

# Biofertilizantes en la producción agrícola sostenible con énfasis en caña de azúcar: una revisión

Biofertilizers in sustainable agricultural production with an emphasis on sugarcane: a review

César A. Hernández-Pérez<sup>1</sup> , Josafhat Salinas-Ruiz<sup>1</sup> , Aleida Selene Hernández-Cázares<sup>1</sup> ,  
Armando Guerrero-Peña<sup>2</sup> , Daniel Arturo Rodríguez-Lagunes<sup>3</sup> , Joel Velasco-Velasco<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup>Colegio de Postgraduados, Campus Córdoba, Km. 348 Carretera Federal Córdoba-Veracruz, Congregación Manuel León, Amatlán de los Reyes, 94953, Veracruz, México.

<sup>2</sup>Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco, Periférico Carlos A. Molina S/N, Carretera Cárdenas-Huimanguillo km 3.5, 86500, H. Cárdenas, Tabasco, México.

<sup>3</sup>Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Región Orizaba-Córdoba, Carretera Peñuelas Amatlán Kilómetro 177, 94500, Córdoba, Veracruz, México.

\*Autor para correspondencia: joel42ts@colpos.mx

## RESUMEN

Una alternativa ecológica y económica para la producción de cultivos, es el uso de abonos orgánicos también conocidos como biofertilizantes. Este estudio tiene como objetivo identificar el uso de biofertilizantes en caña de azúcar, mediante el análisis bibliométrico con el uso de la base de datos Scopus durante el período de 1982 a mayo de 2023. Los criterios de la primera búsqueda fueron biofertilizer y crop, se encontraron 1,847 artículos publicados, con incremento (143.5 %) en los últimos diez años de la producción científica. La segunda búsqueda fue definida para identificar artículos relacionados con los biofertilizantes en caña de azúcar, y se determinó como criterio los términos: biofertilizer y sugarcane, esta nueva búsqueda arrojó un total de 136 referencias. Para el mapeo de co-ocurrencias se utilizó el programa VOSviewer versión 1.16.17. En conclusión, el uso de los biofertilizantes puede ser una alternativa para eficientar el uso de los fertilizantes químicos. Esta puede ser una estrategia eficaz y sostenible para aumentar el rendimiento, mientras se conserva y mejora la calidad del suelo. La presente revisión podría sugerir realizar investigaciones para el desarrollo de biofertilizantes y las estrategias de aplicación que permitan reducir la cantidad de fertilizantes químicos utilizados y eficienten el uso de nutrientes por las plantas, mientras conservan y/o mejoran la fertilidad de los suelos y la sostenibilidad ambiental.

## PALABRAS CLAVE

Orgánico, eficiencia, Scopus, búsqueda

## ABSTRACT

Organic fertilizers, also known as biofertilizers, are an ecological and economical alternative to crop production. This study aims to analyze the use of biofertilizers in sugarcane through bibliometric analysis based on the Scopus database, covering the period from 1982 to May 2023. The initial search used the keywords biofertilizer and crop, yielding 1,847 published articles. In the last ten years, scientific production on this topic has increased (143.5%). A second, more specific search was conducted to identify articles related to biofertilizers in sugarcane, using the terms biofertilizer and sugarcane, which resulted in 136 references. For the mapping of co-occurrences, VOSviewer (version 1.16.17) was used. In conclusion, biofertilizers can serve as an alternative to enhance the efficiency of chemical fertilizers. This approach offers an effective and sustainable strategy to increase crop yield while preserving and improving soil quality. Furthermore, this review highlights the need for research focused on the development of biofertilizers and application strategies that minimize chemical fertilizer use, optimize nutrient uptake by plants, and contribute to soil fertility and environmental sustainability.

## KEYWORDS

Organic, efficiency, Scopus, search

### Fecha de recepción:

10 de mayo de 2024

### Fecha de aceptación:

5 de octubre de 2024

### Disponible en línea:

7 de abril de 2025

Este es un artículo en acceso abierto que se distribuye de acuerdo a los términos de la licencia Creative Commons.



### Reconocimiento-

NoComercial-

CompartirIgual 4.0

Internacional

(CC BY-NC-SA 4.0)

## INTRODUCCIÓN

La aplicación de fertilizantes químicos ha sido la práctica agrícola más utilizada en la agricultura para lograr rendimientos máximos en la producción de cultivos (Pirttilä et al., 2021); sin embargo, la producción de fertilizantes químicos tiene un alto costo en términos de uso de energía e impacto ambiental, representando una amenaza al causar problemas socioeconómicos y ecológicos (Maçik et al., 2020). Los biofertilizantes y abonos orgánicos son una alternativa a los fertilizantes solubles para promover la productividad y crecimiento de la vegetación, así como, la fertilidad del suelo, a la par que incrementan la productividad del cultivo (Reddy et al., 2023), al reducir la necesidad de fertilizantes nitrogenados convencionales como la urea, el sulfato de amonio y el nitrato de amonio, entre otros (de Mendonça et al., 2018).

La aplicación de biofertilizantes es utilizada para promover el crecimiento y rendimiento de la planta. Además, se ha demostrado que mejoran el crecimiento del sistema radicular, degradan los materiales dañinos, aumentan la supervivencia de las plántulas mediante el suministro de nutrientes y mantiene la salud ambiental y la productividad de los suelos (Zainuddin et al., 2022). El uso continuo de biofertilizantes durante 3 a 4 años, permite al suelo recuperarse del daño causado por el uso excesivo de fertilizantes químicos, ya que los inóculos parentales son suficientes para el crecimiento y la multiplicación de microorganismos (Bumandalai y Tserennadmid, 2019).

El efecto del uso de biofertilizantes ha sido estudiado en especies como maíz (*Zea mays* L.) (Dineshkumar et al., 2019), trigo (*Triticum aestivum* L.) (Mahato et al., 2018), ginseng americano (*Panax quinquefolius* L.) (Liu et al., 2020) y arroz (*Oryza sativa* L.) (Wangiyana et al., 2021). En caña de azúcar ha sido reportado por Mulyani et al. (2017), de Mendonça et al. (2018) y Rakkiyappan et al. (2001). Por tanto, el objetivo de este estudio fue identificar el uso de biofertilizantes en caña de azúcar, mediante el análisis bibliométrico usando la base de datos Scopus durante el período de 1982 a mayo 2023.

### Fertilización química

Los fertilizantes químicos desempeñan un papel importante en la producción agrícola, convirtién-

dose en una importante fuente para el aumento del rendimiento de los cultivos (Zheng et al., 2020). La aplicación de fertilizantes químicos es la práctica agrícola para satisfacer la demanda nutricional alta de los cultivos; sin embargo, se utiliza una gran cantidad para lograr rendimientos satisfactorios (Crusciol et al., 2020). Este exceso también provoca un incremento de nitrato en el suelo, que contamina las aguas subterráneas (Zhang et al., 2020). Además, conduce a la toxicidad de los metales en el suelo, disminuye la eficiencia del uso de nutrientes, provoca la acidificación del suelo, lo que a su vez a través del tiempo afecta negativamente el crecimiento y la productividad de los cultivos (Jazmín-Marín, 2019). Así mismo, el tema de la degradación del suelo se convierte en una preocupación ambiental y social (Núñez-Delgado et al., 2020). De ahí surge la necesidad de utilizar nuevas estrategias de fertilización, que permitan disminuir los problemas ecológicos que han generado los fertilizantes solubles en los últimos años.

### Fertilización orgánica

La fertilización orgánica es una alternativa eficaz, debido a que estas prácticas fomentan la producción de cultivos, excluyendo el uso de plaguicidas y fertilizantes sintéticos, y apuntan al equilibrio en la dinámica del suelo (Bhunja et al., 2021). Los biofertilizantes son algunos subproductos que pueden utilizarse en la restauración para promover la vegetación y regeneración del suelo (Núñez-Delgado et al., 2015), además de que contienen microorganismos vivos que cuando se aplican al suelo, semillas o superficies de plantas, colonizan la rizosfera o los tejidos internos de la planta e inducen su crecimiento (Pirttilä et al., 2021). El uso de los biofertilizantes está ligado con el mantenimiento de la productividad de los suelos agrícolas, y los beneficios en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, las cuales se reflejan en un considerable aumento del rendimiento de los cultivos (Antomarchi et al., 2015). Los beneficios del uso de biofertilizantes, son la promoción del crecimiento de las plantas, el vínculo endosimbiótico que crean los microorganismos con las raíces de las plantas y el microbioma del suelo, de tal manera que, mejoran la fertilidad del suelo y la protección de los cultivos contra patógenos y otras plagas (Alvarez et al., 2021).

En los últimos años los biofertilizantes han cobrado gran importancia por diversas razones; desde el punto de vista ecológico y económico, debido a los altos costos de los fertilizantes minerales; además de que aumentan las emisiones de gases de efecto invernadero por el uso de combustibles fósiles en su producción (Pirttilä et al., 2021). Se reconoce que debido a la escasez de materias primas para la producción de fertilizantes químicos, ha crecido la tendencia en el reaprovechamiento de los residuos urbanos, industriales y agrícolas, con la intención de limpiar el ambiente y generar productos alternativos para el uso agrícola, como los fertilizantes organominerales (Moreno-Reséndez et al., 2014). De acuerdo a esto, durante mucho tiempo, ha existido la necesidad de desarrollar fertilizantes alternativos, de bajo costo, eficaces y respetuosos con el medio ambiente, que funcionen sin alterar la naturaleza (Mahanty et al., 2017).

Sin duda, el uso de planes de nutrición con biofertilizantes solos y en combinación con fertilizante mineral, tiene mayor potencial en términos de producción, pero su mayor impacto ecológico es la disminución del uso de fertilizantes minerales, con un efecto benéfico sobre la fertilidad natural del suelo (Volverás-Mambusca et al., 2020). Así, la combinación de abonos orgánicos y fertilizante resulta económica al considerar su efecto sinérgico sobre la producción de cultivos (Nawaz et al., 2017).

### **Sinergia entre fertilizante químico y fertilizantes orgánicos**

Los fertilizantes químicos y orgánicos tienen composición y función diferentes, mientras que el fertilizante mineral proporciona grandes cantidades de nutrientes que la planta necesita para crecer, los fertilizantes orgánicos contienen carbón orgánico, que es un ingrediente esencial para un suelo fértil (García de la Rosa, 2020). Ni los insumos minerales ni los orgánicos pueden proporcionar estas dos propiedades por sí solos; no obstante, aplicar estos en combinación, crea por lo general beneficios adicionales (Zainuddin et al., 2022). Anli et al. (2020) mencionan que en situaciones de sequía, aplicar residuos de cosecha en combinación con fertilizantes químicos puede aliviar el estrés de humedad y permiten a los cultivos captar los nutrientes efectivamente de los fertilizantes más eficientemente. Finalmente,

el uso de fertilizantes químicos en combinación con orgánicos, tiene efectos positivos en la actividad microbiana, además, se ha demostrado que esto mantiene mejor la fertilidad del suelo en comparación con la aplicación de fertilizantes químicos u orgánicos solos (Wan et al., 2021).

### **Importancia de la caña de azúcar**

La caña de azúcar (*Saccharum* spp.) es un cultivo ampliamente distribuido en el mundo y en la actualidad se produce en más de 130 países y territorios. Brasil ocupa el primer lugar con 19.9% de la producción mundial, seguido de India con 18.4%, Unión Europea con 9.4% y México ocupa el séptimo lugar con 3.6% (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2023).

El cultivo de la caña de azúcar en términos de generación de valor, se constituye como el segundo más importante del país, solo después de la cadena de valor del maíz. La producción de caña de azúcar se divide en seis regiones: Noroeste (Sinaloa), Pacífico (Nayarit, Colima, Jalisco y Michoacán), Golfo (Veracruz, Tabasco, Oaxaca), Centro (Morelos y Puebla), Noreste (Tamaulipas y San Luis Potosí) y Sur (Campeche, Chiapas y Quintana Roo) (Senties-Herrera et al., 2014). Durante la zafra 2023-2024, se generaron 46,093,814 toneladas de caña de azúcar, lo que a su vez se convirtió en 4,703,547 toneladas de azúcar, lo que ubica a México como octavo productor de azúcar en el mundo (Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar, 2024).

Existen muchos trabajos de investigación sobre el uso de biofertilizantes en otros cultivos, no así para el cultivo de caña de azúcar, sobre el cual hay poca investigación sobre el beneficio de su empleo y manejo. Es así que, los estudios sobre el uso de abonos orgánicos van de la mano con la mezcla de fertilizantes minerales (Nawaz et al., 2017).

Investigaciones realizadas utilizando biofertilizantes con adición de fertilizantes minerales en caña de azúcar han demostrado los beneficios económicos y ambientales que se obtienen al usar este tipo de combinaciones. Rodríguez et al. (2017), mencionan que en rendimiento no se presentan diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos donde se aplicó composta comparado con fertilizantes minerales, aunque ambos tratamientos superaron al testigo abso-

luto, con cero compostas y sin fertilización mineral. Mientras que, Cairo et al. (2017), indican una relación entre los indicadores de calidad del suelo y el rendimiento de la caña de azúcar con aplicación de abono orgánico y fertilizante mineral, se incrementó el índice de calidad de suelo, viéndose reflejado en el rendimiento de la caña de azúcar y su impacto económico. De igual manera, Alemán et al. (2019) mencionan que sus mejores resultados en productividad de caña se dieron con la aplicación de abonos orgánicos de residuos avícolas y fertilizante mineral.

Sin duda, la mejor opción pudiera ser la combinación de abonos orgánicos con fertilizante mineral, ya que este último complementa los componentes de los abonos que no lleguen a satisfacer las necesidades nutricionales de la caña de azúcar (Rodríguez et al., 2017).

## MATERIALES Y MÉTODOS

Los documentos de análisis, periodo 1980-2023 se obtuvieron del metabuscador Scopus. Los criterios de búsqueda fueron: biofertilizer y crop, los cuales generaron 1,847 referencias; posteriormente se realizó una segunda búsqueda específica de artículos relacionados con los biofertilizantes en caña de azúcar, para ello se tomaron los criterios de búsqueda: biofertilizer, sugarcane. Esta nueva búsqueda arrojó un total de 136 referencias y se realizaron mapas de co-ocurrencias utilizando el *software* VOSviewer versión 1.16.17.

Se llevó a cabo un análisis de co-ocurrencia de palabras clave y términos académicos en los títulos y resúmenes de las publicaciones, siguiendo un método de co-ocurrencia, mostrando sólo los elementos conectados con otros, el método de normalización-fuerza de asociación (FA), se estableció el método de conteo completo, con un número de registros de cada termino  $\geq 10$  y un tamaño mínimo de clúster de 15 (van Eck y Waltman, 2010). Con base en la terminología retenida se elaboraron los mapas para la visualización de la red. El algoritmo fue diseñado para que los términos que co-ocurrieran estuvieran posicionados más cerca unos de otros, con burbujas más grandes en aquellos con mayor frecuencia. Aquellos términos irrelevantes para el mapa fueron eliminados (Yeung et al., 2017).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Análisis bibliométrico

La producción científica relacionada con el uso de biofertilizantes en el período de 1982 a 2023, mostró un considerable aumento a partir del 2015 (Figura 1), debido probablemente, a la estrecha relación con la escasez de materias primas para la producción de fertilizantes químicos (Berezyuk et al., 2021)

En los últimos diez años la producción científica sobre biofertilizantes aumentó 143.5% (Figura 1). Durante el 2023 ya existen 205 publicaciones, que representan el 101.9% respecto a 2022. En 2015, la Asamblea General de las Naciones Unidas, estableció una visión transformadora hacia la sostenibilidad económica, social y ambiental, denominada “La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible” (United Nations, 2015), lo cual pudo haber sido la pauta para encontrar alternativas a los fertilizantes químicos para un desarrollo sostenible en la agricultura.

Los países que lideran con mayor número de publicaciones en el tema de biofertilizantes son: India, Brasil, China, Pakistán, Estados Unidos, Egipto, Irán, Indonesia, y España, con más de cincuenta publicaciones por país. México, ocupa el onceavo lugar con 48, dentro de ellas destacan estudios sobre biofertilizantes promotores de crecimiento vegetal (23 publicaciones), y en menor proporción el uso de biofertilizantes en caña de azúcar (4 publicaciones). Esto evidencia los pocos estudios realizados en el cultivo de caña de azúcar en México.

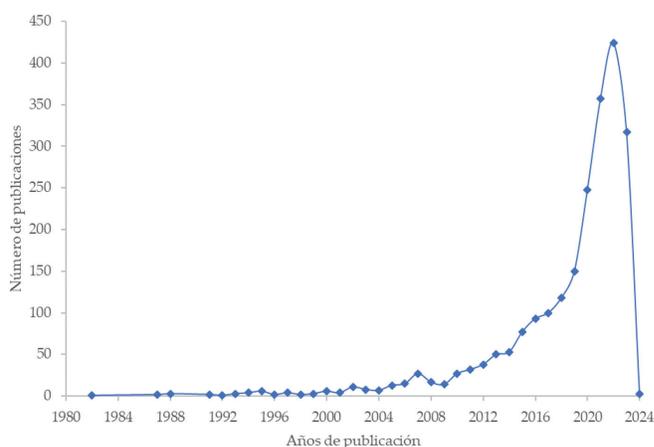


Figura 1. Producción científica relacionada con el uso de biofertilizantes en diferentes cultivos durante el periodo 1982 a 2023



**Cuadro 1. Uso de biofertilizantes en distintos cultivos.**

Cultivo	Biofertilizante	Referencia	Beneficio
Girasol	Ceniza de bagazo de caña de azúcar y residuos agrícolas con fijadores de nitrógeno, así como bacterias que disuelven fosfatos	Alzain et al. (2023)	Mejóro las características fisio-bioquímicas y la productividad de la planta
Maíz	Bacterias solubilizantes de zinc en perlas de alginato	Sultan et al. (2023)	Mejores parámetros de crecimiento de las plantas y un mayor contenido de zinc
Trigo	Bacterias de la rizosfera del trigo	Zahra et al. (2023)	Promovieron el crecimiento de las plantas bajo estrés salino y contribuyeron significativamente a mejorar el rendimiento del grano
Espinaca	Materiales portadores orgánicos y cepas de rizobacterias <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Paenibacillus polymyxa</i> y <i>Bacillus megaterium</i>	Safdar et al. (2022)	Se observó un aumento en la acumulación de NPK, hierro y zinc en los brotes
Fresa	Vermicomposta en combinación con <i>Azotobacter</i>	Reddy et al. (2023)	Mejoraron significativamente el crecimiento, el rendimiento y los atributos de calidad
Albahaca	Micorrizas y aplicación foliar de ácido ascórbico (AsA)	Hamidi et al. (2023)	Aumentó la altura de la planta, el contenido de clorofila y aceites esenciales

orgánica y nutrientes de origen mineral (Wang et al., 2020). La principal ventaja de la combinación es que con una sola aplicación se incorpora materia orgánica y nutrientes por lo que se favorece la asimilación de éstos (Rodríguez et al., 2017). Mientras que Anli et al. (2020) mencionan que, en situaciones de sequía, aplicar residuos de cosecha en combinación con fertilizante puede aliviar el estrés de humedad y permitir a los cultivos captar los nutrientes de los fertilizantes más eficientemente.

Por lo tanto, ni los insumos minerales ni los orgánicos pueden proporcionar estas dos propiedades por sí solos. Más aún, la aplicación combinada de fertilizantes químicos y fertilizantes orgánicos aumenta simultáneamente el rendimiento de los cultivos y mantiene un equilibrio ecológico apropiado. Es así que el estudio sobre el uso de abonos orgánicos, normalmente va de la mano con la mezcla de fertilizantes minerales (Nawaz et al., 2017).

Por otro lado, la red de coocurrencias del uso de biofertilizantes en caña azúcar muestra que las palabras más mencionadas y centrales son: “dose”, “substrate” y “strain”, alrededor de las cuales se observan como términos secundarios: organic matter, combination, soil health, isolate, root, alternative, vinasse, process, entre otros, los cuales, presentan una fuerte relación y ocupan un lugar en los clústeres de la red de palabras

clave (Figura 3). Los principales resultados señalan que los biofertilizantes en caña de azúcar tienen estrecha relación entre los indicadores de calidad del suelo y el rendimiento de la caña de azúcar con aplicación de abono orgánico y fertilizante, incrementando el índice de calidad de suelo, viéndose reflejado en el rendimiento del cultivo y su impacto económico (Cairo et al., 2017). Además, los biofertilizantes ayudan a la disminución de problemas sanitarios y aumentan la tolerancia a estrés abiótico (Mahmud et al., 2021). En consecuencia, el uso de los biofertilizantes puede ser

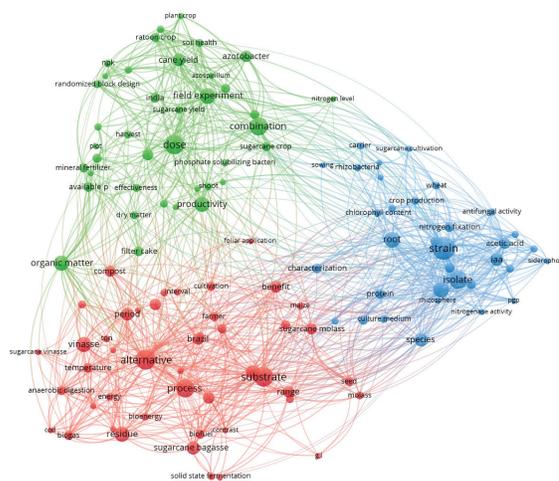


Figura 3. Red de coocurrencias de las palabras biofertiliz y sugarcane en el uso de biofertilizantes en caña de azúcar, según el metabuscador Scopus del periodo 1982 a 2023.

una alternativa para remplazar los fertilizantes químicos como una forma eficaz y sostenible de aumentar el rendimiento de la caña de azúcar y como agentes que reducen la cantidad de químicos sintéticos en el suelo (Singh et al., 2023).

El uso de biofertilizantes en caña de azúcar ha sido utilizado en 4 importantes grupos: promotores del crecimiento vegetal, fijadores de nitrógeno, captadores de fósforo y solubilizadores de fosfatos (Cuadro 2). Debido, a que presentan varias funciones ventajosas en las rizosferas vegetales; la solubilización de nutrientes hasta la supresión de enfermedades de las plantas, fijación de nitrógeno y composición fitoquímica mejorada (Aloo et al., 2021).

En la actualidad, microorganismos endofíticos de las plantas pueden utilizarse como promotores del crecimiento vegetal, tal es el caso de *Bacillus subtilis* el cual fue utilizado para promover significativamente el crecimiento de las plántulas de caña de azúcar, además,

de que, aumentó el contenido de nitrógeno, fósforo y potasio (Di et al., 2023). De igual manera, durante los últimos años la aplicación de biofertilizantes con células bacterianas ha sido una de las prácticas más utilizadas, ya que se considera una alternativa ecológica a los fertilizantes químicos para mejorar la producción de cultivos (Tariq et al., 2022). Por ejemplo, Syaputra et al. (2020), utilizaron bacterias fijadoras de N y solubilizadoras de P para estudiar el efecto sobre la absorción de nutrientes y el crecimiento de la caña de azúcar, en donde, los resultados mostraron que los atributos de absorción de nutrientes (N, P y K) y crecimiento de la caña de azúcar se vieron afectados. A su vez, en un estudio para examinar el efecto de la cepa rizosférica *Acinetobacter* sp. RSC9 sobre el crecimiento de plantas de caña de azúcar, en condiciones de estrés salino, se encontró, que *Acinetobacter* sp. RSC9 ha protegido a la planta del estrés por salinidad y mostró la correspondiente mejora en los parámetros de crecimiento (Patel

**Cuadro 2. Artículos relacionados al uso de diferentes tipos de biofertilizantes en caña de azúcar según el metabuscador Scopus del periodo 1982 a 2023.**

Tipo	Biofertilizante	Dosis	Referencia	Beneficio
Promotores del crecimiento vegetal	<i>Bacillus subtilis</i>	10 <sup>6</sup> UFC/ml	Di et al. (2023)	Aumento del nivel de biomasa de la caña de azúcar.
	Pseudomonas diazotróficas ( <i>P. koreensis</i> CY4 y <i>P. entomophila</i> CN11)	107 UFC ml	Singh et al. (2023)	Aumentaron los parámetros fisiológicos y el contenido de clorofila
Fijadores de nitrógeno	Bacterias fijadoras de N y solubilizadoras de P	100 kg/ha con una población bacteriana de 11.3 x 10 <sup>8</sup> UFC	Syaputra et al. (2020)	Los atributos de absorción de nutrientes (N, P y K) y crecimiento de la caña de azúcar mejoraron
	Cepa <i>Acinetobacter</i> sp. RSC9	106 UFC/ml	Patel et al. (2022)	Protegió a la planta del estrés por salinidad y mostró mejora en los parámetros de crecimiento
Captadores de fósforo	<i>A. niger</i> FS1, <i>Penicillium canescens</i> FS23, <i>Eupenicillium ludwigii</i> FS27, y <i>Penicillium isladicum</i> FS30	3,0, 4,5, 6,0, 7,5 y 9,0 g L	Mendes et al. (2013)	El bagazo suministró el C y el N para la solubilización del fosfato de roca fúngica
Solubilizadores de fósforo	Rocas P y K y materia orgánica (compuestos de lombriz) enriquecidos en N	5,000, 7,500, 10,000 kg/ha	Oliveira et al. (2015)	Aumentaron la productividad de la caña de azúcar

UFC: unidades formadoras de colonias

et al., 2022). Sin lugar a duda, las plantas están relacionadas con una amplia variedad de cepas bacterianas, que desempeñan funciones cruciales en el crecimiento de las plantas, a prevención de enfermedades y la tolerancia al estrés (Wang et al., 2021).

Mientras tanto, en México las publicaciones del uso de biofertilizantes en caña de azúcar son pocas y están orientadas al uso de bacterias diazotróficas (*Azotobacter* y *Azospirillum*) (Nava-López et al., 2017), utilización de melazas de caña de azúcar para aumentar la producción de una cepa de *Bacillus licheniformis* (Mota-Pacheco et al., 2019) y el compostaje de composta de bagazo de caña a nivel comercial (Velázquez et al., 2020). Sin embargo, los hallazgos encontrados son relevantes, ya que se han encontrado efectos positivos en la productividad de caña y en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo por la aplicación de los biofertilizantes (Nawaz et al., 2017).

Los diferentes tipos de biofertilizantes en caña de azúcar se utilizan comúnmente para maximizar el rendimiento del cultivo con un mínimo uso de insumos químicos, además de disminuir el daño ambiental provocado por el uso intensivo de fertilizantes químicos. Sin embargo, los fertilizantes químicos, incluidos los fertilizantes nitrogenados, generalmente se aplican en dosis más altas que las estrictamente necesarias para los cultivos, lo que conlleva al riesgo de pérdida de nutrientes del suelo (Udvardi et al., 2021).

Actualmente existe una gran preocupación por el uso excesivo de fertilizantes químicos en caña de azúcar para una mejor productividad, sin embargo, en los últimos años esto incrementa los costos de producción, además, contamina el ambiente y los mantos acuíferos, por lo que el uso de biofertilizantes en caña de azúcar puede reducir la cantidad de fertilizantes e insecticidas químicos utilizados para aumentar la fertilidad del suelo y la productividad de los cultivos (dos Santos et al., 2020).

## CONCLUSIONES

Los estudios relacionados con el uso de biofertilizantes en los cultivos han aumentado a nivel mundial en la última década. En los últimos diez años el número de publicaciones se incrementó, así en 2023 se triplicó en comparación al 2013. En el caso específico de México,

solo le corresponde el 2.5% de las 1,847 referencias publicadas mundialmente durante el período 1982 a 2023; representado por publicaciones relacionadas con el uso de biofertilizantes promotores de crecimiento vegetal y fijadores de nitrógeno. Esto demuestra que el uso de biofertilizantes ha cobrado gran importancia en los últimos años por diversas razones; desde el punto de vista económico, ecológico y productividad del cultivo.

El análisis de la red de co-ocurrencias de palabras clave del uso de biofertilizantes en diferentes cultivos demostró que los términos con mayor frecuencia fueron "plant growth" y "microorganism", mientras que en segundo plano se encuentran isolate, strain, fertilization, gene, experiment, dose, organic matter, agriculture y manure. Por su parte, el análisis específico del uso de biofertilizantes en caña de azúcar muestra que los términos con más frecuencia fueron "dose", "substrate" y "strain", las cuales están rodeados de los siguientes términos secundarios: organic matter, combination, soil health, isolate, root, alternative, vinasse, process.

Esta revisión vislumbra una gran área de oportunidad para realizar investigación en el cultivo de caña de azúcar evaluando estrategias sostenibles y manejo integrado de la fertilidad del suelo a través de abonos orgánicos, biofertilizantes y fertilizantes minerales.

## AGRADECIMIENTOS

Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), por la beca para realizar estudios de doctorado en Innovación Agroalimentaria Sustentable en el Colegio de Postgraduados Campus Córdoba.

## LITERATURA CITADA

Alemán P., R. D., Domínguez B., J., Bravo M., C. A., Iza G., E. R., Reyes M., H. F., Freile A., J. A., Alba R., J. L., Marino T., E., & Gutiérrez M., E. P. (2019). Variación de algunos indicadores fisiológicos y componentes del rendimiento con la fertilización orgánica en la variedad de caña de azúcar cristalina en las condiciones de la Amazonía ecuatoriana. *Revista Iberoamericana Ambiente*

- y *Sustentabilidad*, 2(1), 16-24. <https://doi.org/10.46380/rias.v2i1.34>
- Aloo, B. N., Mbega, E. R., & Makumba, B. A. (2021). Sustainable food production systems for climate change mitigation: indigenous rhizobacteria for potato bio-fertilization in Tanzania. En: Leal Filho, W., Oguge, N., Ayal, D., Adeleke, L., da Silva, I. (Eds), *African handbook of climate change adaptation*. (pp. 1-27). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-42091-8\\_276-1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-42091-8_276-1)
- Alvarez, A. L., Weyers, S. L., Goemann, H. M., Peyton, B. M., & Gardner, R. D. (2021). Microalgae, soil and plants: A critical review of microalgae as renewable resources for agriculture. *Algal Research*, 54, 102200. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102200>
- Alzain, M. N., Loutfy, N., & Aboelkassem, A. (2023). Effects of different kinds of fertilizers on the vegetative growth, antioxidative defense system and mineral properties of sunflower plants. *Sustainability*, 15(13), 10072. <https://doi.org/10.3390/su151310072>
- Anli, M., Baslam, M., Tahiri, A., Raklami, A., Symanczik, S., Boutasknit, A., Ait-El-Mokhart, M., Ben-Laouaen, R., Toubali, S. Ait Rahou, Y., Ait Chitt, M., Oufdou, K., Mitsui, T., Hafidi, M., & Meddich, A. (2020). Biofertilizers as strategies to improve photosynthetic apparatus, growth, and drought stress tolerance in the date palm. *Frontiers in Plant Science*, 11, 516818. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.516818>
- Antomarchi, A. B., Chinchilla C., V. E., Boicet F., T., & González G., G. (2015). Efectos de diferentes dosis de abono orgánico tipo bocashi en indicadores morfológicos y productivos del cultivo de pimiento (*Capsicum annum* L.) var. California Wonder. *Centro Agrícola*, 42(4), 5-9.
- Antonious, G. F., Turley, E. T., & Dawood, M. H. (2020). Monitoring soil enzymes activity before and after animal manure application. *Agriculture*, 10(5), 166. <https://doi.org/10.3390/agriculture10050166>
- Berezyuk, S., Pryshliak, N., & Zubar, I. (2021). Ecological and economic problems of fertilizers application in crop production. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 27(1), 29-37.
- Bhunias, S., Bhowmik, A., Mallick, R., & Mukherjee, J. (2021). Agronomic efficiency of animal-derived organic fertilizers and their effects on biology and fertility of soil: A review. *Agronomy*, 11(5), 823. <https://doi.org/10.3390/agronomy11050823>
- Bumandalai, O., & Tserennadmid, R. (2019). Effect of *Chlorella vulgaris* as a biofertilizer on germination of tomato and cucumber seeds. *International Journal of Aquatic Biology*, 7(2), 95-99. <https://doi.org/10.22034/ijab.v7i2.582>
- Cairo C., P., Machado de A., J., Rodríguez L., O., & Rodríguez U., A. (2017). Efecto de abonos órgano-minerales sobre la calidad del suelo, impacto en el rendimiento de la caña de azúcar. *Centro Azúcar*, 44(4), 12-20.
- Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar. (2024). DIEPROC Reportes de Avance de Producción Ciclo Azucarero 2023 2024. Obtenido el 1 de octubre de 2024 de: <https://www.gob.mx/conadesuca/documentos/dieproc-reportes-de-avance-de-produccion-ciclo-azucare-ro-2023-2024?state=published>
- Crusciol, C. A., Campos, M. D., Martello, J. M., Alves, C. J., Nascimento, C. A., Pereira, J. C., & Cantarella, H. (2020). Organomineral Fertilizer as Source of P and K for Sugarcane. *Scientific Reports*, 10(1), 5398. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62315-1>
- de Mendonça, H. V., Martins, C. E., da Rocha, W. S. D., Borges, C. A. V., Ometto, J. P. H. B., & Otenio, M. H. (2018). Biofertilizer replace urea as a source of nitrogen for sugarcane production. *Water, Air, & Soil Pollution*, 229, 216. <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3874-2>
- Di, Y.-n., Kui, L., Singh, P., Liu, L.-f., Xie, L.-y., He, L.-l., & Li, F.-s. (2023). Identification and characterization of *Bacillus subtilis* B9: A diazotrophic plant growth-promoting endophytic bacterium isolated from sugarcane root. *Journal of Plant Growth Regulation*, 42(3), 1720-1737. <https://doi.org/10.1007/s00344-022-10653-x>
- Dineshkumar, R., Subramanian, J., Gopalsamy, J., Jayasingam, P., Arumugam, A., Kannadasan, S., & Sampathkumar, P. (2019). The impact of using microalgae as biofertilizer in maize (*Zea mays* L.). *Waste and Biomass Valorization*, 10(5), 1101-1110. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0123-7>
- dos Santos, R. M., Diaz, P. A. E., Lobo, L. L. B., & Rigobelo, E. C. (2020). Use of plant growth-promoting Rhizobacteria in maize and sugarcane: characteristics and applications. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 136. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00136>
- Du, T.-Y., He, H.-Y., Zhang, Q., Lu, L., Mao, W.-J., & Zhai, M.-Z. (2022). Positive effects of organic fertilizers and biofertilizers on soil microbial community composition and walnut yield. *Applied Soil Ecology*, 175, 104457. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104457>

- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (s. f.). FAOSTAT. 2023. Recuperado el 27 de diciembre de 2023 de: <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL/visualize>
- García de la Rosa, A. S. (2020). *Dosis de biofertilizante mineralizado a partir de cachaza y su efecto en el rendimiento de caña de azúcar (Saccharum spp. Híbrido) en ciclo planta, en Central el Potrero*. [Tesis de maestría no publicada]. Universidad Veracruzana.
- Gupta, A., Bano, A., Rai, S., Dubey, P., Khan, F., Pathak, N., & Sharma, S. (2021). Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR): A sustainable agriculture to rescue the vegetation from the effect of biotic stress: A Review. *Letters in Applied NanoBioScience*, 10(3), 2459-2465. <https://doi.org/10.33263/LIANBS103.24592465>
- Hamidi, M., Tohidi M., H., Nasri, M., Kasraie, P., & Larijani, H. (2023). How do mycorrhiza and plant growth stimulants improve the qualitative and quantitative yields of basil (*Ocimum basilicum* L.) under different irrigation regimes? *Gesunde Pflanzen*, 75(1), 165-177. <https://doi.org/10.1007/s10343-022-00687-2>
- Jazmín-Marín, D. (2019). Impacto del uso de biofertilizantes a base de residuos orgánicos en los suelos. *Conciencia Tecnológica*, 58, 47-50.
- Liu, N., Shao, C., Sun, H., Liu, Z., Guan, Y., Wu, L., Zhang, L., Pan, X., Zhang, Z., Zhagn, Y., & Zhang, B. (2020). Arbuscular mycorrhizal fungi biofertilizer improves American ginseng (*Panax quinquefolius* L.) growth under the continuous cropping regime. *Geoderma*, 363, 114155. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114155>
- Maçik, M., Gryta, A., & Fraç, M. (2020). Biofertilizers in agriculture: An overview on concepts, strategies and effects on soil microorganisms. *Advances in Agronomy*, 162, 31-87. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.02.001>
- Mahato, S., Bhujju, S., & Shrestha, J. (2018). Effect of *Trichoderma viride* as biofertilizer on growth and yield of wheat. *Malaysian Journal of Sustainable Agriculture*, 2(2), 1-5. <http://doi.org/10.26480/mjsa.02.2018.01.05>
- Mahanty, T., Bhattacharjee, S., Goswami, M., Bhattacharyya, P., Das, B., Ghosh, A., & Tribedi, P. (2017). Biofertilizers: a potential approach for sustainable agriculture development. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 3315-3335. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8104-0>
- Mahmud, A. A., Upadhyay, S. K., Srivastava, A. K., & Bhojiya, A. A. (2021). Biofertilizers: A nexus between soil fertility and crop productivity under abiotic stress. *Current Research in Environmental Sustainability*, 3, 100063. <https://doi.org/10.1016/j.crsust.2021.100063>
- Mendes, G. O., Dias, C. S., Silva, I. R., Júnior, J. I. R., Pereira, O. L., & Costa, M. D. (2013). Fungal rock phosphate solubilization using sugarcane bagasse. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 29, 43-50. <https://doi.org/10.1007/s11274-012-1156-5>
- Moreno-Reséndez, A., García-Gutiérrez, L., Cano-Ríos, P., Martínez-Cueto, V., Márquez-Hernández, C., & Rodríguez-Dimas, N. (2014). Desarrollo del cultivo de melón (*Cucumis melo*) con vermicompost bajo condiciones de invernadero. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 1(2), 163-173.
- Mota-Pacheco, L. E., Guadarrama-Mendoza, P. C., Salas-Coronado, R., Escatante, A., Montville, T. J., & Valadez-Blanco, R. (2019). Adaptation of *Bacillus licheniformis* to molasses for improved production of a biofertilizer strain. *Agrociencia*, 53(8), 1183-1201.
- Mulyani, O., Trinurani, E., Sudirja, R., & Joy B. (2017). The effect of bio-fertilizer on soil chemical properties of sugarcane in Purwadadi Subang. *KnE Life Sciences*, 164-171. <https://doi.org/10.18502/kl.v2i6.1035>
- Nava-López, L. F., Camacho-Millán, R., Aguilar-Medina, E. M., Romero-Navarro, J. G., Sosa-Pérez, R., Ruiz-Abiti, A. I., Cárdenas-Cota, H. M., & Ramos-Payán, R. (2017). Biofertilizer formulation from *Azotobacter* and *Azospirillum* regional isolates and its effect on sugar cane (*Saccharum officinarum*) in greenhouse. *Mexican Journal of Biotechnology*, 2(2), 183-195. <https://doi.org/10.29267/mxjb.2017.2.2.183>
- Nawaz, M., Chattha, M. U., Chattha, M. B., Ahmad, R., Munir, H., Usman, M., Hassan, M. U., Khan, S., & Kharal, M. (2017). Assessment of compost as nutrient supplement for spring planted sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). *Journal of Animal & Plant Sciences*, 27(1), 283-293.
- Núñez-Delgado, A., Álvarez-Rodríguez, E., Fernández-Sanjurjo, M. J., Nóvoa-Muñoz, J. C., Arias-Estévez, M., & Fernández-Calvino, D. (2015). Perspectives on the use of by-products to treat soil and water pollution. *Microporous and Mesoporous Materials*, 210, 199-201. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2015.02.001>
- Núñez-Delgado, A., Zhou, Y., Anastopoulos, I., & Shaaban, M. (2020). Editorial: New research on soil degradation and restoration. *Journal of Environmental*

- Management*, 269, 110851. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110851>
- Oliveira, F. L. N., Stamford, N. P., Neto, D. S., Oliveira E. C. A., Oliveira, W. S., de Rosália, C. E., & Santos, S. (2015). Effects of biofertilizers produced from rocks and organic matter, enriched by diazotrophic bacteria inoculation on growth and yield of sugarcane. *Australian Journal of Crop Science*, 9(6), 504-508.
- Patel, P., Gajjar, H., Joshi, B., Krishnamurthy, R., & Amaresan, N. (2022). Inoculation of salt-tolerant *Acinetobacter* sp (RSC9) improves the sugarcane (*Saccharum* sp. Hybrids) growth under salinity stress condition. *Sugar Tech*, 24(2), 494-501. <https://doi.org/10.1007/s12355-021-01043-w>
- Pirttilä, A. M., Tabas, H. M. P., Baruah, N., & Koskimäki, J. J. (2021). Biofertilizers and biocontrol agents for agriculture: How to identify and develop new potent microbial strains and traits. *Microorganisms*, 9(4), 817. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9040817>
- Rakkiyappan, P., Thangavelu, S., Malathi, R., & Radhamani, R. (2001). Effect of biocompost and enriched pressmud on sugarcane yield and quality. *Sugar Tech*, 3(3), 92-96. <https://doi.org/10.1007/BF03014569>
- Reddy, G. C., Goyal, R. K., & Godara, A. K. (2023). Use of organic manures in combination with *Azotobacter* in strawberry: effect on growth, yield and quality attributes. *Journal of Plant Nutrition*, 46(17), 4188-4198. <https://doi.org/10.1080/01904167.2023.2224375>
- Rodríguez D., I., Pérez I., H. I., & Jara O., W. O. (2017). Efecto de la aplicación de compost, solo o combinado con fertilizantes minerales, sobre el rendimiento agrícola de la caña de azúcar en el ingenio Valdez, Ecuador. *Conference Proceedings*, 1(1), 1132-1139.
- Safdar, H., Jamil, M., Hussain, A., Albalawi, B. F. A., Ditta, A., Dar, A., Aimen, A., Ahmad, H. T., Nazir, Q., & Ahmad, M. (2022). the effect of different carrier materials on the growth and yield of spinach under pot and field experimental conditions. *Sustainability*, 14(19), 12255. <https://doi.org/10.3390/su141912255>
- Sentíes-Herrera, H. E., Gómez-Merino, F. C., Valdez-Balero, A., Silva-Rojas, H. V., & Trejo-Téllez, L. I. (2014). The agro-Industrial sugarcane system in Mexico: Current status, challenges and opportunities. *Journal of Agricultural Science*, 6(4), 26-54.
- Singh, P., Singh, R. K., Li, H.-B., Guo, D.-J., Sharma, A., Verma, K. K., Solanki, M. K., Upadhyay, S. K., Lakshmanan, P., Yang, L.-T., Li, Y.-R. (2023). Nitrogen fixation and phytohormone stimulation of sugarcane plant through plant growth promoting diazotrophic *Pseudomonas*. *Biotechnology and Genetic Engineering Reviews*, 40(1), 15-35. <https://doi.org/10.1080/02648725.2023.2177814>
- Sultan, A. A. Y. A., Gebreel, H. M., & Youssef H. I. A. (2023). Biofertilizer effect of some zinc dissolving bacteria free and encapsulated on *Zea mays* growth. *Archives of Microbiology*, 205(5), 202. <https://doi.org/10.1007/s00203-023-03537-5>
- Syaputra R, Hidayati SN. 2020. Effect of NPK fertilizer, biofertilizer containing N fixer and P solubilizer, and green manure of *C. juncea* on nutrients uptake and growth of sugarcane. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 418(1), 012068. 012068. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/418/1/012068>
- Tariq, M., Jameel, F., Ijaz, U., Abdullah, M., & Rashid, K. (2022). Biofertilizer microorganisms accompanying pathogenic attributes: a potential threat. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 28(1), 77-90. <https://doi.org/10.1007/s12298-022-01138-y>
- Udvardi, M., Below, F. E., Castellano, M. J., Eagle, A. J., Giller, K. E., Ladha, J. K., Liu, X., Maaz, T. M., Nova-Franco, B., Raghuram, N., Robertson, G. P., Roy, S., Saha, M., Schmidt, S., Teheder, M., York, L. M., & Peters, J. W. (2021). A research road map for responsible use of agricultural nitrogen. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 660155. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.660155>
- United Nations. (2015). Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development. United Nations.
- van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523-538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- Velázquez F., J. B., Hernández-Rosales, I. P., & Contreras R., S. M. (2020). Composting sugar cane bagasse at full scale: organic matter decay kinetics, metagenomics and plant-growth promoting bacteria capabilities. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 36(2), 361-370. <https://doi.org/10.20937/RICA.53519>
- Volverás-Mambuscay, B., González-Chavarro, C. F., Huertas, B., Kopp-Sanabria, E., & Ramírez-Durán, J. (2020). Efecto del fertilizante orgánico y mineral en rendimiento de caña panelera en Nariño, Colombia. *Agronomía Mesamericana*, 31(3), 547-565. <https://doi.org/10.15517/am.v31i3.37334>
- Wan, L. J., Tian, Y., He, M., Zheng, Y. Q., Lyu, Q., Xie, R. J., Ma, Y. Y., Deng, L., & Yi, S. L. (2021). Effects of chemi-

- cal fertilizer combined with organic fertilizer application on soil properties, citrus growth physiology, and yield. *Agriculture*, 11(12), 1207. <https://doi.org/10.3390/agriculture11121207>
- Wang, G., Kong, Y., Liu, Y., Li, D., Zhang, X., Yuan, J., & Li, G. (2020). Evolution of phytotoxicity during the active phase of co-composting of chicken manure, tobacco powder and mushroom substrate. *Waste Management*, 114, 25-32. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.06.034>
- Wang, Y., Peng, S., Hua, Q., Qiu, C., Wu, P., Liu, X., & Lin, X. (2021). The long-term effects of using phosphate-solubilizing bacteria and photosynthetic bacteria as biofertilizers on peanut yield and soil bacteria community. *Frontiers in Microbiology*, 12, 693535. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.693535>
- Wangiyana, W., Aryana, I. G. P. M., & Dulur, N. W. D. (2021). Mycorrhiza biofertilizer and intercropping with soybean increase anthocyanin contents and yield of upland red rice under aerobic irrigation systems. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 637(1), 012087. [10.1088/1755-1315/637/1/012087](https://doi.org/10.1088/1755-1315/637/1/012087)
- Yadav, K. K., & Smritikana, S. (2019). Biofertilizers, impact on soil fertility and crop productivity under sustainable agriculture. *Environment and Ecology*, 37(1), 89-93.
- Yeung, A. W. K., Goto, T. K., & Leung, W. K. (2017). The changing landscape of neuroscience research, 2006–2015: A bibliometric study. *Frontiers in Neuroscience*, 11, 120. <https://doi.org/10.3389/fnins.2017.00120>
- Zahra, S. T., Tariq, M., Abdullah, M., Azeem, F., & Ashraf, M. A. (2023). Dominance of *Bacillus* species in the wheat (*Triticum aestivum* L.) rhizosphere and their plant growth promoting potential under salt stress conditions. *PeerJ*, 11, e14621. <https://doi.org/10.7717/peerj.14621>
- Zainuddin, N., Keni, M. F., Ibrahim, S. A. S., & Masri, M. M. (2022). Effect of integrated biofertilizers with chemical fertilizers on the oil palm growth and soil microbial diversity. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 39, 102237. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.102237>
- Zhang, X., Fang, Q., Zhang, T., Ma, W., Velthof, G. L., Hou, Y., Oenema, O., & Zhang, F. (2020). Benefits and trade-offs of replacing synthetic fertilizers by animal manures in crop production in China: A meta-analysis. *Global Change Biology*, 26(2), 888-900. <https://doi.org/10.1111/gcb.14826>
- Zheng, W., Luo, B., & Hu, X. (2020). The determinants of farmers' fertilizers and pesticides use behavior in China: An explanation based on label effect. *Journal of Cleaner Production*, 272, 123054. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123054>