongos micorrízicos arbusculares y hongos solubilizadores de fosfatos fueron estudiados por Perea- Rojas *et al.* (2019), al evaluar la disponibilidad de fósforo, actividad de la fosfatasa ácida y el crecimiento y desarrollo de plantas de café (*Coffea arabica* L.) var. garnica. Bajo condiciones controladas, se realizó un diseño factorial aleatorizado con dos factores. Las plantas de café fueron inoculadas con un consorcio de hongos micorrízicos arbusculares (CHMA), como también, con un consorcio de dos cepas de hongos solubilizadores de fosfatos (CHSF) (*Aspergillus niger* (An) y *Penicillium brevicompactum* (Pb)), las posibles combinaciones de estos últimos hongos, y un control no inoculado. Después de ocho meses, los resultados demostraron la efectividad de inoculaciones de hongos micorrízicos y hongos solubilizadores de fosfatos en el aumento del fósforo disponible en el suelo. Los mayores valores se obtuvieron en el CHSF con el tratamiento a 3,8 mg/kg. La concentración total foliar de fósforo en las plantas fue mayor en su orden para CHMA, An + CHMA, CHSF + CHMA, Pb + CHMA y CHSF comparado con el tratamiento de control. El crecimiento de las plantas también fue favorecido por los tratamientos en consorcio (CHSP y CHMA). La actividad de la fosfatasa ácida en la rizosfera aumentó significativamente para el tratamiento con CHSF y también aumentó en las raíces de las plantas en los tratamientos An, An + CHMA y CHSF + CHMA. Dado la importancia de los grupos de hongos para los procesos de transformación y absorción de fósforo en plantas de café, es importante continuar la búsqueda de cepas nativas de hongos con alto potencial para su uso como biofertilizantes. En general el CHMA y CHSF, ya sea en consorcios independientes

o co-inoculados, pueden inducir sinergias y favorecer las plantas de café para aumentar el crecimiento y absorción de fósforo. Por lo tanto, el uso de tales consorcios puede resultar prometedores para el desarrollo orgánico del cultivo de café.

Cisneros *et al.* (2017), identificaron posibles BSF en un Andisol en Colombia con café caturra (*Coffea arabica*). Los microorganismos se aislaron a partir del suelo de tres agroecosistemas de diferentes regiones: relicto de bosque secundario (RBS), café con sombra de guamo (CCS) y café sin sombra (CSS). En total fueron 26 morfotipos, resaltando que en los agroecosistemas CCS y CSS se encontró un mayor número de poblaciones bacterianas, pero el RBS mostró mayor frecuencia relativa de BSF. Esto último podría deberse a la adaptación de los microorganismos a suelos con bajos contenidos de fósforo, así un bajo contenido de fósforo en el suelo podría ser indicador de una alta variedad de BSF. Entre las BSF obtenidas, se realizó la identificación de las dos cepas que demostraron tener la mayor capacidad de solubilización: *Kocuria* sp. y *Bacillus subtilis*.

En Perú a partir de la rizosfera de café (*Coffea americana*), se obtuvieron 85 aislamientos, de los cuáles 36 presentaron actividad para solubilizar fosfatos en los medios SMRS1, NBRIP y Pikovskaya. De estos se seleccionaron 15 a partir de los mayores Índices de Solubilización (IS), teniendo como componente principal fosfato tricálcico ( $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ) y fosfato monocálcico ( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ ), presentando valores entre 0.1 hasta valores de 1.33. Sin embargo, la mejor cepa nativa de BSF corresponde a la rotulada como WH'B con un IS de 7.0, 0.60 y 1.70 en los medios SMRS1, Pikovskaya y NBRIP respectivamente. Los resultados mostraron que los aislamientos

obtenidos a partir de suelos cafetaleros, responden mejor en relación con los de otros territorios, no solo por su capacidad de solubilización sino por la promoción del crecimiento de las plantas (Soto y Alcarraz, 2022).

Diferentes investigaciones demuestran que son muchas las especies bacterianas y fungosas con capacidad solubilizadora de fosfatos para disponer el P a nivel de rizosfera. No obstante, son las bacterias quienes lo hace de manera de manera consistente, aunque hayan pasado varios eventos de réplicas in vitro conserva la capacidad de solubilizar, no así los hongos. Es por ello que las investigaciones ponen el foco en este grupo de microorganismos (Wakelin *et al.*, 2004).

#### **4. Evaluación *in vitro* de bacterias rizosféricas en café para la biodisponibilidad de P en el suelo.**

Muleta *et al.* (2013) estudiaron rizobacterias solubilizadoras de fosfato (RSF) asociadas al cultivo de café (*Coffea arabica* L.) en bosques naturales al suroeste de Etiopía, utilizando medio agar PVK. Por colorimetría se estimó cuantitativamente el fosfato movilizado en diferentes medios líquidos usando dos fuentes del compuesto y se detectaron ácidos orgánicos empleando Cromatografía Líquida de Alta Eficiencia (HPLC, por su sigla en inglés). Se aislaron 395 rizobacterias a partir de la solubilización de P, de las cuales más del 72 % principalmente *Pseudomonas* spp. que formaron halos de solubilización. Dos aislamientos de Erwinia y un aislamiento de *Pseudomonas chlororaphis* presentaron los mayores índices de solubilización (IS), además de trabajar fuertemente la hidroxiapatita en medio líquido. Todos los aislados bacterianos solubilizaron hidroxiapatita (HAP)/fosfato tricálcico (TCP) cuando el

pH del medio disminuyó. Los análisis de HPLC de los sobrenadantes de cultivos confirmaron la presencia de ácidos orgánicos, dominando el ácido 2-cetoglucónico. La producción de ácidos orgánicos por estas RSF podría considerarse el principal mecanismo involucrado en la solubilización de HAP/TCP. Las RSF Gram negativas fueron más activas para reducir el pH y liberar P en el medio de crecimiento que los aislados Gram positivos; posiblemente por la liberación de ácidos orgánicos, principalmente ácido 2-cetoglucónico y ácido glucónico, que influyen directamente en el descenso de los valores del pH, que posiblemente es el mecanismo utilizado por estas rizobacterias para movilizar fuentes de P insoluble. También se destaca, la capacidad solubilizadora de P de los dos aislados de *Erwinia* sp. (AUEY28 y AUEY29), actividad que se mantuvo durante el período de incubación por la secreción de ácidos orgánicos, postulándolos como posibles candidatos a biofertilizante para suelos ácidos. En India, Satyaprakash *et al.* (2017), al obtener resultados similares concluyen que identificar RSF permite minimizar el uso de fertilizantes químicos mejorando los rendimientos del cultivo y contribuyendo a disminuir la contaminación de aguas y degradación del suelo.

Waday *et al.* (2022), aislaron en PVK (con fosfato tricálcico y sustancias insolubles) y caracterizaron (por morfología y bioquímica) BSF de la rizosfera de café al suroeste de Etiopía. Se estudió y optimizó la influencia de cuatro variables independientes (temperatura de incubación, tiempo de incubación, pH y densidad de inóculo) utilizando el acoplamiento de redes neuronales artificiales (ANN) y metodología de superficie de respuesta (RSM), así como, la producción de ácido indolacético (IAA). Seis BSF fueron aisladas: *Pseudomonas* spp., *Bacillus* spp. y *Enterobacter* spp. fueron

eficientes; *Pseudomonas* spp. mostro alto índice de solubilización de fosfato (PSI 5.092), seguidas de *Bacillus* spp. (PSI 4.65) y *Enterobacter* spp. (PSI 4.45). En relación al efecto de las variables ya mencionadas sobre la solubilización de fosfato y la producción de IAA por especies, *Pseudomonas* spp. arrojó los mayores valores, por ello se seleccionó para el modelamiento. Ambos modelos funcionaron bien, pero las ANN debidamente entrenadas tienen capacidad de modelado más confiable. Igualmente se encontró, que las condiciones óptimas eran temperatura de incubación de 37,5 °C, un tiempo de incubación de 9 días, un pH de 7,2 y una densidad de inóculo de 1,89 densidad óptica (DO). En estas condiciones, el modelo predijo solubilización de fosfato de 260,69 µg/ml y producción de IAA de 80,00 µg/ml con un valor de probabilidad de 0,947. En general, se espera que el aislamiento de *Pseudomonas* spp. disponer fósforo para la fitonutrición, no obstante, se requiere más trabajo experimental en campo para utilizar esta cepa como biofertilizante y reemplazar fertilizantes sintéticos.

