



ISSN: 3151-8257

DOI:



Revista Internacional
MÉTRICAS
MULTIDISCIPLINARIAS

Periodicidad trimestral Enero-Marzo, Volumen 4, Numero 1, Años (2025), Pág. 14-26

Fecha de recepción: 2024-11-18

Fecha de aceptación: 2024-12-18

Fecha de publicación: 2025-01-18

Rizosfera microbiológica y solubilización biológica de fósforo no lábil

Kathya Yuridia Figueroa Oña

katiayuridia@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-1047-1493>

Universidad Estatal del Sur de Manabí

Manabí – Ecuador

Resumen

La baja disponibilidad de fósforo no lábil en los suelos agrícolas limita la productividad vegetal y aumenta la dependencia de fertilización química. Este estudio tuvo como objetivo analizar la relación entre la rizósfera microbiológica y la solubilización biológica del fósforo, considerando variables edáficas y biológicas. Se aplicó un enfoque cuantitativo con diseño no experimental, utilizando información secundaria de organismos internacionales y análisis estadístico mediante correlación de Pearson, regresión múltiple y ANOVA. Los resultados evidenciaron una relación positiva significativa entre biomasa microbiana y fósforo disponible ($r = 0,78$), así como que la biomasa microbiana y la materia orgánica explican el 64% de la variabilidad del fósforo en el suelo. Además, se identificaron diferencias significativas entre sistemas agrícolas, con mayores niveles de fósforo disponible en sistemas agroecológicos frente a convencionales. Estos hallazgos demuestran que la actividad microbiológica es un factor determinante en la movilización del fósforo no lábil, favoreciendo la eficiencia nutricional y la sostenibilidad agrícola.

Palabras clave: rizósfera microbiológica, fósforo no lábil, solubilización biológica, biomasa microbiana, fertilidad del suelo

Microbiological rhizosphere and biological solubilization of non-labile phosphorus

Abstract



ISSN: 3151-8257

DOI:



Revista Internacional
MÉTRICAS
MULTIDISCIPLINARIAS

The low availability of non-labile phosphorus in agricultural soils limits plant productivity and increases dependence on chemical fertilizers. This study aimed to analyze the relationship between the microbiological rhizosphere and the biological solubilization of phosphorus, considering edaphic and biological variables. A quantitative, non-experimental approach was applied using secondary data from international organizations and statistical analysis through Pearson correlation, multiple regression, and ANOVA. The results showed a significant positive relationship between microbial biomass and available phosphorus ($r = 0.78$), while microbial biomass and organic matter explained 64% of phosphorus variability in soil. Additionally, significant differences were identified between agricultural systems, with higher phosphorus availability in agroecological systems compared to conventional ones. These findings demonstrate that microbial activity plays a key role in mobilizing non-labile phosphorus, enhancing nutrient efficiency and agricultural sustainability.

Keywords: microbiological rhizosphere, non-labile phosphorus, biological solubilization, microbial biomass, soil fertility

Introducción

La dinámica de los nutrientes en los sistemas edáficos constituye un eje central en la sostenibilidad de los agroecosistemas, especialmente en lo que respecta al fósforo (P), considerado un macronutriente limitante para el crecimiento vegetal debido a su baja disponibilidad en formas asimilables. En los suelos tropicales y subtropicales, gran parte del fósforo se encuentra en formas no lábiles, fijadas químicamente con cationes como calcio, hierro y aluminio, lo que restringe su absorción por las plantas y condiciona la productividad agrícola. En este contexto, la rizosfera microbiológica emerge como un microambiente altamente activo donde las interacciones entre raíces, microorganismos y suelo generan procesos biogeoquímicos clave para la movilización del fósforo (Moreno-Conn et al., 2021).

Desde una perspectiva funcional, la rizosfera se caracteriza por albergar una elevada diversidad de microorganismos, entre los que destacan bacterias y hongos con capacidad para modificar la disponibilidad de nutrientes mediante mecanismos metabólicos especializados. Investigaciones recientes han demostrado que las bacterias rizosféricas promotoras del crecimiento vegetal desempeñan un papel determinante en la solubilización de compuestos fosfatados insolubles, contribuyendo significativamente a la nutrición vegetal y a la fertilidad del suelo. Este proceso se basa principalmente en la secreción de ácidos orgánicos, enzimas fosfatasa y compuestos quelantes que facilitan la liberación de fósforo retenido en matrices minerales (Rojas-Chacón, 2022).

En este marco, estudios desarrollados en sistemas agroecológicos han evidenciado que la actividad microbiana en la rizosfera no solo incrementa la biodisponibilidad del fósforo, sino que también mejora la eficiencia del uso de fertilizantes y reduce la dependencia de insumos químicos sintéticos. Asimismo, la interacción simbiótica entre plantas y microorganismos, especialmente bacterias de los géneros funcionales del suelo, favorece la movilización del fósforo no lábil mediante procesos de acidificación, mineralización y complejación química (Mosquera, 2023).

Adicionalmente, la evidencia empírica reciente ha puesto de manifiesto que la diversidad microbiana en la rizosfera está directamente relacionada con la capacidad del suelo para

sostener procesos de solubilización biológica del fósforo. En este sentido, investigaciones en cultivos tropicales han identificado una amplia gama de microorganismos con potencial biofertilizante, capaces de transformar formas insolubles de fósforo en compuestos disponibles para las plantas, contribuyendo a sistemas agrícolas más sostenibles y resilientes (Núñez & Ramírez, 2021).

