

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



USO DE ROCA FOSFÓRICA Y *TRICHODERMA SP.* EN LA PRODUCCIÓN DE  
GERBERA (*Gerbera Jamesonii* L.) EN CULTIVO SIN SUELO

Tesis

Que presenta LIZBETH YURITZZI LÓPEZ RAMÍREZ

Como requisito parcial para obtener el Grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

SALTILLO, COAHUILA

MAYO 2025

USO DE ROCA FOSFÓRICA Y *TRICHODERMA SP.* EN LA PRODUCCIÓN DE  
GERBERA (*Gerbera Jamesonii* L.) EN CULTIVO SIN SUELO

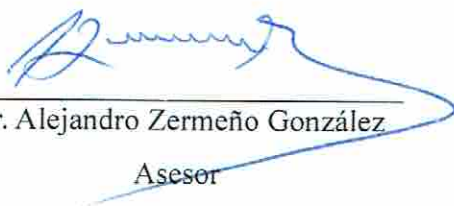
Tesis

Elaborada por LIZBETH YURITZZI LÓPEZ RAMÍREZ como requisito para obtener el  
grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE  
PRODUCCIÓN con la supervisión y aprobación del comité de asesoría



Dr. Armando Hernández Pérez

Director de Tesis



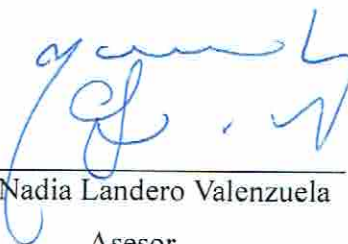
Dr. Alejandro Zermeño González

Asesor



Dr. Homero Ramírez Rodríguez

Asesor



Dra. Nadia Landero Valenzuela

Asesor



Dr. Antonio Flores Naveda

Subdirector de Postgrado

UAAAN

## **AGRADECIMIENTOS**

**A Dios** por el haber permitido llegar hasta esta etapa de mi formación profesional y ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y debilidad.

**CONAHACYT** por los beneficios proporcionados que hicieron posible mi formación de grado, y a la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro** por las facilidades brindadas que permitieron mi desarrollo académico a nivel de maestría.

**A mis amigos**, quienes estuvieron a mi lado durante todo este proceso académico. Y **mis maestros** quienes compartieron su conocimiento y sabiduría.

## DEDICATORIAS

**A mis padres,** (María Teodora Ramírez García y Vicente Rufino López Sanches) quienes han sido mi mayor apoyo a lo largo de este viaje.

**A mis hermanos,** (Nayeli, Jonatan, Giovani y Brenda Yulissa) por estar siempre a mi lado, por su cariño, su compañía y por motivarme a seguir adelante.

**A mis sobrinos,** (Cristofer Jaday, Esnejder Yael, Britani Yaretzi, Ian Exael y Tadeo). Su energía, curiosidad y risas me recuerdan la importancia de seguir persiguiendo mis sueños y de disfrutar cada momento.

**A mis padrinos,** (Tomasa García y Basilio López) su constante apoyo y confianza en mí, sus palabras de aliento y su presencia han sido pilares fundamentales en este proceso.

**A Miguel Ángel R. Percastegui** quien estuvo a mi lado en cada paso de este camino. el apoyo incondicional, palabras de aliento y constante motivación fueron una fuente invaluable de fuerza en los momentos más difíciles.