De diferentes zonas de Indonesia (Citeureup, Java Occidental, Bogor, Nusa Tenggara Occidental y Nusa Tenggara Oriental), Hazra y Pratiwi (2013) recolectaron muestras de suelo rizosférico de café obteniendo 29 aislamientos de BSF, seleccionando tres para realizar ensayos in vitro (P 3.5 - Nusa Tenggara Oriental, P 6.2 - Nusa Tenggara Occidental y P 10.1 - Citeureup, Java Occidental). El aislado P 10.1 mostró mejores resultados por: 1) su capacidad de solubilizar P con el índice de solubilización más alto (1.80); 2) presentó el valor más alto de enzima fosfatasa (120.40 mg / kg<sup>-1</sup>) y 3) y tuvo la mayor disminución de pH en seis días de evaluación. Los aislamientos P 3.5 y P 10.1 fueron bacterias Gram negativas y el aislamiento P 6.2 fue bacteria Gram

negativa. Los resultados del análisis de las secuencias del gen 16S rRNA con 1300 pares de bases (pb), mostraron que los aislados P 3.5 y P 10.1 presentaron un 98% de similitud con *Gluconacetobacter* sp. (cepa Rg1-MS-CO) y el aislado P 6.2 mostro un 97% de similitud con *Enterobacter* sp. (cepas pp9c.). *Gluconacetobacter* sp. en otros estudios se reporta como fijadora de nitrógeno y *Enterobacter* sp. habita el suelo como descomponedor de materia orgánica, además, en humanos hace parte del tracto digestivo o como patógeno del sistema urinario y respiratorio.

A partir de rizosfera de plantaciones de café ubicadas en Andungsari (distrito de Bondowoso) y Kaliwining (distrito de Jember), ubicadas en Java Oriental - Indonesia, se estudiaron BSF en medio líquido de PVK para evaluar su efecto sobre el crecimiento de plántulas de café Robusta. Se obtuvieron 12 aislamientos de BSF (ocho aislados de Andungsari y cuatro aislados de Kaliwining), cualitativamente se midió la capacidad de solubilizar fosfato por el halo que rodea las colonias, y cuantitativamente se midió el fosfato solubilizado mediante espectrofotometría. Cuatro aislamientos de BSF, tuvieron la mejor respuesta cualitativa y cuantitativa, en su orden fueron PFpKW1, PFpC61, PFsC62a y PFsB11. En invernadero, al inocular estos mismos aislamientos sobre plántulas de café robusta, mejoró el crecimiento y rendimiento del cultivo. Por pruebas fenotípicas, estos aislamientos fueron similares al género *Pseudomonas* (Baon *et al.*, 2012).

Para Pratiwi *et al.* (2020), existen bacterias endófitas promotoras del crecimiento vegetal (PGPB, por sus siglas en inglés) que pueden ser utilizadas como biofertilizantes para reforzar la salud del suelo y productividad de la planta. Para ello se aislaron, analizo su potencial e

identificaron las PGPB en café robusta (*Coffea canephora*) y café arábico (*Coffea arabica* L.). Se obtuvieron PGPB de las raíces de los dos materiales de café y se evaluó su potencial para producir IAA, solubilización de fosfato y fijación de nitrógeno. Los aislamientos se identificaron hasta especie usando el gen 16S rRNA. De café robusta se obtuvieron: diez bacterias productoras de IAA, ocho solubilizadoras de fosfato y siete fijadoras de nitrógeno; para café arábica fueron 12 bacterias productoras de IAA, siete solubilizadoras de fosfato y seis fijadoras de nitrógeno. Los aislamientos SS.E2 y SW.E9 produjeron los más altos valores de IAA y fueron identificados como *Bacillus cereus* ATCC 14579 (99,9%). El aislamiento SS.P3 y SW.P5 fueron los de mayor capacidad de solubilización de fosfato y se identificaron respectivamente como *Rahnella aquatilis* B35 (99,9%) y *Kluyvera intermedia* TPY16 (99,9%). En relación a los aislamientos SS.N2 y SW.N6 mostraron los valores más altos para fijar nitrógeno y se identificaron respectivamente como *Rahnella aquatilis* B35 (99,9%) y *Pseudomonas tolaasii* NCPPB 2192 (99,0%). Resultados similares fueron obtenidos por Kunwar *et al.* (2018), al analizar rizosfera de plántulas de café con seis meses de cultivadas en Nepal, para aislar BSF que fueron seleccionadas por su capacidad cuantitativa al generar halo traslucido en PVK.

## 5. El microbioma presente en la rizosfera y su multifuncionalidad en plantas.

Microbioma hace referencia no solo a los microorganismos y sus compuestos activos, incluido metabolitos secundarios presentes en un nicho, sino su participación en diferentes procesos ecológicos. En relación a los BSF, su función radica en la disponibilidad de fosforo para la fitonutrición y fitosanidad en sistemas naturales y en cultivo.

Especies del género *Burkholderia*, además de tener actividad como BSF también actúan como biocontroladoras de patógenos, aportan en procesos de biorremediación, fijación de nitrógeno y producción de sideróforos (Bolívar *et al.*, 2016; Patiño y Sanclemente 2014; Patiño y Sánchez de Prager 2012; Reis *et al.* 2004). De las especies más reconocidas está *B. trópica*, la cual posee la capacidad de solubilizar fosfatos brindándole a la planta sustancias para su crecimiento y desarrollo, además es PGPR según Bolívar *et al.* (2016) y Patiño (2010).

El género *Bacillus*, igualmente es BSF y PGPR; a nivel comercial se han evaluado diferentes especies, como *B. subtilis*, con éxito para la nutrición y control fitosanitarios en diferentes cultivos alimentarios como arroz, frijol, chontaduro y vainilla (Álvarez-López *et al.*, 2014; Álvarez *et al.*, 2013; Tejera *et al.*, 2013; Patiño y Prager 2012; Chen *et al.*, 2006).

El género *Pseudomonas*, posee especies en diferentes hábitats y hospederos, están en rizosfera y como endófitos de plantas; en ambos casos con actividad como biocontroladores directos sobre microorganismos fitopatógenos y fitonematodos, e indirectos al inducir resistencia en plantas, promover el crecimiento vegetal y/o degradar compuestos xenobióticos (Pawlik *et al.*, 2017; Álvarez-López *et al.*, 2014; Pandey *et al.*, 2011; Kuklinsky-Sobral *et al.*, 2004). Este género también presenta amplia versatilidad a nivel genético, ya que existen reportes al utilizar diferentes mecanismos para la solubilización y mineralización de fosfatos, dentro de los cuales se menciona la producción de ácidos orgánicos y altos niveles de enzimas fosfatasa (Restrepo *et al.*, 2015; Álvarez-López *et al.*, 2014; Patiño 2010).

En el caso del género *Rahnella*, esta bacteria es poco común y los estudios *in vitro* le atribuyen actividad como biocontrolador de fitopatógenos, capacidad de producir sideróforos, fijar nitrógeno atmosférico, solubilizar fosfatos y ser agente quelante (He *et al.*, 2013; Kim *et al.*, 1997). En el estudio realizado por Vyas *et al.* (2010), se muestra que *Rahnella* sp. promueve el crecimiento de plantas por la producción de sideróforos, además de suprimir el crecimiento de patógenos fúngicos en la rizósfera de las plantas. Así mismo, exhibió capacidad de quelación, producción de ácidos orgánicos y mineralización de fosfato orgánico a partir de ácidos fítics (Becerra *et al.*, 2011).

Igualmente, el género *Enterobacter*, con la especie *E. cloacae*, es una bacteria que se encuentra ampliamente distribuida en la naturaleza colonizando rizosfera y reconocida como PGPR. Dentro de sus múltiples actividades se encuentra en agua y hace parte de la microbiota de insectos, animales y tracto gastrointestinal de los humanos (Prieto *et al.*, 2015; Tripura *et al.*, 2007; Gyaneshwar *et al.*, 1999).

## CONCLUSIONES

La biodisponibilidad de fósforo a nivel de rizosfera, no solo para la nutrición vegetal sino para la fitosanidad, es una tecnología que se debe implementar pronto no solo porque las fuentes de roca fosfórica se agotan en el mundo, sino para contribuir a disminuir la contaminación ambiental por los residuos generados al utilizar fertilizantes de síntesis química. Los estudios muestran la actividad de hongos y bacterias, con mayor eficiencia las segundas, para disponer el fósforo en su ciclo biogeoquímico ya sea de forma mineral u orgánica, contribuyendo a la agricultura en general y en particular a las prácticas que son amigables con el ambiente.

Aunque los trabajos de investigación en invernadero y laboratorio ilustran lo suficiente, se debe avanzar desarrollando estudios en campo para tener claro la respuesta ecológica y agronómica en diferentes cultivos de interés alimentario, pues solo así será posible adoptar con certeza esta tecnología que se reconoce aporta en positivo sin tenerse que enmarcar en procesos exclusivos de la agroecología.

### Conflictos de intereses

La preparación y revisión del presente manuscrito contó con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados

### REFERENCIAS

- Acosta-Suárez, M., Cruz-Martín, M., Pichardo, T., Rodríguez, E., Barbón, R., Capote, A., Pérez, A. y Alvarado-Capó, Y. 2019.** Solubilización de fosfatos *in vitro* por cepas de *Aspergillus* y *Penicillium* y promoción del crecimiento de plantas de cafeto. *Bioteología Vegetal* 19(1):65-72. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2074-86472019000100065&lng=es&nrm=iso](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2074-86472019000100065&lng=es&nrm=iso)
- Álvarez, C. L., Marín, M., Díez, M. C. y Osorio, N. W. 2013.** Molecular identification of microorganisms associated to the rhizosphere of vanilla and their potential use as biofertilizers. En: Ghaemghami, J., Khosh-Khui, M. y Omidbaigi, R. (Ed). *International Symposium on Medicinal and Aromatic Plants IMAPS2010 and History of Mayan Ethnopharmacology IMAPS2011. Acta Horticulturae* 964, p107-114. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.964.13>
- Álvarez-López, C., Osorio-Vega, N. W., Díez-Gómez, M. C. y Marín-Montoya, M. A. 2014.** Caracterización bioquímica de microorganismos rizosféricos de plantas de vainilla con potencial como biofertilizantes. *Agronomía Mesoamericana* 25(2): 225-241. <https://doi.org/10.15517/am.v25i2.15426>
- Arias, B. G. 2019.** Análisis de máxima actividad de fosfatasas y fitasas de una bacteria seleccionada por su capacidad solubilizadora de fósforo. Tesis ingeniero Agroindustrial, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro.
- Baon, J., Wedhastri, S. y Kurniawan, A. 2012.** The Ability of Phosphate Solubilizing Bacteria Isolated from Coffee Plant Rhizosphere and Their Effects on Robusta Coffee Seedlings. *Journal of Agricultural Science and Technology A* 2(9):1064-1070. DOI: [10.17265/2161-6256/2012.09A.005](https://doi.org/10.17265/2161-6256/2012.09A.005)
- Beltrán-Pineda, M. E. 2014.** Bacterias solubilizadoras de fosfato con potencial biofertilizante en suelos cultivados con papa (*Solanum tuberosum*). *Revista Agronomía* 22(2):7-20. [http://agronomia.ucaldas.edu.co/downloads/Agronomia22\(2\)\\_2.pdf](http://agronomia.ucaldas.edu.co/downloads/Agronomia22(2)_2.pdf)
- Cisneros Rojas, C. A., Sánchez de Prager, M. y Menjivar Flores, J. C. 2016.** Influencia de microorganismos solubilizadores de fósforo del suelo y su absorción por plántulas de café. *Bioagro* 28(2):95-106.
- Cisneros Rojas, C. A., Sánchez de Prager, M. y Menjivar Flores, J. C. 2017.** Identificación de bacterias solubilizadoras de fosfatos en un Andisol de la región cafetera colombiana. *Revista Colombiana de Biotecnología* 19(1):21–28. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v19n1.65966>

- Coutinho, F. P., Felix, W. P. y Yano-Melo, A. M. 2012.** Solubilization of phosphates in vitro by *Aspergillus* spp. and *Penicillium* spp. *Ecological engineering* 42:85-89. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.02.002>
- Fernández-Garzón, A., Perdomo Rivas, L. P. y Avellaneda-Torres, L. M. 2020.** Effect of management (ecological and conventional) on functional groups of soil microorganisms in coffee agroecosystems with different resilience to climate variability, Colombia. *Acta Scientiarum. Biological Sciences* 42:1-11. <https://doi.org/10.4025/actasciobiolsci.v42i2.48620>
- Fitriatin, B., Fauziah, D., Fitriani, F., Ningtyas, D., Suryatmana, P., Hindersah, R., Setiawati, M. y Simarmata, T. 2020.** Biochemical activity and bioassay on maize seedling of selected indigenous phosphate-solubilizing bacteria isolated from the acid soil ecosystem. *Open Agriculture* 5:300–304. <https://doi.org/10.1515/opag-2020-0036>
- Gómez-Pinzón, P. D., Ariza-Vargas, L. K. y Avellaneda-Torres, L. M. 2022.** Changes in Soil Quality Associated with the Implementation of Ecological Agriculture Techniques in Coffee Plants under Different Coverings. *Colombia Forestal* 25(1):5-20. <https://doi.org/10.14483/2256201X.18064>
- González-Osorio, H., Góngora-Botero, C., Medina-Rivera, R. y Osorio-Vega, N. 2020.** Screening for phosphate-solubilizing fungi from colombian andisols cultivated with coffee (*Coffea arabica* L.). *Coffee Science* 15:e151666. <https://doi.org/10.25186/v15i.1666>
- Gyaneshwar, P., Parekh, L. J., Archana, G., Poole, P. S., Collins, M. D., Hutson, R. A. y Naresh Kumar, G. 1999.** Involvement of a phosphate starvation inducible glucose dehydrogenase in soil phosphate solubilization by *Enterobacter asburiae*. *FEMS microbiology letters* 171(2): 223-229. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.1999.tb13436.x>
- Hazra, F. y Pratiwi, E. 2013.** Isolation, Characterization, and Molecular Identification of Phosphate Solubilizing Bacteria from Several Tropical Soils. *J Trop Soils* 18(1):67-74. <http://dx.doi.org/10.5400/jts.2013.v18i1.67-74>
- He, D. y Wan, W. 2021.** Phosphate-Solubilizing Bacterium *Acinetobacter pittii* gp-1 Affects Rhizosphere Bacterial Community to Alleviate Soil Phosphorus Limitation for Growth of Soybean (*Glycine max*). *Front. Microbiol* 12:737116. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.737116>
- He, H., Ye, Z., Yang, D., Yan, J., Xiao, L., Zhong, T., Yuan, M., Cai, X., Fang, Z. y Jing, Y. 2013.** Characterization of endophytic *Rahnella* sp. JN6 from *Polygonum pubescens* and its potential in promoting growth and Cd, Pb, Zn uptake by *Brassica napus*. *Chemosphere* 90(6): 1960-1965. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.10.057>
- Kaur, G. y Reddy, M. S. 2014.** Influence of P-solubilizing bacteria on crop yield and soil fertility at multilocal sites. *European Journal of Soil Biology* 61:35-40. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2013.12.009>
- Khan, M.S., Zaidi, A., Ahemad, M., Oves, M. y Wani, P.A. 2010.** Plant growth promotion by phosphate solubilizing fungi – current perspective. *Arch Agron Soil Scien.* 56(1): 73–98. <https://doi.org/10.1080/03650340902806469>
- Kim, K. Y., Jordan, D. y Krishnan, H. B. 1997.** *Rahnella aquatilis*, a bacterium isolated from soybean rhizosphere, can solubilize hydroxyapatite. *FEMS Microbiology letters* 153(2): 273-277. [https://doi.org/10.1016/S0378-1097\(97\)00246-2](https://doi.org/10.1016/S0378-1097(97)00246-2)

- Kuklinsky-Sobral, J., Araújo, W. L., Mendes, R., Geraldi, I. O., Pizzirani-Kleiner, A. A. y Azevedo, J. L. 2004.** Isolation and characterization of soybean-associated bacteria and their potential for plant growth promotion. *Environmental microbiology* 6(12): 1244-1251. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2004.00658.x>
- Kunwar, V. S., Chimouriya, S., Lami-chhane, J. y Gauchan, D. P. 2018.** Isolation and Characterization of Phosphate Solubilizing Bacteria from Rhizosphere of Coffee Plant and Evaluating Their Effects on Growth and Development of Coffee Seedlings. *Biotechnol Ind J.* 14(5):1-10.
- Lara, C., Esquivel Ávila, L. M. y Negrete Peñata, J. L. 2011.** Bacterias nativas solubilizadores de fosfatos para incrementar los cultivos en el departamento de Córdoba-Colombia. *Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial* 9(2):114-120. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1692-35612011000200013](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-35612011000200013)
- Moreno-Conn, L. M., Casallas, M. L. y Barrera, F. M. C. 2021.** Solubilización de fosfatos por bacterias del género *Burkholderia* aisladas de oxisoles de la altillanura colombiana. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 22(2). [https://doi.org/10.21930/rcta.vol22\\_num2\\_art:1897](https://doi.org/10.21930/rcta.vol22_num2_art:1897)
- Muleta, D., Assefa, F., Börjesson, E. y Granhall, U. 2013.** Phosphate-solubilising rhizobacteria associated with *Coffea arabica* L. in natural coffee forests of southwestern Ethiopia. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* 12:73–84. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsas.2012.07.002>
- Ortiz Texon, J. A., Delgadillo Martínez, J., Rodríguez Mendoza, M. D. L. N. y Calderón Zavala, G. 2016.** Inoculación bacteriana en el crecimiento y calidad del fruto de cinco variedades de fresa en suelos con pH contrastante. *Terra Latinoamericana* 34(2):177-185. <https://www.re-dalyc.org/articulo.oa?id=57345272002>
- Patiño-Torres, C. O. y Sanclemente-Reyes, O. E. 2014.** Los microorganismos solubilizadores de fósforo (MSF): una alternativa biotecnológica para una agricultura sostenible. *Entramado* 10(2): 288-297. <https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/entramado/article/view/3510>
- Patiño-Torres, C. y Sánchez de Prager, M. 2012.** Aislamiento e identificación de bacterias solubilizadoras de fosfatos, habitantes de la rizósfera de chontaduro (*B. gassipaes* kunth). *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* 10(2):177-187. <https://revistas.unicauca.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/258>
- Patiño-Torres, C. O. 2010.** Solubilización de fosfatos por poblaciones bacterianas aisladas de un suelo del Valle del Cauca: Estudio de biodiversidad y eficiencia. Tesis Doctor en Ciencias Agropecuarias Línea de Investigación Manejo de Suelos y Aguas, Universidad Nacional de Colombia, Palmira.
- Pandey, A., Chaudhry, S., Sharma, A., Choudhary, V. S., Malviya, M. K., Chamoli, S., Rinu, K., Trivedi, P. y Palni, L. M. 2011.** Recovery of *Bacillus* and *Pseudomonas* spp. from the 'Fired Plots' Under Shifting Cultivation in Northeast India. *Current Microbiology* 62(1): 273–280. <https://doi.org/10.1007/s00284-010-9702-6>

- Pawlik, M., Cania, B., Thijs, S., Vangronsveld, J. y Piotrowska-Seget, Z. 2017.** Hydrocarbon degradation potential and plant growth-promoting activity of culturable endophytic bacteria of *Lotus corniculatus* and *Oenothera biennis* from a long-term polluted site. *Environmental Science and Pollution Research* 24(24): 19640-19652. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9496-1>
- Pratiwi, E.R, Ardyati, T. y Suharjo, S. 2020.** Plant Growth Promoting Endophytic Bacteria of *Coffea canephora* and *Coffea arabica* L. in UB Forest. *J.Exp. Life Sci.* 10(2). <https://doi.org/10.21776/ubjels.2020.010.02.07>
- Perea- Rojas, Y., Arias, R., Medel-Ortiz, R., Trejo-Aguilar, D., Heredia, G. y Rodríguez-Yon, Y. 2019.** Effects of native arbuscular mycorrhizal and phosphate-solubilizing fungi on coffee plants. *Agroforest Syst* 93:961–972. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0190-1>
- Posada, R., Sánchez de Prager, M., Sieverding, E., Aguilar-Dorante, K. y Heredia-Abarca, G. 2012.** Relaciones entre los hongos filamentosos y solubilizadores de fosfatos con algunas variables edáficas y el manejo de cafetales. *Rev. Biol. Trop.* 60(3):1075-1096.
- Prieto-Correal, G. C., Prada-Salcedo, L. D., Patiño, C. L. C. y Franco-Correa, M. 2015.** Evaluación de la producción de ácidos orgánicos por *Streptomyces* spp. y solubilización de tres fuentes de fósforo por la cepa T3A. *Revista Colombiana de Biotecnología* 17(1): 111-1121. <http://dx.doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v17n1.41667>
- Reis, V. M., Estrada-de los Santos, P., Tenorio-Salgado, S., Vogel, J., Stoffels, M., Guyon, S., Mavingui, P., Baldani, V. L. D., Schmid, M., Baldani, J. I., Balandreau, J., Hartmann, A. y Caballero-Mellado, J. 2004.** *Burkholderia tropica* sp. nov., a novel nitrogen-fixing, plant-associated bacterium. *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 54(6): 2155-2162. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.02879-0>
- Restrepo, F.G., Marulanda, M.S., De la fe, P.Y., Díaz, A., Lucia, B.V. y Hernández, R.A. 2015.** Bacterias solubilizadoras de fosfatos y sus potencialidades de uso en la promoción del crecimiento de cultivos de importancia económica. *Revista CENIC Ciencias Biológicas* 46(1): 63-76.
- Sachdeva, D., Nemab, P., Dhakephalkarb, P., Zinjardec, S. y Chopadea, B. 2010.** Assessment of 16S rRNA gene-based phylogenetic diversity and promising plant growth-promoting traits of *Acinetobacter* community from the rhizosphere of wheat. *Microbiological Research* 165:627-638. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2009.12.002>
- Sánchez López, D. B., Romero Perdomo, F. A. y Bonilla Buitrago, R. R. 2014.** Respuesta de *Physalis peruviana* L. a la inoculación con bacterias solubilizadoras de fosfato. *Revista mexicana de ciencias agrícolas* 5(5):901-906. <http://dx.doi.org/10.29312/remexca.v5i5.913>
- Satyaprakash, M., Nikitha, T., Chaitanya, I. y Reddi, E. U. B. 2017.** Phosphate Solubilising rhizobacteria associated with *Coffea arabica* L. in coffee plantations of north eastern Ghats, Visakhapatnam District, Andhra Pradesh, India *International Journal of Current Research* 9(05):49779- 49783.

- Semiring, M., Sabrina, T. y Mukhlis, M. 2020.** Phosphate solubilizing microbes and coffee skin compost to increase Robusta coffee plant growth in Andisol of Mount Sinabung Area. *Bulg. J. Agric. Sci.* 26(4):766–771.
- Silva, L.I.d., Pereira, M.C., Carvalho, A.M.X.d., Buttrós, V.H., Pasqual, M. y Dória, J. 2023.** Phosphorus-Solubilizing Microorganisms: A Key to Sustainable Agriculture. *Agriculture* 13, 462. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020462>
- Soto Lovon, J. H. y Alcarraz Curi, M. 2022.** Bacterias solubilizadoras de fósforo inorgánico aislados de la rizósfera de Coffea americana en Rioja–Perú. *Ciencia e Investigación* 25(1):11-15. <https://doi.org/10.15381/ci.v25i1.23466>
- Tejera-Hernández, B., Heydrich-Pérez, M., y Rojas-Badía, M. M. 2013.** Aislamiento de Bacillus solubilizadores de fosfatos asociados al cultivo del arroz. *Agronomía Mesoamericana* 24(2): 357-364. <http://dx.doi.org/10.15517/am.v24i2.12535>
- Tripura, C., Sudhakar Reddy, P., Reddy, M. K., Sashidhar, B. y Podile, A. R. 2007.** Glucose dehydrogenase of a rhizobacterial strain of Enterobacter asburiae involved in mineral phosphate solubilization shares properties and sequence homology with other members of enterobacteriaceae. *Indian Journal of Microbiology* 47(2): 126-131. <https://doi.org/10.1007%2Fs12088-007-0025-7>
- Vyas, P., Joshi, R., Sharma, K. C., Rahi, P., Gulati, A. y Gulati, A. 2010.** Cold-adapted and rhizosphere-competent strain of Rahnella sp. with broad-spectrum plant growth-promotion potential. *Journal of Microbiology Biotechnology* 20(12): 1724-1734. <http://dx.doi.org/10.4014/jmb.1007.07030>
- Waday, Y., Aklilu, E., Bultum, M. y Ancha, V. 2022.** Optimization of soluble phosphate and IAA production using response surface methodology and ANN approach. *Heliyon* 8:e12224. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12224>
- Wakelin, S. A., Warren, R. A., Harvey, P. R. y Ryder, M. H. 2004.** Phosphate solubilization by Penicillium spp. closely associated with wheat roots. *Biol. Fert. Soils*, 40: 36–43. <https://doi.org/10.1007/s00374-004-0750-6>
- Yuliatin, E., Ardyati, T. y Suharjono, S. 2019.** Effect of Soil Physicochemical Properties on PGPR Density at A Coffee Plantation in Malang, Indonesia. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 391:012071. DOI: [10.1088/1755-1315/391/1/012071](https://doi.org/10.1088/1755-1315/391/1/012071)
- Zaidi, A., Khan, M. S., Ahemad, M., Oves, M. y Wani, P. A. 2009.** In: *Microbial strategies for crop improvement*. Berlin (Germany): Springer-Verlag, pp. 23-50.