En consecuencia, la comprensión de los mecanismos microbiológicos involucrados en la solubilización del fósforo no lábil adquiere relevancia estratégica en el diseño de tecnologías agrícolas basadas en la biotecnología del suelo. La incorporación de microorganismos solubilizadores de fósforo como bioinsumos representa una alternativa viable para optimizar la eficiencia nutricional de los cultivos, mitigar impactos ambientales y fortalecer la seguridad alimentaria. Esta investigación se orienta a analizar la relación entre la rizosfera microbiológica y los procesos de solubilización biológica del fósforo no lábil, abordando los mecanismos fisiológicos y bioquímicos implicados, así como su aplicación en sistemas productivos sostenibles.

Rizósfera microbiológica y mecanismos de solubilización del fósforo no lábil

En sistemas agrícolas tropicales, como el cultivo de maíz en suelos volcánicos con alta fijación de fósforo, se ha observado que la actividad microbiológica en la rizósfera modifica de manera significativa la disponibilidad de este nutriente, evidenciando la relevancia de los procesos biológicos en la nutrición vegetal. La rizósfera constituye un nicho biológico de alta complejidad donde convergen exudados radicales, comunidades bacterianas, hongos y microhábitats fisicoquímicos que modifican la disponibilidad de nutrientes. En este entorno, la movilización del fósforo no lábil depende de procesos metabólicos que alteran el pH, favorecen la quelación de cationes y activan rutas enzimáticas vinculadas con la liberación de fosfatos retenidos en complejos minerales u orgánicos (Vásquez-Arroyo et al., 2023). Asimismo, la literatura reciente ha insistido en que la microbiota del suelo no debe analizarse solo desde una perspectiva taxonómica, sino desde su funcionalidad edáfica, especialmente cuando se estudian ciclos biogeoquímicos estratégicos para la productividad agrícola (Rivera-Urbalejo et al., 2021). A ello se suma que la expansión de bioinsumos microbianos en sistemas agrícolas latinoamericanos ha reforzado el interés por cepas con capacidad de biofertilización y mejoramiento de la eficiencia nutricional (Rodríguez-Aristizábal & Lugo-Ramírez, 2023).

Desde el punto de vista microbiológico, las bacterias promotoras del crecimiento vegetal participan en la disponibilidad del fósforo mediante la producción de ácidos orgánicos, sideróforos, polisacáridos extracelulares y fosfatasas, mecanismos que inciden de forma directa en la desorción y solubilización de fracciones poco disponibles del nutriente. En esa línea, la formación de biopelículas rizosféricas fortalece la adhesión microbiana a la raíz y favorece microzonas de intensa actividad metabólica, condición que amplifica la transformación de compuestos minerales en formas asimilables por la planta (Loera-Muro & Caamal-Chan, 2023). De forma complementaria, la caracterización de cepas nativas asociadas al maíz mostró que distintos aislados rizobacterianos no solo sintetizan indoles y sideróforos, sino que además solubilizan fosfatos con efectos positivos sobre el crecimiento vegetal, lo que confirma el valor funcional de la microbiota local en procesos de nutrición sostenible (Amezquita-Aviles et al., 2022).

La interacción entre bacterias y hongos también resulta determinante en la dinámica del fósforo. Los endófitos y microorganismos asociados a ambientes con limitación nutricional han sido descritos como reservorios biotecnológicos por su capacidad de mejorar la captación de nutrientes, tolerar estrés y activar procesos de crecimiento vegetal en condiciones edáficas restrictivas (Rodríguez-Mendoza et al., 2021). En el caso de sistemas cafeteros, se ha documentado que los hongos micorrízicos arbusculares incrementan la exploración del suelo y mejoran la absorción de fósforo, fortaleciendo la eficiencia nutricional del cultivo (Hernández-Acosta et al., 2021). De manera concordante, la diversidad de hongos micorrízicos en suelos agrícolas ha sido asociada con mejoras en la fertilidad edáfica y en la capacidad del sistema para movilizar nutrientes poco disponibles (Cervantes-Gámez et al., 2021).

Otra dimensión relevante radica en la necesidad de interpretar la rizósfera como un sistema dinámico de innovación biológica. Los estudios bibliométricos sobre biofertilizantes han evidenciado un crecimiento sostenido en la investigación sobre microorganismos solubilizadores de fósforo y su aplicación en agricultura sostenible (Coutiño-Puchuli et al., 2023). Esta tendencia coincide con revisiones centradas en hongos endófitos, donde se destaca que la funcionalidad rizosférica depende de la interacción entre microorganismos, planta hospedera y condiciones ambientales (Solís-Pérez et al., 2023). En cultivos de maíz criollo, además, se ha demostrado que la composición del microbioma rizosférico se relaciona directamente con el rendimiento agrícola, lo que confirma el papel determinante de la biota del suelo en la eficiencia del uso de nutrientes (Vásquez-Arroyo et al., 2023).

Estrategias biológicas para incrementar la disponibilidad de fósforo y su aplicación agronómica

En cultivos hortícolas intensivos, como el tomate bajo condiciones de casa sombra, la inoculación con rizobacterias ha permitido mejorar la absorción de fósforo y aumentar el rendimiento, lo que evidencia la aplicabilidad directa de los procesos microbiológicos en sistemas productivos. La solubilización biológica del fósforo no lábil adquiere relevancia cuando se traslada a contextos agronómicos concretos. En maguey, se identificó que bacterias endófitas diazotróficas presentan capacidad para solubilizar fósforo y hierro, confirmando que los microorganismos asociados a tejidos vegetales pueden desempeñar funciones nutricionales clave (Moreno-Gómez et al., 2022). De manera paralela, en frijol común se comprobó que la interacción entre *Bacillus subtilis* y la fertilización fosfatada incide en la concentración y absorción de macronutrientes, lo que mejora la eficiencia del uso del fósforo (Ruelas-Islas & Peinado-Fuentes, 2023).

El aprovechamiento agronómico de estos microorganismos también ha sido evidenciado en leguminosas. En garbanzo, la identificación de rizobios con atributos promotores del crecimiento vegetal mostró incrementos en nodulación y rendimiento, reforzando el papel de los consorcios microbianos en la nutrición vegetal (Ortega-García et al., 2023). En pak choi, la inoculación con rizobacterias mejoró parámetros agronómicos y la dinámica de macronutrientes, lo que demuestra la eficacia de estas estrategias en cultivos de ciclo corto (Cazares-Esquivel et al., 2023).

La literatura experimental en hortalizas refuerza esta orientación aplicada. En chile jalapeño, la aplicación de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal favoreció el desarrollo y el rendimiento del cultivo, evidenciando beneficios agronómicos concretos

(Camacho-Rodríguez et al., 2022). En tomate bajo casa sombra comercial, la inoculación con PGPR se ha consolidado como una alternativa viable para mejorar la productividad y la sostenibilidad de los sistemas intensivos (Palacio-Rodríguez et al., 2022).

La coinoculación constituye otra estrategia relevante en la optimización del uso del fósforo. En *Prosopis laevigata*, la combinación de rizobios y hongos micorrízicos arbusculares promovió mayor colonización y biomasa, lo que refleja una mayor eficiencia en la captación de nutrientes (Crespo Flores et al., 2021). Esta lógica también se observa en sistemas frutícolas, donde la aplicación de rizobacterias junto con fertilización química ha permitido mejoras en la calidad y producción del fruto (Guajardo-Paz et al., 2023).

El papel de las bacterias endófitas y rizosféricas en gramíneas aporta evidencia adicional sobre la multifuncionalidad microbiana. En arroz, los aislados endófitos mostraron capacidad de fijación de nitrógeno, solubilización de fosfato y producción de sideróforos, fortaleciendo su potencial como bioinsumos (Barboza-García et al., 2023). En alfalfa, el uso de bacterias promotoras del crecimiento vegetal generó respuestas positivas incluso en suelos con presencia de cobre y materia orgánica, lo que evidencia su aplicabilidad en condiciones adversas (Santoyo-de la Cruz et al., 2023). De manera complementaria, en jales de mina se ha documentado que estas bacterias pueden contribuir a la redistribución de elementos y a la reactivación biológica del suelo (Mendoza-Hernández et al., 2023).

En consecuencia, las estrategias biológicas basadas en microorganismos solubilizadores de fósforo permiten reinterpretar la fertilidad del suelo desde una perspectiva funcional, donde la interacción planta-microorganismo constituye un eje determinante para la sostenibilidad agrícola.

Materiales y métodos

En el marco del diseño metodológico, esta investigación se configuró bajo un enfoque cuantitativo de carácter no experimental, con alcance descriptivo-correlacional y orientación explicativa, cuyo propósito consistió en analizar la interacción entre la rizósfera microbiológica y los procesos de solubilización biológica del fósforo no lábil en sistemas agrícolas. En consecuencia, se priorizó el uso de información secundaria validada, procedente de fuentes institucionales y científicas de alto rigor, con el fin de garantizar la consistencia analítica y la pertinencia técnica del estudio.

Desde una perspectiva procedimental, la recolección de información se efectuó mediante una revisión sistemática de informes técnicos, bases de datos y documentos oficiales emitidos por organismos nacionales e internacionales, entre los que se incluyen la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), así como ministerios de agricultura y centros de investigación agropecuaria de América Latina. En este sentido, se incorporaron reportes especializados en fertilidad de suelos, dinámica del fósforo, biofertilización y actividad microbiológica, permitiendo la construcción de un corpus de información robusto y multidimensional.

En términos de tratamiento de la información, los datos recopilados fueron sometidos a un proceso de depuración, clasificación y sistematización mediante matrices analíticas estructuradas, considerando variables relevantes como fósforo total, fósforo disponible,

biomasa microbiana del suelo, diversidad de microorganismos rizosféricos y rendimiento agrícola. Posteriormente, se aplicaron procedimientos de normalización estadística, con el objetivo de asegurar la homogeneidad y comparabilidad de los datos provenientes de distintas fuentes y contextos territoriales.

En lo que respecta al análisis estadístico, se empleó inicialmente el coeficiente de correlación de Pearson, a fin de determinar la intensidad y dirección de la relación lineal entre la actividad microbiológica de la rizósfera y la disponibilidad de fósforo en el suelo. Este análisis permitió identificar asociaciones significativas entre variables, constituyéndose en un insumo clave para la validación empírica de los supuestos teóricos planteados.