## ÍNDICE GENERAL

|   |      |
|---|------|
| <u>AGRADECIMIENTOS</u> .....  | iii  |
| <u>DEDICATORIAS</u> .....   | iv   |
| <u>LISTA DE FIGURAS</u> .....   | viii |
| <u>RESUMEN</u> .....  | ix   |
| <u>ABSTRACT</u> .....   | xi   |
| <u>INTRODUCCIÓN</u> .....   | 1    |
| <u>JUSTIFICACION</u> .....  | 3    |
| <u>OBJETIVO GENERAL</u> .....   | 3    |
| <u>Objetivos específicos</u> .....                                    | 3    |
| <u>REVISIÓN DE LITERATURA</u> .....                                   | 5    |
| <u>Nutrición mineral</u> .....  | 5    |
| <u>Función del fósforo en las plantas</u> .....                       | 5    |
| <u>Requerimiento del fosforo en los cultivos</u> .....                | 6    |
| <u>Agricultura sustentable</u> .....                                  | 7    |
| <u>Agricultura organomineral</u> .....                                | 7    |
| <u>Agricultura mineral</u> .....                                      | 8    |
| <u>Roca fosfórica</u> .....   | 9    |
| <u>Tipos de roca fosfórica</u> .....                                  | 9    |
| <u>Uso de la roca fosfórica en suelo</u> .....                        | 10   |
| <u>Uso de la roca fosfórica en cultivo sin suelo</u> .....            | 11   |
| <u>Solubilidad de la roca fosfórica</u> .....                         | 11   |
| <u>Microorganismos benéficos y/o solubilizadores</u> .....            | 12   |
| <u>Trichoderma</u> .....  | 13   |
| <u>Uso de Trichoderma sp. en la solubilización de minerales</u> ..... | 14   |
| <u>Interacción Trichoderma-Planta</u> .....                           | 15   |
| <u>Agricultura protegida</u> .....                                    | 15   |
| <u>Ornamentales</u> .....   | 16   |
| <u>Gerbera</u> .....  | 17   |
| <u>Importancia de la gerbera</u> .....                                | 18   |

|  |    |
|--|----|
| <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u> .....                  | 20 |
| <u>Localización del área de estudio</u> .....      | 20 |
| <u>Material vegetal</u> .....                      | 20 |
| <u>Material fúngico</u> .....                      | 20 |
| <u>Roca fosfórica</u> .....                        | 20 |
| <u>Diseño experimental</u> .....                   | 21 |
| <u>Instalación del experimento</u> .....           | 21 |
| <u>Variables</u> .....                             | 22 |
| <u>Variables del sistema radical:</u> .....        | 22 |
| <u>Variables de crecimiento vegetativo:</u> .....  | 23 |
| <u>Variables de desarrollo reproductivo:</u> ..... | 23 |
| <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u> .....                | 25 |
| <u>Volumen de raíz (VR)</u> .....                  | 26 |
| <u>Longitud de la raíz (LR)</u> .....              | 28 |
| <u>Peso seco de raíz (PSR)</u> .....               | 29 |
| <u>Numero de hojas (NH)</u> .....                  | 32 |
| <u>Peso seco aéreo (PSA)</u> .....                 | 34 |
| <u>Peso seco de corona (PSC)</u> .....             | 35 |
| <u>CONCLUSIÓN</u> .....                            | 42 |
| <u>REFERENCIAS</u> .....                           | 43 |

## LISTA DE CUADROS

|   |    |
|---|----|
| <b><u>Cuadro 1.-</u></b> Tratamientos evaluados obtenidos apartir de las combinaciones de los niveles de cada factor en estudio. ....   | 21 |
| <b><u>Cuadro 2 .</u></b> Efecto de la inoculación de hongo y uso de diferentes concentraciones de roca fosfórica en variables relacionadas con la raíz de las plantas de Gerbera Var. Forza. .... | 26 |
| <b><u>Cuadro 3.-</u></b> Efecto de la inoculación de hongo y uso de diferentes concentraciones de roca fosfórica en variables morfológicas aéreas de las plantas de Gerbera Var. Forza. ....      | 32 |
| <b><u>Cuadro 4.-</u></b> Efecto de la inoculación de hongo y uso de diferentes concentraciones de roca fosfórica en variables de calidad de flor de las plantas de Gerbera Var. Forza.....        | 38 |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1.-</b> Interacción entre la aplicación de roca fosfórica y la presencia o ausencia de <i>Trichoderma sp.</i> sobre el volumen de raíz en gerbera Var. Forza.....  | 27 |
| <b>Figura 2.-</b> Interacción entre la aplicación de roca fosfórica y la presencia o ausencia de <i>Trichoderma sp.</i> sobre la longitud de raíz en gerbera Var. Forza en cultivo sin suelo. ....   | 29 |
| <b>Figura 3.-</b> . Interacción entre la aplicación de roca fosfórica y la presencia o ausencia de <i>Trichoderma sp.</i> sobre el peso seco de raíz en gerbera Var. Forza en cultivo sin suelo. ....  | 30 |
| <b>Figura 4.-</b> Interacción entre la aplicación de roca fosfórica y la presencia o ausencia de <i>Trichoderma sp.</i> . En el número de hojas de plantas de gerbera Var. Forza en cultivo sin suelo. ....  | 34 |
| <b>Figura 5.-</b> Interacción entre la aplicación de roca fosfórica y la presencia o ausencia de <i>Trichoderma sp.</i> En el peso seco aéreo de plantas de gerbera Var. Forzar en cultivo sin suelo. ....   | 35 |
| <b>Figura 6.-</b> interacción entre la aplicación de roca fosfórica y la presencia o ausencia de <i>Trichoderma sp.</i> sobre el peso seco de corona en gerbera Var. Forza en cultivo sin suelo. ....  | 37 |
| <b>Figura 7.-</b> Efecto de la interacción de diferentes concentraciones de roca fosfórica y la presencia o ausencia de <i>Trichoderma sp.</i> sobre en respuesta a las variables relacionadas con calidad de flor en plantas de gerbera, Numero de flores (A), numero de botones (B), diámetro de flor (C), longitud del tallo (D) . .... | 41 |



## RESUMEN

USO DE ROCA FOSFÓRICA Y *TRICHODERMA SP.* EN LA PRODUCCIÓN DE  
GERBERA (*Gerbera Jamesonii* L.) EN CULTIVO SIN SUELO

POR

LIZBETH YURITZZI LÓPEZ RAMÍREZ

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DR. ARMANDO HERNÁNDEZ PÉREZ -ASESOR-

Saltillo, Coahuila

Mayo, 2025

El fósforo en forma de roca fosfórica y *Trichoderma sp.* son ampliamente reconocidos por su eficiencia en el crecimiento y desarrollo de los cultivos, especialmente en cultivos en suelo. Sin embargo, su efectividad en sistemas sin suelo requiere mayor exploración, lo que abre la oportunidad de evaluar su desempeño y potencial en este tipo de sistemas de producción. Este estudio se centró en determinar el efecto de fósforo en forma de roca fosfórica y *Trichoderma sp.* en el crecimiento y calidad de la flor de gerbera en un cultivo sin suelo. El experimento se instaló el 23 de marzo de 2024 en un invernadero híbrido, evaluando cinco concentraciones de fósforo (P) en forma de roca fosfórica: 0, 45, 90, 135 y 180 ppm, en combinación con dos niveles de inoculación de *Trichoderma sp.* 0 y  $1 \times 10^6$  UFC. Se estableció bajo diseño de bloques completos al azar con un arreglo factorial de  $2 \times 5$  dando un total de 10 tratamientos. Las variables evaluadas fueron: Número de hojas (NH), Peso seco aéreo (PSA), Longitud y ancho de hoja (LH) (AH), Diámetro y peso seco de corona (DC) (PSC), Número de flores y botones (NF) (NB), Diámetro de flor (DF), Diámetro del tallo floral (DTF), Longitud del tallo floral (LTF), Volumen de raíz (VR), Longitud y ancho de raíz (LR) (AR), y Peso seco de raíz (PSR). Los resultados indicaron que tratamientos sin *Trichoderma harzianum*. presentaron un mejor desempeño y las diferentes dosis de roca fosfórica tuvieron efecto significativo en la mayoría de las variables por lo que, la presencia del hongo puede tener un efecto limitante en el crecimiento vegetal bajo condiciones de cultivo sin suelo. Así mismo la interacción entre estos dos factores fue significativa en variables como, VR, LR, PSR, NH, PSA, PSC, NF, NB, DF y LTF. Por lo que existe una gran posibilidad de utilizar la roca fosfórica como fertilizante de forma suplementaria en condiciones de cultivo sin suelo.

**Palabras clave:** microorganismos, solubilidad, fósforo, crecimiento, calidad.

## **ABSTRACT**

**USE OF PHOSPHORIC ROCK AND TRICHODERMA SP. IN GERBERA (GERBERA  
JAMESONII L.) PRODUCTION IN SOILLESS CULTURE**

**BY**

**LIZBETH YURITZZI LÓPEZ RAMÍREZ**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**

**DR. ARMANDO HERNÁNDEZ PÉREZ - ADVISOR –**

**Saltillo, Coahuila**

**MAY, 2025**

Phosphorus in the form of rock phosphate and *Trichoderma harzianum* are widely recognized for their efficiency in crop growth and development, especially in soil-based systems. However, their effectiveness in soilless systems requires further exploration, opening the opportunity to evaluate their performance and potential in this type of production system. This study focused on determining the effect of phosphorus in the form of rock phosphate and *Trichoderma* sp. on the growth and flower quality of gerbera in a soilless cultivation system.

The experiment was established on March 23, 2024, in a hybrid greenhouse, evaluating five concentrations of phosphorus (P) in the form of rock phosphate: 0, 45, 90, 135, and 180 ppm, in combination with two levels of *Trichoderma* sp. inoculation: 0 and  $1 \times 10^6$  CFU. A randomized complete block design was used with a  $2 \times 5$  factorial arrangement, resulting in a total of 10 treatments.

The evaluated variables were: Number of leaves (NL), Shoot dry weight (SDW), Leaf length and width (LL) (LW), Crown diameter and dry weight (CD) (CDW), Number of flowers and buds (NF) (NB), Flower diameter (FD), Flower stem diameter (FSD), Flower stem length (FSL), Root volume (RV), Root length and width (RL) (RW), and Root dry weight (RDW). The results indicated that treatments without *Trichoderma harzianum* showed better performance, and the different doses of rock phosphate had a significant effect on most of the variables. Therefore, the presence of the fungus may have a limiting effect on plant growth under soilless cultivation conditions. Additionally, the interaction between these two factors was significant in variables such as RV, RL, RDW, NL, SDW, CDW, NF, NB, FD, and FSL. Thus, there is great potential for using rock phosphate as a supplementary fertilizer under soilless cultivation conditions.

**Keywords:** microorganisms, solubility, phosphorus, growth, quality.

## INTRODUCCIÓN

Actualmente, la agricultura enfrenta desafíos cada vez mayores para satisfacer la creciente demanda alimentaria mundial (Huzenko y Kononenko, 2024), en las últimas décadas, este desafío ha provocado un aumento significativo en el uso de fertilizantes, con el fin de satisfacer las necesidades de la producción agrícola (Cordell *et al.*, 2009). La agricultura depende en gran medida de estos recursos, lo que ha generado una creciente dependencia de los agricultores hacia las industrias químicas para el suministro de insumos agrícolas, especialmente fertilizantes fosfatados (Kumar, 2024). Uno de los problemas más críticos en la agricultura es la disponibilidad de fósforo, un macronutriente esencial para las plantas cultivadas, aunque es abundante en la naturaleza, se encuentra en formas insolubles en el suelo, lo que limita su absorción para las plantas (Vance *et al.*, 2003).

La roca fosfórica es una fuente potencialmente valiosa de fósforo, pero su baja solubilidad restringe su efectividad como fertilizante en sistemas agrícolas tradicionales. Además, las reservas mundiales de fosfato de roca están disminuyendo rápidamente y podrían agotarse en los próximos 50 a 100 años (Steen, 1998; Sonríe, 2000b; Günther, 2005), lo que conlleva a la necesidad de desarrollar métodos innovadores para mejorar su solubilización y maximizar su aprovechamiento por las plantas, reduciendo al mismo tiempo su impacto ambiental (Cordell *et al.*, 2009).

Los microorganismos benéficos, como bacterias y hongos han mostrado gran potencial para solucionar el problema de la baja solubilidad de fósforo. los hongos del género *Trichoderma sp.* son capaces de solubilizar el fósforo de fuentes insolubles, mejorando su disponibilidad para las plantas. Además, *Trichoderma* ofrece una serie de beneficios adicionales, como la capacidad para controlar enfermedades de las plantas de forma biológica y la promoción de la salud general de las plantas, lo que lo convierte en una herramienta valiosa para prácticas agrícolas sostenibles (Harman *et al.*, 2004; Altomare *et al.*, 1999). Investigaciones recientes han demostrado que la combinación de *Trichoderma* con materiales orgánicos puede aumentar la solubilidad de la roca fosfórica hasta en un 17.8% en cultivos desarrollados en suelo, lo que subraya su efectividad en mejorar la disponibilidad de fósforo para las plantas (Argotte *et al.*, 2020).

El uso de *Trichoderma sp.* y roca fosfórica representa una estrategia innovadora aplicable en diversos sistemas agrícolas, incluyendo cultivos de alto valor económico, como las plantas

ornamentales. Estas especies no solo tienen un valor estético y cultural significativo, sino que también juegan un papel crucial en la economía global, especialmente en la industria de la floricultura (Dole y Wilkins, 2005). Entre ellas, la gerbera (*Gerbera jamesonii* L.) destaca por su belleza y su alta demanda en el mercado de flores cortadas, lo que la convierte en una planta ideal para estudiar su crecimiento y calidad, así mismo aumentar su producción (Healy *et al.*, 2014). El sector ornamental posee un destacado valor socioeconómico a nivel global y en México, se ha establecido como una industria de alta demanda y en constante expansión (Millán, 2021). Con aproximadamente 12,600 hectáreas dedicadas al cultivo de plantas ornamentales, lo cual representa el 23% del área total de cultivos ornamentales en América Latina (Villalobos *et al.*, 2024). Según datos del SIAP (2024), el Estado de México se posiciona como el principal productor de flores en el país, seguido por entidades como Morelos, Puebla, Querétaro, Jalisco, Ciudad de México, Guerrero, Hidalgo, Oaxaca y Tlaxcala. Entre las especies ornamentales más cultivadas se encuentran el crisantemo, la rosa, la gladiola y la gerbera. Esta última destaca especialmente por su alta demanda en el mercado floral, gracias a su amplia gama de colores vibrantes que exhiben sus inflorescencias, como rojo, naranja, morado, blanco y amarillo. En el ámbito nacional, el Estado de México no solo lidera la producción de flores en general, sino que también se consolida como el único productor de gerbera, con un volumen que supera los 198 millones de flores.

## JUSTIFICACION

El fósforo es un nutriente esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas, cuyas funciones son insustituibles por cualquier otro elemento, este nutriente es fundamental en procesos fisiológicos y bioquímicos de las plantas. Sin embargo, en la actualidad, nos enfrentamos a un desafío importante: las reservas de fósforo están disminuyendo rápidamente y se estima que en los próximos años alcanzaremos el pico máximo de extracción de este recurso. Lo que podría generar una escasez de fósforo y una reducción en la disponibilidad de fertilizantes fosfatados, representando una amenaza para la producción agrícola mundial. Ante esta situación es crucial explorar alternativas que aseguren la disponibilidad de fósforo para las plantas. Una opción prometedora es el uso de microorganismos, en particular los hongos solubilizadores. Estos microorganismos tienen la capacidad de solubilizar los nutrientes presentes en el suelo, haciendo que el fósforo sea más accesible para las plantas. Además, la combinación de roca fosfórica y hongos solubilizadores ha demostrado ser una estrategia eficaz para incrementar la disponibilidad de fósforo en el suelo, contribuyendo así a la mejora de la productividad agrícola sin depender exclusivamente de fuentes externas de fertilizantes químicos. La gerbera es una planta ornamental de gran importancia. Apreciada por su belleza y la amplia gama de colores en sus flores, ocupando el quinto lugar en la producción ornamental a nivel nacional. Sin embargo, su cultivo está limitado principalmente al Estado de México, lo que abre la posibilidad de explorar su adaptabilidad en otros estados del país.

## OBJETIVO GENERAL

Determinar el efecto de fósforo en forma de roca fosfórica y *Trichoderma sp.* en el crecimiento y calidad de la flor de gerbera en un cultivo sin suelo.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar el efecto de roca fosfórica en las plantas de gerbera bajo un sistema de cultivo sin suelo.

- Comparar el efecto de la inoculación del hongo *Trichoderma harzianum*. En plantas de gerbera bajo un cultivo sin suelo.
- Conocer las interacciones entre *Trichoderma harzianum* y roca fosfórica en las variables de crecimiento del cultivo



## REVISIÓN DE LITERATURA

### **Nutrición mineral**

La nutrición mineral estudia cómo las plantas obtienen y utilizan los nutrientes esenciales para su desarrollo, incluyendo tanto su absorción como su transporte interno (Taiz et al., 2023). Estos nutrientes se agrupan en macronutrientes y micronutrientes, los primeros requeridos en mayores cantidades y fundamentales en procesos como la fotosíntesis o la formación de tejidos, mientras que los segundos son igualmente indispensables, pero en menores concentraciones (Saleem et al., 2023). Un manejo eficiente de estos elementos no solo mejora la productividad y calidad de los cultivos, sino que también ayuda a disminuir el impacto ambiental generado por el uso desmedido de fertilizantes (Hernández-Terrón et al., 2021).

### **Función del fósforo en las plantas**

El fósforo (P) es un macronutriente esencial para el desarrollo de las plantas, tanto por su papel estructural como por su participación en numerosos procesos metabólicos clave (Fouad Abobatta y Abd Alla, 2023). Aunque es el segundo nutriente más requerido después del nitrógeno, su baja disponibilidad en muchos suelos lo convierte en un factor limitante para la productividad vegetal (Gallardo et al., 2020). Forma parte de moléculas fundamentales como los ácidos nucleicos, fosfolípidos y nucleótidos, siendo indispensable para la síntesis de ADN y ARN, y por lo tanto para el crecimiento celular y la reproducción (Gabriel et al., 2016; Grzebisz et al., 2024).

Este nutriente también interviene activamente en la conversión de energía, regulando procesos como la fotosíntesis y la respiración, al formar parte de moléculas como el ATP y coenzimas esenciales (Fatima et al., 2024). Además, participa en la actividad de enzimas importantes como la Rubisco y la fructosa-1,6-bisfosfatasa, que son claves para la eficiencia fotosintética (Bechtaoui et al., 2021). Desde las etapas tempranas del desarrollo, el fósforo promueve una buena germinación, establecimiento de plántulas y formación de raíces, brotes, flores y semillas (Malhotra et al., 2017).

Otro aspecto relevante del fósforo es su contribución a la tolerancia de la planta frente a estreses abióticos como sequía, salinidad y toxicidad por metales pesados, al mejorar la regulación estomática y fortalecer las respuestas fisiológicas al estrés (Bechtaoui et al., 2021;

Khan et al., 2023). Por todo esto, un adecuado manejo del fósforo es determinante para alcanzar un desarrollo equilibrado y una producción agrícola sostenible.

### **Requerimiento del fosforo en los cultivos**

El fósforo (P) es un nutriente esencial para el desarrollo de los cultivos, ya que participa en procesos fundamentales como el crecimiento radicular, la formación de semillas y la transferencia de energía dentro de la planta (Kumar et al., 2014). La cantidad requerida varía según el tipo de cultivo, la etapa fenológica y las condiciones del suelo, pero en general, las plantas necesitan entre 0.2% y 0.5% de P en su peso seco para un desarrollo óptimo (Kirkby y Johnston, 2007). Niveles por debajo del 0.175% se consideran una deficiencia severa, mientras que valores entre 0.30% y 0.34% son adecuados (Haneklaus y Schnug, 2016).

A pesar de su importancia, uno de los mayores desafíos asociados al fósforo es su baja disponibilidad en el suelo, ya que suele encontrarse en formas insolubles o fijadas a partículas del suelo, lo que impide su absorción eficiente por las raíces (Kumar et al., 2014). De hecho, entre el 80% y el 90% del fósforo aplicado mediante fertilización convencional se inmoviliza rápidamente, limitando su aprovechamiento por las plantas (Kumar et al., 2014; López-Arredondo et al., 2014). Los requerimientos específicos de fósforo varían dependiendo los distintos cultivos. Por ejemplo, en cebada se estima una concentración ideal de 1.65 mg/g de grano, mientras que en papaya se requieren aproximadamente 0.27 kg de  $P_2O_5$  por tonelada de fruto producido, siendo este nutriente parte de un balance más amplio que incluye potasio, calcio, magnesio y nitrógeno (Alejo-Santiago et al., 2023; Reineke y Steffens, s.f.).

Para mejorar la eficiencia del uso del fósforo y reducir su impacto ambiental, se han explorado estrategias como el uso de microorganismos solubilizadores de fosfato (MSF), los cuales representan una alternativa ecológica prometedora, aunque su eficacia en campo aún presenta limitaciones (Kumar et al., 2014). Un ejemplo práctico es el cultivo de girasol, donde se ha observado que dosis adecuadas de fósforo en suelos ricos en este elemento pueden aumentar el rendimiento, aunque con niveles excesivos la eficiencia disminuye (Madhavi et al., 2023). Aunque el fósforo es clave para la productividad agrícola, su manejo debe ser cuidadoso y adaptado a cada sistema de cultivo para optimizar su aprovechamiento y reducir las pérdidas al ambiente.

### **Agricultura sustentable**

La agricultura sostenible tiene como propósito satisfacer las necesidades alimentarias tanto del presente como del futuro, asegurando a la vez la preservación del medio ambiente (Kumar, 2024). Este enfoque implica el uso de prácticas agrícolas basadas en tecnologías orgánicas, que excluyen el uso de productos a base de hormonas, estimulantes del crecimiento, aditivos químicos y productos tóxicos como los pesticidas y fertilizantes sintéticos. Las estrategias de manejo sostenible de la tierra buscan conservar recursos vitales como los suelos, el agua y la biodiversidad, al mismo tiempo que contribuyen a mitigar el cambio climático mediante la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y la protección de los ecosistemas naturales (Huzenko y Kononenko, 2024).

El concepto de sostenibilidad se basa en que debemos satisfacer las necesidades de la generación actual sin poner en peligro la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer las suyas propias (Gupta, 2022). Abarcando tres dimensiones esenciales ambiental, económica y social (Kumar, 2024). Para lograr una producción alimentaria sostenible, es necesario aumentar la productividad agrícola en un 70%, a pesar de las condiciones climáticas, sin comprometer la calidad del entorno, lo que implica, entre otras acciones, una reducción significativa del uso de agroquímicos (Datta et al., 2023; Hamim et al., 2018)

De este modo, la microbiología del suelo ha cobrado una gran relevancia, destacando a los inóculos microbianos como una técnica prometedora para los sistemas agrícolas sostenibles. Estos microorganismos favorecen el crecimiento de los cultivos al mejorar la disponibilidad de nutrientes esenciales para las plantas y al reducir el estrés abiótico, como la sequía, las altas temperaturas, el frío o la salinidad (Hamim et al., 2018).

### **Agricultura organomineral**

La agricultura organomineral es una estrategia sostenible que combina fertilizantes orgánicos y minerales para mejorar tanto la fertilidad del suelo como la productividad de los cultivos. Este tipo de agricultura integra materia orgánica, como sustancias húmicas y lodos de depuradora, con nutrientes esenciales para optimizar la nutrición de las plantas y promover la salud del suelo (Oliveira et al., 2024). Los fertilizantes organominerales no solo sirven como fuente nutricional para los cultivos, sino que también contribuyen mejorando la eficiencia en el uso de recursos y reduciendo la dependencia de fertilizantes minerales (Reis et al., 2023). Algo muy importante de este tipo de agricultura es la capacidad de combinar

fuentes orgánicas y minerales. Esta combinación puede llegar a incrementar la eficacia de los nutrientes, mejorar la protección de los cultivos contra factores externos y optimizar las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo (Abdulraheem et al., 2023). Por ejemplo, en el cultivo de papa, se ha demostrado que la sustitución de fertilizantes minerales por fertilizantes organominerales en un 80% puede resultar en un aumento significativo de la productividad y una mejora continua para el suelo (Oliveira et al., 2024). Además, la incorporación de sustancias húmicas y enmiendas naturales en los fertilizantes pueden llegar a mejorar la estructura del suelo y favorecer una mayor actividad microbiana, lo que a su vez facilita una mejor absorción de nutrientes por las plantas (Nurgalieva et al., 2024; Rodrigues, 2023). Su efectividad también puede verse incrementada mediante la inoculación o el uso de microorganismos, como *Rhizobium*, *Azospirillum*, y hongos micorrícicos, que aparte de favorecer la disponibilidad de nutrientes, también potencian la productividad de los cultivos (Reis et al., 2023).

### **Agricultura mineral**

La agricultura mineral se enfoca en la aplicación de nutrientes minerales esenciales para el crecimiento de las plantas, lo que desempeñando un papel importante en la productividad de los cultivos (Taiz et al., 2023). Sin embargo, las plantas solo pueden absorber los minerales del suelo que están disueltos en el agua, lo que limita su disponibilidad ya que las concentraciones naturales de minerales en el suelo suelen ser bajas. Esto hace que en muchos casos sea necesario recurrir a fertilizantes solubles para asegurar una nutrición adecuada de las plantas (Dinakar, 2023).

La aplicación continua de fertilizantes minerales en el suelo en los últimos años se ha relacionado positivamente con la mejora de la fertilidad y un aumento en la productividad de los cultivos. resaltando la importancia de mantener un balance adecuado en la nutrición mineral, garantizando que las plantas reciban los nutrientes necesarios para su desarrollo (Kenenbaev et al., 2023). Un ejemplo de los enfoques basados en minerales dentro de la agronomía, es la horticultura sin suelo, o hidroponía, donde se utilizan soluciones minerales para la nutrición de las plantas, que demuestra cómo los minerales pueden ser aprovechados de diferentes formas para mejorar la eficiencia de los sistemas agrícolas (Robin, 1998).

A pesar de la gran importancia de los nutrientes minerales solubles, los agricultores también dependen de la acción de los microorganismos, cuando se habla de suelo, estos, son los

encargados de descomponer la materia orgánica para liberar minerales y mejorar la fertilidad. Este proceso biológico complementa la aplicación de fertilizantes químicos, ayudando a mantener un equilibrio nutricional en el ecosistema agrícola (Dinakar, 2023).

### **Roca fosfórica**

La roca fosfórica (RF) es un mineral natural de origen sedimentario o ígneo que contiene una alta concentración de minerales de fosfato, los cuales son esenciales para diversas aplicaciones industriales, principalmente en la producción de fertilizantes. (Mar y Okazaki, 2012). Y son la fuente primaria para la fabricación de ácido fosfórico, así como para la producción de fertilizantes fosfóricos (Ryszko et al., 2023). Se compone principalmente de minerales como fluorapatita y hidroxiapatita, con un contenido de  $P_2O_5$  que varía entre el 28,7% y el 31,2% (Ryszko et al., 2023). Además de fósforo, estas rocas pueden contener oligoelementos y otros elementos (Morillo et al., 2007). A nivel mundial, la producción de roca fosfórica se estima en unos 250 millones de toneladas anuales, y su pureza es un factor importante para determinar su comerciabilidad debido a la presencia de elementos menores que pueden influir en su calidad (Rout et al., 2024). