I + T + C Investigación, Tecnología y Ciencia **ISSN: 1909-5775** **e-ISSN: 2805-7201**

Artículo de Investigación

Phosphate-solubilizing microorganisms as an ecological alternative for reducing chemical fertilizer use in pineapple (*Ananas comosus*) cultivation through agrotechnology in the FRUPASA Association, Santander de Quilichao

Microorganismos solubilizadores de fósforo como alternativa ecológica en la reducción del uso de químicos en cultivos de piña (*Ananas comosus*) utilizando agrotecnología en la Asociación FRUPASA, Santander de Quilichao

Ever Martínez Romero [1*], Néstor José Perafán Dizú [2], Daniela Chocue Diaz [3], José Ricardo Yatacue Talaga [4]

[1] Corporación Universitaria Comfacauca, Programa de Ingeniería Agroambiental, Colombia; dirtagazonanorte@unicomfacauca.edu.co
[2] Corporación Universitaria Comfacauca, Programa de Ingeniería Agroambiental, Colombia; ndizu@unicomfacauca.edu.co
[3] Corporación Universitaria Comfacauca, Programa de Ingeniería Agroambiental, Colombia; danielachocuediaz@unicomfacauca.edu.co
[4] Corporación Universitaria Comfacauca, Programa de Ingeniería Agroambiental, Colombia; joseyatacue@unicomfacauca.edu.co

[*] **Autor de correspondencia:** dirtagazonanorte@unicomfacauca.edu.co

Recibido: 22/05/2026
Aceptado: 05/10/2026
Fecha de publicación: 15/11/2026

Derechos de autor © 2026

Resumen: El tratamiento del suelo con Microorganismos Solubilizadores de Fósforo (MSF) es considerado una alternativa ecológica para mejorar los niveles de fósforo soluble en las plantas y reducir el uso de fertilizantes químicos. Este estudio se desarrolló en el agroecosistema de la empresa Rancho Piña con el objetivo de fortalecer a los productores de la asociación FRUPASA en la identificación de microorganismos solubilizadores de fósforo como alternativa ecológica en la reducción del uso de químicos en el cultivo de *Ananas comosus*. Se realizaron muestreos de suelo y vegetación en áreas silvestres (A1), además de análisis microbiológicos y fisicoquímicos para evaluar nutrientes y propiedades del suelo. Posteriormente, se determinó la viabilidad de las cepas en medios de cultivo AN y PDA, y se evaluó su capacidad de solubilizar fósforo en medio líquido SRS utilizando diferentes fuentes fosfatadas (P-Ca, P-Al y P-Fe). La solubilización se midió mediante el método colorimétrico de Bray II y control de pH. Se obtuvieron 66 morfotipos de microorganismos, de los cuales 9 fueron seleccionados por su capacidad solubilizadora. Algunas cepas alcanzaron hasta una concentración de 76,67 mg/L de P en forma disponible, destacándose la solubilización de fósforo en forma P-Ca. La cepa MSFT3F fue la única capaz de crecer en las tres fuentes evaluadas.

Palabras clave: Agroecosistema; Bacteria solubilizadora de fósforo; Biorreactor; Cultivo de piña; Microorganismos.

Abstract: Soil treatment with Phosphorus-Solubilizing Microorganisms (PSM) is considered an environmentally friendly alternative to improve soluble phosphorus levels in plants and reduce the

use of chemical fertilizers. This study was conducted in the agroecosystem of the Rancho Piña company with the objective of strengthening the FRUPASA association's ability to identify phosphorus-solubilizing microorganisms as an environmentally friendly alternative for reducing chemical use in *Ananas comosus* cultivation. Soil and vegetation samples were taken from wild areas (A1), and microbiological and physicochemical analyses were performed to evaluate soil nutrients and properties. Subsequently, the viability of the strains was determined in AN and PDA culture media, and their capacity to solubilize phosphorus in SRS liquid medium was evaluated using different phosphate sources (P-Ca, P-Al, and P-Fe). Solubilization was measured using the Bray II colorimetric method and pH monitoring. Sixty-six microbial morphotypes were obtained, nine of which were selected for their solubilization capacity. Some strains achieved up to 76.67 mg/L of phosphorus (P) solubilization—specifically in the form of calcium-bound phosphorus (P-Ca). Strain MSFT3F was the only one capable of growing on all three sources evaluated.

Keywords: Agroecosystem; Bioreactor; Microorganisms; Phosphorus-solubilizing bacteria; Pineapple cultivation.

1. Introducción

El fósforo (P) es un elemento nutritivo esencial, es el segundo elemento más importante después del nitrógeno. No se encuentra disponible para las plantas ya que en el suelo está presente principalmente en forma fija [1]. Los microorganismos del suelo que tienen la capacidad de solubilizar fosfato se denominan microorganismos solubilizadores de fósforo (MSF). Convierten el fosfato insoluble en forma soluble a través de la producción de ácidos orgánicos y lo hacen disponible para la absorción y nutrición de las plantas. También son útiles como biofertilizantes, ya que pertenecen a las rizobacterias promotoras del crecimiento de las plantas [2].

El fósforo que se encuentra en los suelos tropicales está representado en minerales primarios como las apatitas, hidroxiapatitas y oxiapatitas, este no es asimilable por las plantas ya que es insoluble y difícilmente solubilizable, por ello realiza procesos de intercambio a una velocidad muy lenta [3], [4].

Un suministro adecuado de fósforo durante las primeras fases de desarrollo de la planta es importante para que se establezcan los primordios de la parte reproductiva de la planta. Este también juega un papel importante en el aumento de la ramificación de la raíz y la fuerza lo que confiere vitalidad y resistencia a las enfermedades de la planta. Asimismo, ayuda en la formación de las semillas y en la maduración temprana de cultivos como los cereales y las legumbres. La pobre disponibilidad o deficiencia de fósforo (P) reduce notablemente el tamaño de la planta y el crecimiento [5]. El fósforo se encuentra entre 0,2-0,8% del peso seco de la planta.

Para satisfacer las necesidades nutricionales de los cultivos, el fósforo se suele añadir en forma de fertilizantes fosfatados de uso intensivo en la agricultura moderna llevado a un aumento del fósforo en el suelo. Sin embargo, una gran parte de este fósforo aplicado se vuelve rápidamente insoluble y, por lo tanto, no está disponible para las plantas, lo que resulta en una baja eficiencia de uso del P aplicado [6]. La insolubilización del fósforo se debe principalmente a la reacción de los iones fosfato con cationes como el calcio, el hierro y el aluminio, formando compuestos químicamente estables como fosfatos de calcio en suelos alcalinos y fosfatos de hierro o aluminio en suelos ácidos [7]. Por otra parte, las plantas solo pueden utilizar una pequeña cantidad de este fósforo añadido entre el 5% y el 25% lo demás se precipita por la formación de complejos metal-catión, y rápidamente se fija en los suelos [8], lo cual además de representar una pérdida económica para el agricultor también tiene un impacto ambiental negativo.

En el sector agrícola del Cauca, el estudio de las emisiones de gases de efecto invernadero resalta la importancia de promover prácticas productivas ambientalmente sostenibles [9].

Actualmente, el número de países que utilizan microorganismos solubilizadores de fósforo en cultivos de piña está en constante aumento; se emplean microorganismos

solubilizadores de fósforo como biofertilizantes en este cultivo, tanto de forma individual como en combinación, adaptados a diversos tipos de suelos y sistemas agrícolas. Esta práctica ha demostrado aumentar significativamente los rendimientos y reducir la necesidad de fertilizantes químicos convencionales aplicados [10], [11]. Asimismo, en el cultivo de piña se ha demostrado que en condiciones específicas de estudio se puede comprobar un efecto estimulador de un preparado microbiano sobre el sistema radicular del cultivo ya que la rizosfera de la piña es favorable para el crecimiento de bacterias [12].

La oferta de mercado incluye activadores líquidos o "biofertilizantes" que contienen hongos benéficos que solubilizan los fosfatos a través de la producción de fosfatasas y ácidos orgánicos. Esta solubilización permite una mayor y más rápida disponibilidad del fósforo, que puede ser absorbido por la raíz de las plantas de piña [13].

Por lo anterior se han reportado diversos ensayos en medios de cultivo y el suelo con resultados positivos acerca de la disposición de P y su incorporación por las plantas.

Las preocupaciones ambientales han llevado a la búsqueda de formas sostenibles de obtener P asequible para los cultivos. El objetivo de este trabajo fue identificar microorganismos solubilizadores de fósforo como alternativa ecológica para mejorar la nutrición de P del cultivo de piña en el municipio de Santander de Quilichao.

2. Materiales y métodos

La zona de estudio se ubica en la empresa Rancho Piña, miembro de la Asociación de productores de fruta (FRUPASA) de Santander de Quilichao, departamento del Cauca (Colombia), en un bosque de roble (*Quercus humboldtii*) con aproximadamente 200 años de conservación (2°59'19,45" N; 76°30'13,39" O). El clima en la zona es templado húmedo, con precipitación promedio entre 1000 y 2000 mm, y temperatura promedio entre 18 y 24 °C. Los suelos se clasifican como Ultisoles, Typic Hapludands y Oxic Dystrudeps [14] utilizados para agricultura y pastoreo.

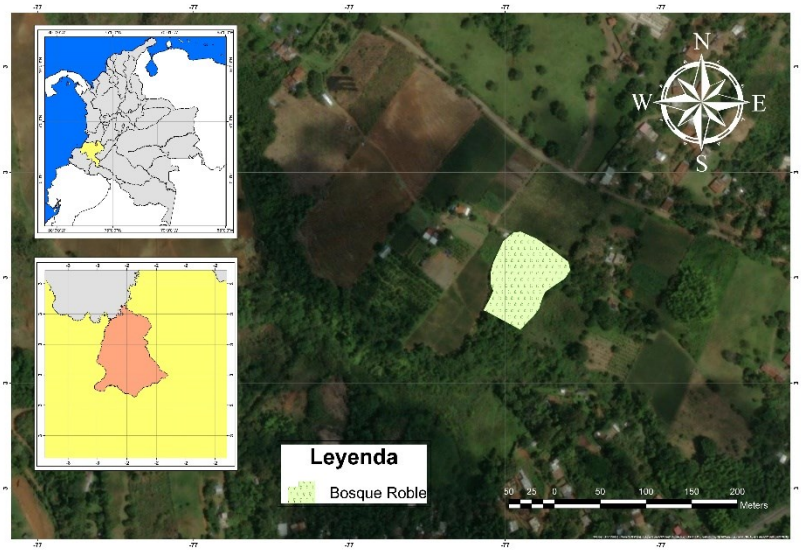


Figura 1. Área de estudio correspondiente al bosque de roble de la finca Rancho Piña, ubicada en Santander de Quilichao, Cauca.

Fuente: elaboración propia, 2026.

2.1. Toma de muestras y análisis fisicoquímico del suelo

Se tomaron tres muestras de suelo en la empresa Rancho Piña [15]. Posteriormente se realizó muestreo del suelo y vegetación en áreas silvestres (A1), para la toma de estas muestras de suelo, con fines microbiológicos, se utilizó una pala esterilizada con alcohol al 95% - hipoclorito de sodio 5% en composición 1:3. Una vez retirada la capa vegetal se

recolectó el suelo a una profundidad entre los 0 cm – 20 cm. En el bosque se recolectaron 5 submuestras, las cuales se agruparon y homogenizaron bien en una bolsa estéril para finalmente obtener una muestra de aproximadamente 500 g.

Las muestras de suelo se recolectaron y analizaron de acuerdo con los procedimientos establecidos bajo la norma NTC-ISO/IEC 17025:2017, siguiendo las metodologías del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) [16] para determinar fósforo disponible mediante el método de Bray II y análisis colorimétrico [17].

2.2. Aislamiento de los microorganismos solubilizadores de fósforo

Se realizaron conteos de microorganismos en Agar nutritivo - AN (Código Nº 1,05450,0500) y Potato Dextrose Agar - PDA (Código Nº 1,10130,0500). Para el aislamiento de microorganismos solubilizadores de fósforo (MSF), se utilizaron medios de cultivo sólidos con distintas fuentes de fósforo: fosfato de aluminio (4,6 g/L), fosfato de calcio (5 g/L) y fosfato de hierro (5 g/L). La formulación del medio incluyó diversos reactivos esenciales en las siguientes concentraciones por litro: sulfato de amonio ($(NH_4)_2SO_4$) 0,5 g, cloruro de potasio (KCl) 0,25 g, sulfato de magnesio heptahidratado ($MgSO_4{\cdot}7H_2O$) 0,3 g, sulfato de manganeso ($MnSO_4{\cdot}H_2O$) 0,004 g, sulfato de hierro heptahidratado ($FeSO_4{\cdot}7H_2O$) 0,002 g, cloruro de sodio (NaCl) 0,2 g, glucosa 1 g, y púrpura de bromocresol 0,01 g como indicador de pH. Finalmente, se incorporaron 15 g de agar como agente solidificante, teniendo en cuenta que se tomaron 10 g de muestra de suelo en peso seco corregido en 90 ml de NaCl al 0,09 g/L, se realizaron diluciones hasta 10^{-5} y se inocularon los diferentes medios de cultivo para solubilizadores [17], los medios de cultivo fueron incubados a 28 °C durante 7 días. Para la determinación de las unidades formadoras de colonias (UFC) se tuvo en cuenta los morfotipos descritos por Brock [18].

En cuanto a la selectividad de bacterias solubilizadoras de fósforo a los medios de cultivo se les adiciona nistatina 0,01 g/L, y para la selectividad de hongos cloranfenicol 0,05 g/L [19].

En los medios de cultivo P-Ca y P-Al, el pH fue ajustado a 4,2 con una solución de HCl al 0,01% y P-Fe el pH se ajustó a 5,5 con KOH 0,05% [20]. Las muestras de suelo, para la evaluación fisicoquímica, se colectaron y evaluaron con la metodología del Laboratorio de Suelos de la Gobernación del Cauca [15].

2.3. Evaluación de las tasas de solubilización

Una vez determinada la población de MSF se seleccionaron los microorganismos capaces de crecer en medios de cultivo con mínimo dos fuentes de fósforo; a los MSF se les evaluó por duplicado la solubilización de $Ca_3(PO_4)_2$ (P-Ca) dejando un testigo y una muestra con la mezcla de todos los microorganismos, partiendo de una concentración de 100 mg/20 mL de P-Ca a un pH de 4,2. Las muestras con MSF fueron incubadas a 28 °C durante 7 días y llevadas al laboratorio de Agroquímica de la Universidad del Cauca en donde se evaluó el fósforo disponible mediante el método de Bray II [17] y análisis colorimétrico.

2.4. Establecimiento de cepas MSF en el biorreactor

Una vez determinada la capacidad solubilizadora de fósforo, los MSF se inocularon en un biorreactor con 30 L de medio de cultivo, con base energética de melaza [20].

Primero se envolvió y esterilizó el material y reactivos a utilizar en el autoclave, posteriormente en tubos de ensayo se agregaron para un volumen de 30 L: 30 L de agua destilada, 90 g de harina de arveja (*Pisum sativum* L.), utilizada como fuente de nitrógeno (N), 600 g de melaza (fuente de energía y minerales), 6 g de NaCl (fuente de sodio). Se dejó en incubación durante 15 días a 28 °C [20].

2.5. Instrumentación y automatización del proceso de solubilización en biorreactor

La instrumentación del biorreactor se llevó a cabo mediante la incorporación de un sistema de monitoreo automatizado, basado en una placa microcontroladora Arduino

Uno [21]. El sistema incluyó tres sensores especializados: un sensor de temperatura digital tipo sonda DS18B20, para monitorear el proceso de fermentación [22], un sensor de presión MPS20N0040D y un sensor ultrasónico HC-SR04 [23] para medición de nivel.

Cada sensor fue seleccionado por su precisión y compatibilidad con sistemas embebidos, permitiendo el seguimiento continuo de variables críticas del proceso como la temperatura, la presión interna del biorreactor y el nivel del fluido. La integración de los sensores fue gestionada por el microcontrolador, el cual se encargó de la adquisición, procesamiento y transmisión de datos hacia un módulo de relé, encargado de activar o desactivar actuadores en función de los parámetros establecidos.

La lógica de control fue desarrollada utilizando el lenguaje de programación Arduino C++, lo cual permitió implementar algoritmos eficientes para el procesamiento de señales y la toma de decisiones en tiempo real. Esta arquitectura facilitó un trabajo integrado entre hardware y software, permitiendo un monitoreo fiable y adaptable de las condiciones operativas del biorreactor.

3. Resultados

El análisis de suelo, realizado en el laboratorio de suelos de la gobernación del Cauca (código laboratorio Nº 49813), al bosque arrojó que, a una profundidad de 5 cm, el terreno presenta una textura franco-arcillo-arenosa, con un pH de 4,3, notablemente ácido, la fertilidad general del suelo es baja debido a la deficiencia de elementos esenciales como el fósforo (0,63 ppm), potasio (1,3 ppm), calcio (0,82 meq/100 g) y magnesio (0,14 meq/100 g). Por otro lado, el contenido de materia orgánica representa 5,25 %, el contenido de nitrógeno total 0,26 %, y la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICe) 2,19 meq/100 g, lo que sugiere una limitada capacidad del suelo para retener nutrientes, estas características concuerdan con estudios realizados en la zona [14] con anterioridad y con investigaciones relacionadas [24].

3.1. Aislamiento de los microorganismos solubilizadores de P

De los tres muestreos realizados se obtuvieron 66 morfotipos de microorganismos como lo muestra la Figura 2, dando como resultado, para los tres muestreos realizados, 43 UFC/mL para el morfotipo 48 y 2 UFC/mL para los otros 16 morfotipos. Los hallazgos coinciden con estudios previos realizados en cultivos como café, trigo y tomate [25]. Esto sugiere que los MSF desempeñan un papel clave en el entorno vegetal y pueden asociarse con diversas especies vegetales y adaptarse a distintos entornos.

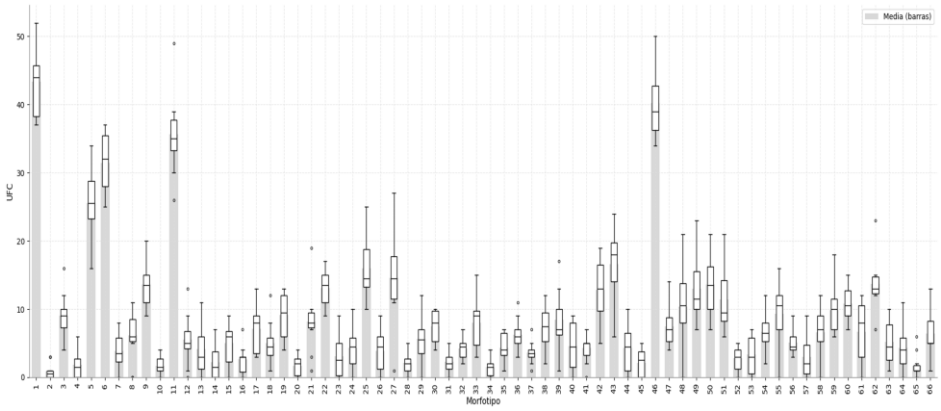


Figura 2. Total de morfotipos encontrados en Rancho Piña.
Fuente: elaboración propia, 2026.

Se obtiene mayor UFC/mL en el medio de cultivo Agar Nutritivo (AN) y menor en Papa-Agar-Dextrosa (PDA) como lo indica la Figura 3. El medio P-Fe se encuentra en segundo lugar, seguido de P-Ca y P-Al en cuanto a UFC/mL.

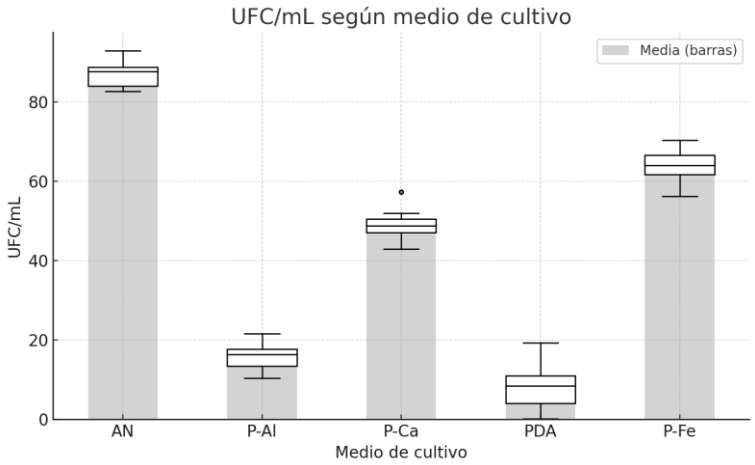


Figura 3. Unidades formadoras de colonia (UFC/mL) de los MSF obtenidos por cada medio de cultivo inoculado con suelo de Rancho Piña.

Fuente: elaboración propia, 2026.

Las nueve cepas evaluadas presentaron la capacidad de crecer en al menos dos medios de cultivo con distintas fuentes de fósforo. Entre ellas, la cepa MSFT3F destacó por ser la única que mostró crecimiento en los tres medios evaluados, cada uno con una fuente diferente de fósforo (P-Al, P-Ca y P-Fe), como se observa en la Figura 4.

Estudios recientes respaldan estos datos en donde los microorganismos solubilizadores de fosfato (MSF) han demostrado ser eficaces en la solubilización de fosfatos y en el incremento del rendimiento de los cultivos. Esta afirmación se ve respaldada por el estudio reciente realizado en Argelia, donde cepas de *Bacillus tequilensis* Bt1 y *Trichoderma orientale* T1, aisladas de la rizosfera de garbanzos, presentaron una alta capacidad solubilizante (hasta 157,44 μg/mL) y promovieron significativamente el crecimiento de las plántulas [26], [27].

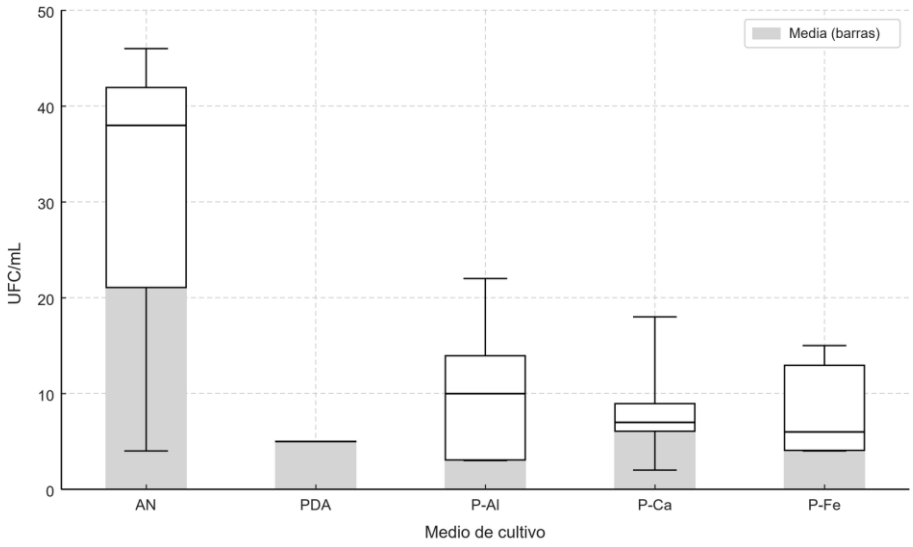


Figura 4. Evaluación de la capacidad de solubilización de fósforo por MSF aislados del suelo de Rancho Piña.

Fuente: elaboración propia, 2026.

Mediante el método de Bray II [17] y análisis colorimétrico, se evaluó el fósforo disponible, en donde los 9 morfotipos MSF valorados tuvieron solubilización de P de hasta 76,67 mg/L, como se evidencia en la Tabla 1, siendo la cepa MSFT1A la más eficiente

en cuanto a concentración de P disponible. El resultado se relaciona con investigaciones en donde, todos los aislados bacterianos solubilizaron hidroxiapatita (HAP)/fosfato tricálcico (TCP) cuando el pH del medio disminuyó [28], [29].

Tabla 1. Resultado de fósforo solubilizado por los MSF aislados de Rancho Piña.

Evaluación de cepas solubilizadoras de P-Ca, método Bray II colorimétrico				
Número	**Cepa**	**Muestra**	**P (mg/L)**	**mg P-Ca/20 mL de medio (pH 4,2)**
1	MSFT1A	M_1	76,67	100
2	MSFT1B	M_2	34	100
3	MSFT2D	M_4	47,88	100
4	MSFT3E	M_5	42,67	100
5	MSFT3F	M_6	60,8	100
6	MSFT4G	M_7	47,88	100
7	MSFT4H	M_8	39,36	100
8	MSFT5I	M_9	33,34	100
9	MSFT5J	M_10	39,93	100
10	MSFT6K	M_11	40,17	100
11	MSFT6L	M_12	42,67	100
12	MSFT7M	M_13	43,62	100
13	MSFT7N	M_14	44,65	100
14	MSFT8O	M_15	51,77	100
15	MSFT9P	M_16	42,52	100
16	MSFT9Q	M_17	45,16	100
17	MSFT10R	M_18	47,07	100
18	MSFMIX	M_19	32,83	100
19	MSFMIX	M_20	43,4	100

Fuente: elaboración propia, 2026.

3.2. Análisis en la implementación del biorreactor, sistema de control de variables principales en el proceso de solubilización

Las variables CO_2 (dióxido de carbono), T (temperatura) y P (presión) del biorreactor no pudieron ser monitoreadas debido a la sulfatación de los componentes electrónicos sensibles. Esta corrosión fue inducida por la exposición prolongada a compuestos altamente reactivos presentes en el biogás, tales como sulfuro de hidrógeno (H_2S) y mercaptanos (R–SH). El sistema operó de forma continua durante siete días.

En este periodo se evidenciaron limitaciones técnicas asociadas a la resistencia de la instrumentación electrónica en ambientes corrosivos y húmedos. Esta problemática resalta la importancia de adaptar los sistemas de monitoreo a las condiciones operativas de los procesos biológicos, como se aborda en estudios sobre la automatización de plantas de compostaje [30]. Asimismo, se relaciona con estudios previos que han explorado el uso de sensores basados en microcontroladores para la detección de gases en biogás [31], así como el desarrollo de dispositivos microfluídicos fabricados mediante impresión 3D para la detección de sulfuros [32], y el uso de microsensores electroquímicos para el monitoreo de H_2S en biorreactores [33].

Esta revisión permite confirmar el uso de encapsulamientos anticorrosivos específicos referentes para orientar el diseño de posteriores mejoras. Los antecedentes resaltan la importancia de seleccionar sistemas de medición adecuados para las condiciones químicas del proceso. En consecuencia, para futuros prototipos se propone incorporar encapsulamiento de los circuitos electrónicos, carcasas resistentes a la corrosión y sensores con mayor tolerancia química, además de evaluar la compatibilidad de los materiales y validar el funcionamiento del sistema en condiciones controladas antes de su implementación a mayor escala. Aunque el sistema mantuvo su operatividad

durante siete días, la falla del monitoreo evidencia la necesidad de fortalecer la protección y confiabilidad de la instrumentación.

4. Discusión

El objetivo de este trabajo fue identificar microorganismos solubilizadores de fósforo como alternativa ecológica para mejorar la nutrición de P del cultivo de piña [34], [35].

El fósforo constituye un nutriente esencial para el adecuado crecimiento y desarrollo de las plantas [36]. Los microorganismos solubilizadores de fósforo tienen la capacidad de transformar las formas insolubles presentes en el suelo en compuestos disponibles, que pueden ser absorbidos y aprovechados de manera eficiente por las plantas [37], [38].

El aislamiento de 66 morfotipos de microorganismos en los diferentes medios de cultivo con fuentes de fósforo insoluble (P-Ca, P-Al y P-Fe) confirma que los suelos de los agroecosistemas de *Ananas comosus* en Rancho Piña poseen una alta diversidad microbiana con potencial para la solubilización de fósforo [39]. Resultados similares han sido reportados en estudios donde se resalta que la capacidad de solubilización depende de la fuente de fósforo disponible y de las condiciones fisicoquímicas del suelo [1].

El hecho de que nueve cepas mostraron crecimiento en al menos dos fuentes de fósforo insoluble, y que una de ellas presentara crecimiento en las tres fuentes evaluadas, es un hallazgo significativo. Este comportamiento sugiere que existen microorganismos con versatilidad metabólica, capaces de secretar diferentes ácidos orgánicos o enzimas que facilitan la solubilización de compuestos fosfatados en distintas condiciones [40], [41]. De acuerdo con otras investigaciones [42], este tipo de cepas son las más promisorias para el desarrollo de biofertilizantes de amplio espectro, al poder adaptarse a diferentes tipos de suelos y formas de fósforo.

En contraste, las fuentes de P-Al y P-Fe presentan estructuras cristalinas más estables, lo cual limita la disponibilidad del fósforo [43]. Este patrón coincide con lo observado en la literatura, ya que los fosfatos de calcio suelen ser solubilizados con mayor facilidad debido a la acidificación del medio, mientras que los fosfatos de hierro y aluminio requieren mecanismos adicionales, como la producción de sideróforos o fosfatasas específicas [44].

La presencia de estos microorganismos en áreas silvestres evidencia que las prácticas de conservación del suelo favorecen la persistencia de comunidades microbianas con funciones ecológicas clave [45]. Ello respalda la idea de que los MSF pueden ser aprovechados como alternativa ecológica al uso de fertilizantes químicos, contribuyendo a la sostenibilidad del cultivo de piña. Tal enfoque coincide con lo discutido en [46] en donde se destaca que la implementación de biofertilizantes reduce costos, mitiga impactos ambientales y fortalece la resiliencia de los agroecosistemas.

En este proyecto, la cepa MSFT3F se destaca como la más prometedora al crecer en las tres fuentes de fósforo evaluadas, lo que la convierte en candidata prioritaria para futuros programas de bioinoculación. No obstante, es necesario realizar ensayos adicionales en condiciones de invernadero y de campo, ya que la eficiencia observada en laboratorio puede variar en suelos con factores como pH, competencia microbiana o disponibilidad de carbono. Esta limitación ha sido señalada por Wu, Zhou y Wang [1] y por autores que trabajaron con *Mortierella* [44] quienes recomiendan validar la viabilidad de los inoculantes bajo condiciones reales de cultivo antes de su escalamiento.

Los resultados obtenidos en Rancho Piña reafirman que los MSF nativos constituyen una estrategia viable para reducir la dependencia de fertilizantes químicos en el cultivo de piña [10], [47]. La identificación de cepas altamente eficientes abre la posibilidad de establecer un banco microbiano para ensayos de propagación y aplicación en campo, contribuyendo así a la producción agrícola sostenible en Santander de Quilichao [48], [49], [50].

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos evidencian la viabilidad del uso de microorganismos solubilizadores de fósforo como estrategia biotecnológica en el cultivo de piña, al favorecer la disponibilidad de este nutriente en suelos con baja fertilidad, alta acidez, y aunque el contenido de materia orgánica es relativamente alto, la baja CICe limita la retención de nutrientes, lo que coincide con caracterizaciones previas de la zona y resalta la necesidad de mejorar la disponibilidad nutricional en estos suelos.

La estandarización de medios de cultivo selectivos permitió el aislamiento eficiente de Microorganismos Solubilizadores de Fósforo (MSF) nativos del agroecosistema *Ananas comosus*. Se formularon medios sólidos con distintas fuentes de fósforo insoluble (Ca, Al y Fe), ajustando el pH según la solubilidad de cada compuesto y adicionando agentes antimicrobianos selectivos. El protocolo microbiológico, basado en diluciones seriadas, incubación controlada y uso de indicadores de pH, permitió obtener colonias diferenciables y funcionales. Esta metodología representa una herramienta clave para la identificación de cepas con potencial uso en biofertilización y manejo sostenible del fósforo en sistemas agrícolas.

De los tres muestreos realizados (Figura 2), se obtuvieron 66 morfotipos de microorganismos dando como resultado, 43 UFC/mL para el morfotipo 48 y 2 UFC/mL para los otros 16 morfotipos.

Los 9 morfotipos MSF evaluados presentaron fósforo disponible de hasta 76,67 mg/L, siendo la cepa MSFT1A la más eficiente en cuanto a porcentaje de solubilización de fósforo a pH 4,2.

De las cepas evaluadas, todas tienen la característica de crecer en mínimo dos medios de cultivo con diferente fuente de fósforo; siendo la cepa MSFT3F, dentro de los microorganismos obtenidos en el proyecto, la única que crece en las tres fuentes de fósforo y obtiene un registro de concentración de fósforo de 60,8 mg/L en el medio con fosfato de calcio (P-Ca) a pH 4,2. Este resultado la posicionó como el segundo aislamiento con mayor valor de fósforo disponible entre los registros presentados en la Tabla 1.

Los resultados mostraron una mayor UFC/mL en el medio Agar Nutritivo (AN) y menor en Papa Agar Dextrosa (PDA) (Figura 3); el medio P-Fe se encuentra en segundo lugar, seguido de P-Ca y P-Al en cuanto a UFC/mL [18].

Estos hallazgos respaldan el uso de bacterias solubilizadoras como una estrategia biotecnológica en crecimiento, especialmente en regiones con acceso limitado a fertilizantes fosfatados. Su capacidad para transformar fósforo insoluble en formas asimilables por las plantas las posiciona como una alternativa prometedora para mejorar la nutrición fosfórica en cultivos [28], [29].

En cuanto a la implementación del sistema de control en el biorreactor se obtuvo que, de manera continua durante siete días, demostró su viabilidad para el proceso de solubilización. Sin embargo, la corrosión de los componentes electrónicos sensibles, causada por la presencia de H_2S y mercaptanos en el biogás, limitó el monitoreo de variables fundamentales como CO_2, temperatura y presión. Estos resultados evidencian la necesidad de implementar estrategias que aumenten la resistencia de los sistemas de control frente a ambientes corrosivos, para asegurar una supervisión adecuada y la optimización del proceso.

El fósforo es crucial para promover el crecimiento vegetal, en consonancia con su naturaleza esencial para el desarrollo vegetal.

Referencias

[1] Z. Wu, Y. Zhou, y M. Wang, "Spatial differentiation and influencing factors of effective phosphorus in cultivated soil in the water source area of the mid-route of South-to-North water transfer project," *Front. Microbiol.*, vol. 15, art. n.º 1463291, 2024, doi: 10.3389/fmicb.2024.1463291.

[2] J. Nabati, A. Nezami, A. Yousefi, E. Oskoueian, A. Oskoueian, y M. J. Ahmadi-Lahijani, "Biofertilizers containing plant growth promoting rhizobacteria enhance nutrient uptake and

improve the growth and yield of chickpea plants in an arid environment," *Sci. Rep.*, vol. 15, art. n.º 8331, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-93070-w.

[3] M. A. Bhat *et al.*, "Mineral and soil nutrients in plant health: A prospective study of iron and phosphorus in plant growth and development," *Curr. Issues Mol. Biol.*, vol. 46, n.º 6, pp. 5194–5222, 2024, doi: 10.3390/cimb46060312.

[4] M. Islam *et al.*, "A critical review of soil phosphorus dynamics and biogeochemical processes to unlock soil phosphorus reserves," *Adv. Agron.*, vol. 185, pp. 153–249, 2024, doi: 10.1016/bs.agron.2024.02.004.

[5] Y. Lei, Y. Kuai, M. Guo, H. Zhang, Y. Yuan, y H. Hong, "Phosphate-solubilizing microorganisms for soil health and ecosystem sustainability: A forty-year scientometric analysis (1984–2024)," *Front. Microbiol.*, vol. 16, 2025, doi: 10.3389/fmicb.2025.1546852.

[6] S. Zulfiqar, R. Gu, Y. Liu, y Y. Zhang, "From genes to traits: Maximizing phosphorus use efficiency in crop plants," *Front. Plant Sci.*, vol. 16, art. n.º 1527547, 2025, doi: 10.3389/fpls.2025.1527547.

[7] M. Henao-Galvis, "Evaluación participativa de un microorganismo solubilizador de fósforo como alternativa biológica en el cultivo de tomate bajo invernadero en suelos ácidos de Pacho," trabajo de grado, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, 2024.

[8] J. Williamson, A. C. Matthews, y B. Raymond, "Competition and association, but not phosphorus availability, determine the benefits of root-associated phosphate-solubilizing bacteria for maize (*Zea mays*)," *Access Microbiol.*, vol. 5, art. n.º 000543.v3, 2022, doi: 10.1099/acmi.0.000543.v3.

[9] L. R. Ruiz Mosquera y X. A. Ruiz Erazo, "Greenhouse gases (GHG) in the agricultural sector: a case study for the department of Cauca," *I+T+C Investigación, Tecnología y Ciencia*, vol. 1, n.º 19, 2025, doi: 10.57173/ritc.v1n19a2.

[10] N. Q. Khuong, N. V. Tuong, L. N. T. Xuan, L. T. M. Thu, L. T. Quang, y N. T. Phong, "Phosphorus-solubilizing bacterial endophytes, *Burkholderia silvatlantica* L-VT09 and N-VT06, in improving characteristics of acid sulfate soil and pineapple yield," *Chil. J. Agric. Res.*, vol. 83, n.º 6, p. 666, 2023, doi: 10.4067/S0718-58392023000600666.

[11] T. N. Huu *et al.*, "Selection of phosphate-solubilizing strains from purple non-sulfur bacteria isolated from acid sulfate soils cultivated with pineapple," *Malays. Appl. Biol.*, vol. 53, n.º 2, pp. 114–124, 2024, doi: 10.55230/mabjournal.v53i2.2881.

[12] A. Córdoba-Bautista, J. Ojeda-Morales, M. Hernández-Rivera, J. Martínez-Vásquez, y R. Martínez-Pereyra, "Available phosphorus in two organic sources by the action of phosphate-solubilizing bacteria isolated from soil cultivated with pineapple (*Ananas comosus*)," *Kuxulkab'*, vol. 18, n.º 35, 2012, doi: 10.19136/kuxulkab.a18n35.251.

[13] Laboratorios A-L de México S.A., "Bioestimulantes en cultivo de piña," *Boletín Informativo*, n.º 209, sep. 2022.

[14] Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), *Estudio general de suelos y zonificación de tierras: departamento del Cauca, escala 1:100.000*. Bogotá, Colombia: IGAC, 2009.

[15] Laboratorio de Suelos del Cauca, *Folleto informativo de servicios del Laboratorio de Suelos del Cauca*. Cauca, Colombia, 2025.

[16] Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), *Análisis de muestras en el Laboratorio Nacional de Suelos (PC-AGR-01, versión 2)*. Bogotá, Colombia: IGAC, 2023. Consultado: 10 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.igac.gov.co/sites/default/files/listadomaestro/pc-agr-01_v2_analisis_de_muestras_en_el_laboratorio_nacional_de_suelos.pdf

[17] A. I. Muhammad, A. F. Olaniran, E. A. Olowolafe, M. A. Yakubu, y A. U. Abdullahi, "Critical phosphorus values for tomato (*Solanum lycopersicum* L.) determined using Mehlich 3, Olsen, and Bray II extractants in Sudan Savanna soils," *Front. Agron.*, vol. 5, 2023, doi: 10.3389/fagro.2023.1181045.

[18] M. T. Madigan, K. S. Bender, D. H. Buckley, y D. A. Stahl, *Brock Biology of Microorganisms*, 16.ª ed. New Jersey, NJ, USA: Pearson Education, 2021.

[19] J. L. Kornacki, E. T. Ryser, C. M. Mangione, y H. M. Wehr, Eds., *Standard Methods for the Examination of Dairy Products*, 18.ª ed. Washington, DC, USA: American Public Health Association, 2024.

[20] N. J. Perafán, B. S. Duarte, y I. Bravo, "Caracterización de microorganismos solubilizadores de fósforo con respecto a algunas propiedades químicas del suelo en el agroecosistema asociado de mora de Castilla (*Rubus* spp.) y hortalizas," en *Memorias del XVI Congreso Latinoamericano y XII Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo*, Cartagena, Colombia: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, 2004.

[21] E. I. García-Bravo y A. M. Guatapi-Yachimba, "Diseño e implementación de un prototipo para un sistema de medición, análisis y purificador de gases contaminantes en el aire utilizando Arduino y Ubidots IoT," trabajo de grado, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, 2023.

[22] J. L. Figueroa-Sanabria, "Diseño y ensamble de un biorreactor automatizado para el proceso de fermentación del cacao," trabajo de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), Bogotá, Colombia, 2023.

[23] A. Alvarez Cardona, D. E. Girón-Lerma, y H. A. Quintero-Vallejo, "Diseño de un sensor de nivel ultrasónico con aplicación en tanques reservorios de agua de los sistemas piscícolas," trabajo de grado, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia, 2020.

[24] C. Hernández-Gamboa, G. C. Figueiredo, F. M. Vezzani, F. C. Ferreira, y C. Bayer, "Active plant biomass inputs influence the functioning of the pore system in no-tillage soils," *Geoderma*, vol. 434, art. n.º 116477, 2023, doi: 10.1016/j.geoderma.2023.116477.

[25] E. V. Ramos-Cabrera, "Investigación de microorganismos promotores del crecimiento vegetal en cultivos de interés agronómico mediante análisis metagenómico y microbiológico," tesis doctoral, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina, 2018, doi: 10.35537/10915/67081.

[26] C. B. Lobo, M. S. Juárez-Tomás, E. Viruel, M. A. Ferrero, y M. E. Lucca, "Development of low-cost formulations of plant growth-promoting bacteria to be used as inoculants in beneficial agricultural technologies," *Microbiol. Res.*, vol. 219, pp. 12–25, 2019, doi: 10.1016/j.micres.2018.10.012.

[27] A. A. Bekkar y S. Zaim, "Phosphate solubilization and the enhancement of chickpea growth by new rhizospheric microorganisms *Bacillus tequilensis* and *Trichoderma orientale*," *Arch. Biol. Sci.*, vol. 75, pp. 419–429, 2023, doi: 10.2298/ABS230823034B.

[28] Y. Waday, E. Aklilu, M. Bultum, y V. Ancha, "Optimization of soluble phosphate and IAA production using response surface methodology and ANN approach," *Heliyon*, vol. 8, art. n.º e12224, 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e12224.

[29] A. T. M. Espinosa, "Biodisponibilidad del fósforo en la rizósfera de café y cultivos alimentarios por actividad bacteriana," *Temas Agrarios*, vol. 29, pp. 22–39, 2024, doi: 10.21897/v2m77468.

[30] A. A. Patiño-Forero, F. Méndez, y D. Zuluaga, "Automation of a composting plant," *I+T+C Investigación, Tecnología y Ciencia*, vol. 1, n.º 17, 2023. [En línea]. Disponible en: https://revistas.unicomfacauca.edu.co/ojs/index.php/itc/article/view/400

[31] I. G. A. Negara, D. S. Anakottapary, I. B. G. Widiantara, L. P. I. Midiani, T. G. T. Nindhia, y I. G. N. Santhiarsa, "Integrated microcontroller MQ sensors for monitoring biogas: Advancements in methane and hydrogen sulfide detection," *Jurnal Teknosains*, vol. 13, n.º 2, 2024, doi: 10.22146/teknosains.91936.

[32] D. Cueto, J. A. Baeza, D. Gabriel, y M. Baeza, "Development and application of a 3D-printed microfluidic sulfide-selective sensor for online monitoring of a hydrogenotrophic sulfidogenic bioreactor," *Nanomaterials*, vol. 16, n.º 3, art. n.º 209, 2026, doi: 10.3390/nano16030209.

[33] R. Castro, G. Gabriel, D. Gabriel, X. Gamisans, y X. Guimerà, "Development of a flow-cell bioreactor for immobilized sulfidogenic sludge characterization using electrochemical H_2S microsensors," *Chemosphere*, vol. 358, art. n.º 141959, 2024, doi: 10.1016/j.chemosphere.2024.141959.

[34] E. Firew, D. Woyessa, y D. Muleta, "Phosphate solubilization potential of rhizosphere fungi isolated from plants in Jimma Zone, Southwest Ethiopia," *Int. J. Microbiol.*, vol. 2016, art. n.º 5472601, 2016, doi: 10.1155/2016/5472601.

[35] L. Moreno-Conn, M. López-Casallas, y F. M. C. Barrera, "Phosphate solubilization by *Burkholderia* species isolated from Oxisols from the Colombian high plains," *Cienc. Tecnol. Agropecuaria*, vol. 22, art. n.º e1897, 2021, doi: 10.21930/rcta.vol22num2art:1897.

[36] F. Khan, A. B. Siddique, S. Shabala, M. Zhou, y C. Zhao, "Phosphorus plays key roles in regulating plants' physiological responses to abiotic stresses," *Plants*, vol. 12, art. n.º 2861, 2023, doi: 10.3390/plants12152861.

[37] I. Beltrán-Medina, F. Romero-Perdomo, L. Molano-Chavez, A. Y. Gutiérrez, A. M. M. Silva, y G. Estrada-Bonilla, "Inoculation of phosphate-solubilizing bacteria improves soil phosphorus mobilization and maize productivity," *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, vol. 126, pp. 21–34, 2023, doi: 10.1007/s10705-023-10268-y.

[38] D. Torres-Cuesta *et al.*, "Phosphate-solubilizing bacteria with low-solubility fertilizer improve soil P availability and yield of kikuyu grass," *Microorganisms*, vol. 11, art. n.º 1748, 2023, doi: 10.3390/microorganisms11071748.

[39] F. Z. Aliyat, M. Maldani, M. El Guilli, L. Nassiri, y J. Ibijbijen, "Phosphate-solubilizing bacteria isolated from phosphate solid sludge and their ability to solubilize three inorganic phosphate forms: Calcium, iron, and aluminum phosphates," *Microorganisms*, vol. 10, art. n.º 980, 2022, doi: 10.3390/microorganisms10050980.

[40] E. J. Posso, M. Sánchez de Prager, y C. A. Cisneros Rojas, "Organic acids production by rhizosphere microorganisms isolated from a Typic Melanudands and its effects on the inorganic phosphates solubilization," *Acta Agron.*, vol. 66, n.º 2, pp. 241–247, 2017, doi: 10.15446/acag.v66n2.56148.

[41] L. R. Massucato *et al.*, "Enzymatic activity and organic acid profile of phosphate-solubilizing bacterial inoculants and their agronomic effectiveness in soybean," *Microorganisms*, vol. 13, art. n.º 2016, 2025, doi: 10.3390/microorganisms13092016.

[42] M. S. Khan, A. Zaidi, y E. Ahmad, "Mechanism of phosphate solubilization and physiological functions of phosphate-solubilizing microorganisms," en *Phosphate Solubilizing Microorganisms: Principles and Application in Agriculture*, M. S. Khan, A. Zaidi, y J. Musarrat, Eds. Cham, Switzerland: Springer, 2014, pp. 31–62, doi: 10.1007/978-3-319-08216-5_2.

[43] K. Anand, B. Kumari, y M. A. Mallick, "Phosphate solubilizing microbes: An effective and alternative approach as biofertilizers," *Int. J. Pharm. Pharm. Sci.*, vol. 8, pp. 37–40, 2016. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/297047840_Phosphate_solubilizing_microbes_An_effective_and_alternative_approach_as_biofertilizers

[44] Y. Sang *et al.*, "Phosphorus-solubilizing capacity of *Mortierella* species isolated from rhizosphere soil of a poplar plantation," *Microorganisms*, vol. 10, art. n.º 2361, 2022, doi: 10.3390/microorganisms10122361.

[45] K. Kiprotich *et al.*, "Unveiling the roles, mechanisms and prospects of soil microbial communities in sustainable agriculture," *Discover Soil*, vol. 2, pp. 1–17, 2025, doi: 10.1007/s44378-025-00037-4.

[46] F. A. Silva, F. Ahmad, A. C. Santos, J. R. Sousa, y X. Wang, "Phosphorus-solubilizing microorganisms: A key to sustainable agriculture," *Agriculture*, vol. 13, n.º 2, art. n.º 462, 2023, doi: 10.3390/agriculture13020462.

[47] T. N. Huu, T. T. N. Giau, P. N. Ngan, T. T. B. Van, y N. Q. Khuong, "The potential of phosphorus-solubilizing purple nonsulfur bacteria isolated from acid sulfate soils to improve soil properties, nutrient uptake, and pineapple (*Ananas comosus* L. Merrill) yield under acid stress conditions," *Sci. World J.*, vol. 2022, art. n.º 8693479, 2022, doi: 10.1155/2022/8693479.

[48] D. Herrán Martínez, "Phosphate-solubilizing bacteria as a strategy for achieving food security," tesis, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, 2025.

[49] C. Lara Mantilla y J. L. Negrete Peñata, "Efecto de un bioinoculante a partir de consorcios microbianos nativos fosfatos solubilizadores, en el desarrollo de pastos Angleton (*Dichantium aristatum*)," *Rev. Colomb. Biotecnol.*, vol. 17, n.º 1, pp. 121–127, 2015, doi: 10.15446/rev.colomb.biote.v17n1.50741.

[50] A. García, J. Angulo, M. M. Martínez, y V. Gutiérrez, "Effect of phosphate-solubilizing bacteria and compost on the nutritional characteristics of the oil palm crop (*Elaeis guineensis* Jacq.) in Casanare, Colombia," *Agron. Colomb.*, vol. 30, n.º 2, pp. 274–281, 2012.