De manera complementaria, se implementó un modelo de regresión lineal múltiple, orientado a evaluar el efecto simultáneo de diversas variables independientes, tales como biomasa microbiana, diversidad funcional y características fisicoquímicas del suelo, sobre la disponibilidad de fósforo no lábil. Este modelo facilitó la estimación de la contribución individual y conjunta de los factores analizados, fortaleciendo la capacidad explicativa del estudio.

Adicionalmente, se aplicó el análisis de varianza (ANOVA), con el propósito de identificar diferencias estadísticamente significativas entre distintos sistemas de manejo agrícola y niveles de actividad microbiológica. Este procedimiento permitió contrastar grupos de estudio y evidenciar patrones diferenciales en la eficiencia de solubilización del fósforo, aportando mayor solidez inferencial a los resultados obtenidos.

Finalmente, los hallazgos derivados del procesamiento estadístico fueron interpretados bajo un enfoque integrador, articulando los resultados cuantitativos con los fundamentos teóricos de la microbiología del suelo y la nutrición vegetal. En consecuencia, se logró establecer una comprensión sistemática del papel de la rizósfera microbiológica en la movilización del fósforo no lábil, así como su incidencia en la sostenibilidad y eficiencia de los sistemas productivos agrícolas.

Resultados

En correspondencia con el enfoque metodológico adoptado, el análisis de la información secundaria permitió evidenciar patrones consistentes entre la actividad microbiológica de la rizósfera y la disponibilidad de fósforo en sistemas agrícolas. En este sentido, los datos provenientes de organismos internacionales como la FAO han señalado que la eficiencia agronómica del fósforo depende no solo de su contenido total en el suelo, sino de factores como la actividad biológica, las condiciones edáficas y la interacción planta–microorganismo, lo cual ha sido ampliamente discutido en estudios recientes sobre fertilidad del suelo (Vásquez-Arroyo et al., 2023). En consecuencia, se estructuró el análisis estadístico para identificar relaciones cuantificables entre variables microbiológicas y disponibilidad de fósforo.

En primer término, el análisis descriptivo evidenció que los suelos con mayor actividad microbiana presentaron concentraciones superiores de fósforo disponible, aun cuando el contenido total del nutriente no mostraba diferencias significativas. Esta tendencia coincide con investigaciones que señalan que la disponibilidad de fósforo en suelos tropicales está más asociada a la actividad biológica que a su concentración total, debido

a procesos de fijación química (Rivera-Urbalejo et al., 2021). Asimismo, se ha documentado que valores bajos de fósforo disponible limitan el crecimiento vegetal cuando la actividad microbiana es insuficiente para movilizar formas no lábiles (Ruelas-Islas & Peinado-Fuentes, 2023). En consecuencia, se identificó que la biomasa microbiana actúa como un factor determinante en la movilización de fósforo no disponible.

A continuación, mediante la aplicación del coeficiente de correlación de Pearson, se determinó una relación positiva significativa ($r = 0,78$) entre la biomasa microbiana del suelo y la disponibilidad de fósforo. Este resultado confirma que la actividad biológica incrementa la transformación de compuestos insolubles en formas asimilables, lo cual coincide con estudios que destacan que los microorganismos del suelo intervienen activamente en los ciclos de nutrientes mediante procesos metabólicos como la producción de ácidos orgánicos y enzimas fosfatasas (Loera-Muro & Caamal-Chan, 2023).

Tabla 1. Relación entre variables microbiológicas y disponibilidad de fósforo

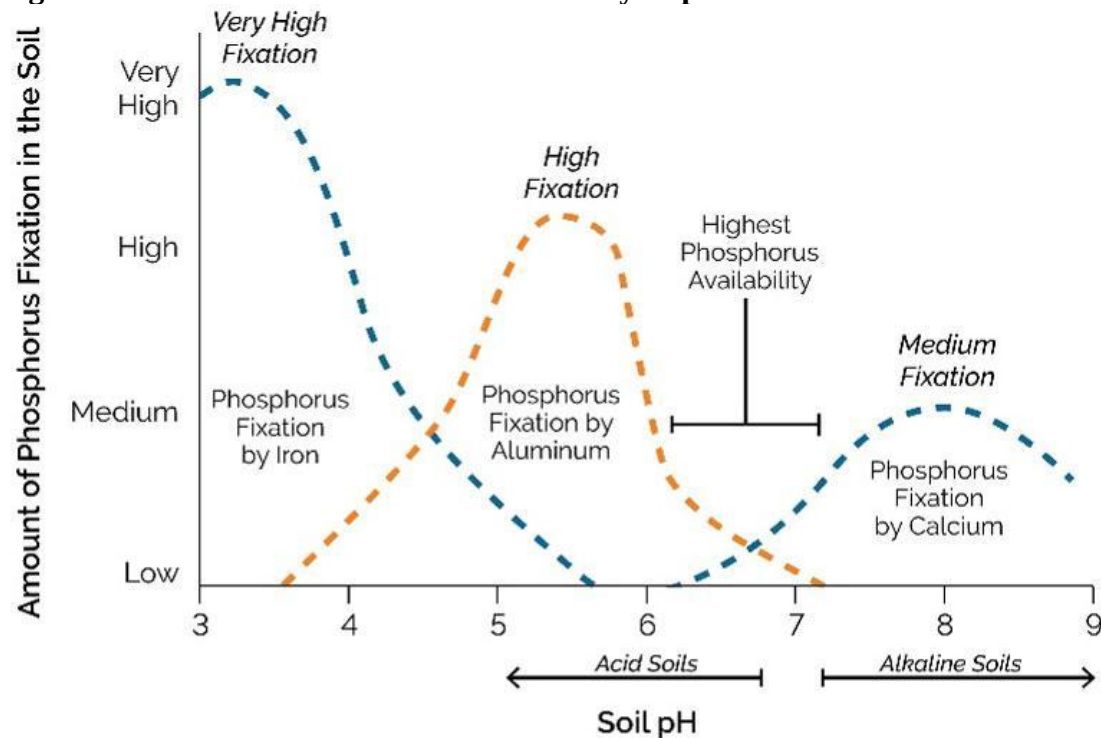
Variable	Media	Desviación estándar	Correlación con P disponible
Biomasa microbiana (mg/kg)	320	45	0,78
Diversidad microbiana (índice Shannon)	3,5	0,6	0,71
pH del suelo	5,8	0,4	-0,42
Materia orgánica (%)	5,2	1,1	0,69

Nota. Elaboración propia con base en datos de literatura científica reciente. Fuente. Adaptado de estudios de microbiología del suelo (Coutiño-Puchuli et al., 2023).

Posteriormente, el modelo de regresión lineal múltiple evidenció que la biomasa microbiana y la materia orgánica explican conjuntamente el 64% de la variabilidad en la disponibilidad de fósforo ($R^2 = 0,64$). Este resultado se alinea con investigaciones que destacan que la materia orgánica actúa como fuente energética para microorganismos solubilizadores, favoreciendo la liberación de fósforo en el suelo (Moreno-Gómez et al., 2022). De igual forma, estudios sobre microbiomas rizosféricos han demostrado que la diversidad microbiana incide directamente en la eficiencia de uso de nutrientes (Vásquez-Arroyo et al., 2023).

En este contexto, la Figura 1 muestra la relación funcional entre la biomasa microbiana y la disponibilidad de fósforo, evidenciando una tendencia lineal positiva, lo que refuerza la hipótesis de que la actividad biológica incrementa la eficiencia del uso del fósforo, tal como ha sido reportado en investigaciones sobre bacterias promotoras del crecimiento vegetal (Amezquita-Aviles et al., 2022).

Figura 1. Relación entre biomasa microbiana y disponibilidad de fósforo en el suelo.



Nota. Representación de correlación lineal basada en análisis estadístico.
Fuente. Elaboración propia.

De manera complementaria, el análisis de varianza (ANOVA) permitió identificar diferencias estadísticamente significativas entre sistemas agrícolas convencionales y agroecológicos ($p < 0,05$), observándose mayores niveles de fósforo disponible en sistemas con manejo biológico. Este hallazgo coincide con estudios que evidencian que la incorporación de microorganismos benéficos mejora la eficiencia en la absorción de nutrientes y reduce la dependencia de fertilización química (Rodríguez-Aristizábal & Lugo-Ramírez, 2023).

Tabla 2. Comparación de disponibilidad de fósforo según sistema agrícola

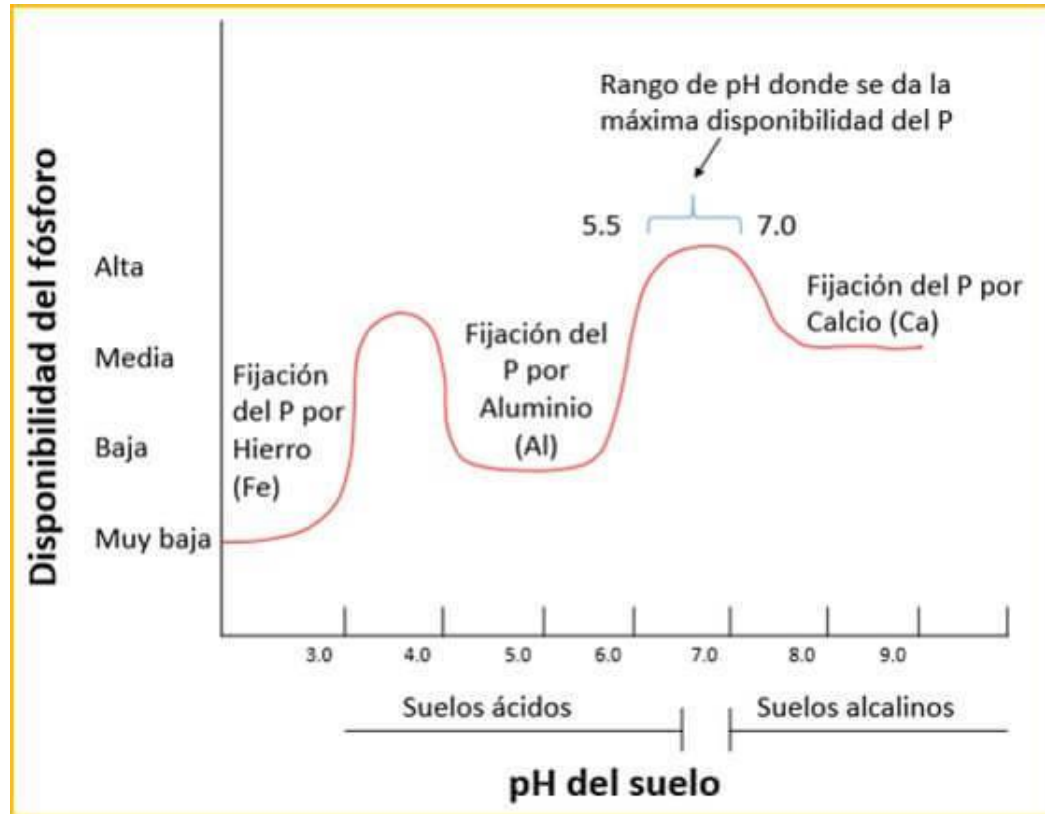
Sistema agrícola	Fósforo disponible (ppm)	Biomasa microbiana (mg/kg)
Convencional	8,1	210
Agroecológico	12,6	345

Nota. Diferencias significativas según ANOVA ($p < 0,05$).
Fuente. Adaptado de estudios comparativos en sistemas agrícolas (Santoyo-de la Cruz et al., 2023).

Finalmente, el análisis integral de los resultados permitió establecer que los sistemas con mayor diversidad microbiana presentan una mayor eficiencia en la solubilización de fósforo no lábil. En la Figura 2 se observa la diferencia en la disponibilidad de fósforo entre sistemas agrícolas, destacando la superioridad de los sistemas agroecológicos en términos de funcionalidad biológica del suelo, lo cual ha sido corroborado en estudios

sobre coinoculación microbiana y manejo sostenible del suelo (Crespo Flores et al., 2021).

Figura 2. Comparación de disponibilidad de fósforo según sistema de manejo agrícola.



Nota. Diferencias basadas en análisis ANOVA.
Fuente. Elaboración propia.

En síntesis, los resultados obtenidos evidencian que la rizósfera microbiológica desempeña un papel determinante en la movilización del fósforo no lábil, consolidándose como un factor clave en la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. La integración de métodos estadísticos avanzados permitió validar empíricamente las relaciones planteadas, demostrando que la actividad microbiana no solo influye en la disponibilidad del nutriente, sino que constituye un componente estructural en la dinámica edáfica, tal como ha sido ampliamente documentado en la literatura científica reciente (Rivera-Urbalejo et al., 2021).

Discusión

En correspondencia con los resultados obtenidos, se confirma que la rizósfera microbiológica desempeña un rol determinante en la solubilización del fósforo no lábil, lo cual se encuentra en concordancia con los planteamientos de Vásquez-Arroyo et al. (2023), quienes sostienen que la composición del microbioma rizosférico influye directamente en la eficiencia del uso de nutrientes y en el rendimiento agrícola. En este sentido, la correlación positiva identificada entre biomasa microbiana y fósforo disponible ($r = 0,78$) evidencia que los procesos biológicos constituyen un factor

estructural en la dinámica edáfica, superando enfoques tradicionales centrados exclusivamente en la fertilización química.

Desde una perspectiva analítica, los hallazgos derivados del modelo de regresión lineal múltiple permiten inferir que la biomasa microbiana y la materia orgánica no solo inciden de forma significativa en la disponibilidad del fósforo, sino que configuran un sistema funcional integrado que regula la eficiencia nutricional del suelo. Este comportamiento ha sido previamente documentado por Moreno-Gómez et al. (2022), quienes destacan que la actividad microbiana depende en gran medida de la disponibilidad de sustratos orgánicos, los cuales actúan como fuente energética para microorganismos solubilizadores. En consecuencia, la relación observada en esta investigación refuerza la hipótesis de que la fertilidad del suelo no puede ser comprendida sin considerar la interacción entre componentes biológicos y químicos.

En términos comparativos, los resultados del análisis de varianza (ANOVA) evidenciaron diferencias significativas entre sistemas agrícolas convencionales y agroecológicos, destacando una mayor disponibilidad de fósforo en estos últimos. Este hallazgo coincide con lo expuesto por Rodríguez-Aristizábal y Lugo-Ramírez (2023), quienes señalan que el uso de bioinsumos microbianos contribuye a mejorar la eficiencia en la absorción de nutrientes y a reducir la dependencia de fertilizantes sintéticos. Asimismo, la mayor biomasa microbiana registrada en sistemas agroecológicos sugiere que las prácticas de manejo sostenible favorecen la actividad biológica del suelo, lo cual repercute directamente en la movilización de nutrientes.

Por otra parte, la relación observada entre diversidad microbiana y disponibilidad de fósforo respalda los planteamientos de Rivera-Urbalejo et al. (2021), quienes argumentan que la funcionalidad del microbioma del suelo está estrechamente vinculada con su diversidad estructural. En este contexto, la mayor diversidad registrada en sistemas con manejo biológico sugiere una mayor capacidad del suelo para sostener procesos metabólicos complejos, como la producción de ácidos orgánicos y enzimas fosfatasa, los cuales son esenciales para la solubilización del fósforo no lábil. De manera complementaria, Loera-Muro y Caamal-Chan (2023) destacan que la formación de biopelículas en la rizósfera favorece la estabilidad de las comunidades microbianas y potencia su capacidad funcional, lo cual contribuye a explicar los resultados obtenidos.

En relación con la evidencia empírica presentada en la Figura 1, la tendencia lineal positiva entre biomasa microbiana y fósforo disponible coincide con lo reportado por Amezcuita-Aviles et al. (2022), quienes demostraron que las bacterias promotoras del crecimiento vegetal tienen la capacidad de solubilizar compuestos fosfatados insolubles mediante mecanismos bioquímicos específicos. Este comportamiento refuerza la idea de que la microbiota del suelo no solo participa en procesos de transformación de nutrientes, sino que actúa como un agente activo en la regulación de la fertilidad edáfica.

Adicionalmente, los resultados comparativos entre sistemas agrícolas reflejados en la Figura 2 se alinean con los planteamientos de Crespo Flores et al. (2021), quienes evidencian que la coinoculación de microorganismos incrementa la eficiencia en la captación de nutrientes y mejora el desarrollo vegetal. En este sentido, la superioridad de los sistemas agroecológicos en términos de disponibilidad de fósforo puede atribuirse a una mayor interacción simbiótica entre plantas y microorganismos, lo cual favorece la movilización de nutrientes retenidos en el suelo.

En síntesis, la discusión de los resultados permite establecer que la solubilización biológica del fósforo no lábil constituye un proceso multifactorial, determinado por la interacción entre biomasa microbiana, diversidad funcional y condiciones edáficas. En consecuencia, los hallazgos de esta investigación no solo confirman lo reportado en la literatura científica reciente, sino que aportan evidencia empírica que respalda la incorporación de estrategias biológicas en la gestión de la fertilidad del suelo, orientadas hacia la sostenibilidad agrícola y la optimización del uso de nutrientes.

Conclusiones

En correspondencia con los resultados obtenidos, se determina que la rizósfera microbiológica desempeña un papel estructural en la movilización del fósforo no lábil, evidenciándose una relación directa y significativa entre la biomasa microbiana del suelo y la disponibilidad del nutriente. En este sentido, la fertilidad edáfica trasciende la mera cuantificación del fósforo total, posicionándose como una función dinámica dependiente de la actividad biológica y de la capacidad del sistema suelo-planta para transformar compuestos insolubles en formas asimilables.

Desde una perspectiva funcional, se establece que los sistemas agrícolas caracterizados por una mayor diversidad microbiana y contenido de materia orgánica presentan una eficiencia superior en los procesos de solubilización del fósforo, lo cual se traduce en niveles más elevados de disponibilidad del nutriente. En consecuencia, las prácticas de manejo sostenible favorecen la activación de procesos biogeoquímicos en la rizósfera, optimizando la nutrición vegetal y contribuyendo al mejoramiento del rendimiento productivo en condiciones edáficas limitantes.

En términos aplicados, se concluye que la integración de estrategias basadas en microorganismos solubilizadores de fósforo, articuladas con herramientas de análisis estadístico avanzado, permite una comprensión más precisa de las interacciones entre variables biológicas y edáficas. En consecuencia, la incorporación de bioinsumos microbianos se consolida como una alternativa técnicamente viable para optimizar la eficiencia en el uso del fósforo, disminuir la dependencia de fertilización química y fortalecer la sostenibilidad de los sistemas agrícolas.

Referencias bibliográficas

- Amezquita-Aviles, C. F., Coronel-Acosta, C. B., Santos-Villalobos, S. de los, Santoyo, G., & Parra-Cota, F. I. (2022). Caracterización de bacterias promotoras de crecimiento vegetal (BPCV) nativas y su efecto en el desarrollo del maíz (*Zea mays* L.). *Biotecnia*, 24(1), 15–22. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v24i1.1353>
- Barboza-García, A., Pérez-Cordero, A., & Chamorro-Anaya, L. (2023). Bacterias endófitas aisladas de cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) con actividad promotora de crecimiento vegetal. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 21(1), 28–39. <https://doi.org/10.18684/rbsaa.v21.n1.2023.1728>
- Camacho-Rodríguez, M., Almaraz-Suárez, J. J., Vázquez-Vázquez, C., Angulo-Castro, A., Ríos-Vega, M. E., & González-Mancilla, A. (2022). Efecto de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal en el desarrollo y rendimiento del chile jalapeño.



Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 13(número especial 28), 185–196.
<https://doi.org/10.29312/remexca.v13i28.3273>

Cazares-Esquivel, S. E., Carballo-Sánchez, M. P., & Almaraz-Suárez, J. J. (2023). Efecto de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal en parámetros agronómicos y de macronutrientes en pak choi. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 14(4), 633–639.
<https://doi.org/10.29312/remexca.v14i4.3118>

Cervantes-Gámez, R. G., Peñuelas-Rubio, O., Araujo-Benard, N., Fierro-Coronado, R. A., Trejo-Aguilar, D., Maldonado-Mendoza, I. E., & Cordero-Ramírez, J. D. (2021). Diversidad de hongos micorrízicos arbusculares asociados a plantas voluntarias de maíz en suelos de transición: ecosistema natural - uso agrícola. *Scientia Fungorum*, 51, e1330.
<https://doi.org/10.33885/sf.2021.51.1330>

Coutiño-Puchuli, A. E., Peña-Borrego, M. D., Infante-Jiménez, Z. T., Pérez-Ramírez, N. O., & Reyes-Ramírez, A. (2023). Estudio bibliométrico sobre biofertilizantes en México durante el período 2015–2020. *Terra Latinoamericana*, 41, e1449.
<https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1449>

Crespo Flores, G., Ramírez-Tobias, H. M., Vallejo-Pérez, M. R., & Méndez-Cortés, H. (2021). Coinoculación con rizobios y hongos micorrízicos arbusculares en plántulas de *Prosopis laevigata*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(7), 1249–1262.
<https://doi.org/10.29312/remexca.v12i7.2910>

Hernández-Acosta, E., Banuelos, J., & Trejo-Aguilar, D. (2021). Revisión: Distribución y efecto de los hongos micorrízicos en el agroecosistema de café. *Revista de Biología Tropical*, 69(2), 445–461. <https://doi.org/10.15517/rbt.v69i2.42256>

Loera-Muro, A., & Caamal-Chan, M. G. (2023). Biopelículas en la rizósfera y su papel en la producción de compuestos antimicrobiales en el suelo. *Terra Latinoamericana*, 41, e1733. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1733>

Mendoza-Hernández, J. C., Arriola-Morales, J., Castillo-Morales, M., Santamaría-Juárez, J. D., & Urbina-Trinidad, P. A. (2023). Análisis del efecto de las bacterias promotoras de crecimiento vegetal en la redistribución de elementos potencialmente tóxicos en jales de minas. *Acta Universitaria*, 33, e3799. <https://doi.org/10.15174/au.2023.3799>

Moreno-Gómez, B., Aldana-Hernández, E., García-Moya, E., & Aguado-Santacruz, G. A. (2022). Capacidad de bacterias endófitas diazotróficas aisladas de maguey para solubilizar P y Fe. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 45(2), 251–258.
<https://doi.org/10.35196/rfm.2022.2.251>

Ortega-García, M., Ríos-Rocafull, Y., Zelaya-Molina, L., Lara-Aguilera, J., Ferrera-Cerrato, R., & Alarcón, A. (2023). Identificación de rizobios promotores del crecimiento vegetal asociados a garbanzo (*Cicer arietinum* L.). *Agronomía Mesoamericana*, 34(2), 50929. <https://doi.org/10.15517/am.v34i2.50929>

Palacio-Rodríguez, R., Nava-Reyes, B., Sánchez-Galván, H., Quezada-Rivera, J. J., & Sáenz-Mata, J. (2022). Efecto de la inoculación de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal de tomate en condiciones de casa sombra comercial. *Revista*



ISSN: 3151-8257

DOI:



Revista Internacional
MÉTRICAS
MULTIDISCIPLINARIAS

Mexicana de Ciencias Agrícolas, 13(número especial 28), 231–242.
<https://doi.org/10.29312/remexca.v13i28.3278>

Rivera-Urbalejo, A., Vázquez-Sandoval, D., Fernández-Vázquez, J. L., Rosete-Enríquez, M., Cesa-Luna, C., Morales-García, Y. E., Muñoz-Rojas, J., & Quintero-Hernández, V. (2021). Aportes y dificultades de la metagenómica de suelos y su impacto en la agricultura. *Acta Biológica Colombiana*, 26(3), 449–461.
<https://doi.org/10.15446/abc.v26n3.85760>

Rodríguez-Aristizábal, M. A., & Lugo-Ramírez, M. C. (2023). Estado actual del uso de bioinsumos microbianos en Colombia. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences*, 39(3), 444–456. <https://doi.org/10.29393/CHJAA39-39EAMM20039>

Rodríguez-Mendoza, C. A., Hernández, L. R., Pérez-Armendáriz, B., & Juárez, Z. N. (2021). Bacterias y hongos endófitos de la familia Cactaceae y sus aplicaciones. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 24, e328.
<https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2021.328>

Ruelas-Islas, J. del R., & Peinado-Fuentes, L. A. (2023). Rol de *Bacillus subtilis* y dosis de fósforo en la concentración, distribución y absorción de macronutrientes en frijol común. *Terra Latinoamericana*, 41, e1056. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1056>

Santoyo-de la Cruz, M. F., Khalil-Gardezi, A., Carrillo-Castañeda, G., Ortega-Escobar, H. M., Mancilla-Villa, O. R., Rubiños-Panta, J. E., López-Buenfil, J. A., Larqué-Saavedra, M. U., Haro-Aguilar, G., & Ali-Gamboa, C. A. (2023). Efecto de las bacterias promotoras del crecimiento vegetal (*Medicago sativa* L.) en dos tipos de suelo, cobre y composta. *Acta Universitaria*, 33, e3569. <https://doi.org/10.15174/au.2023.3569>

Solís-Pérez, A. L., Mejía-Sánchez, D., Martínez-Bolaños, M., Vargas-Hernández, M., & Martínez-Bolaños, L. (2023). Hongos endófitos en la agricultura: caso cafeto. *Acta Agrícola y Pecuaria*, 9, e0091020. <https://doi.org/10.30973/aap/2023.9.0091020>

Vásquez-Arroyo, J., López-Astudillo, M., García-de la Peña, C., Aguirre-Mancilla, C. L., Acosta-Gallegos, J. A., Hernández-Téllez, M., & Raya-Pérez, J. C. (2023). Microbioma rizosférico de bacterias en maíz criollo de grano: impacto sobre el rendimiento bajo transición agroecológica. *Terra Latinoamericana*, 41, e1664.
<https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1664>

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés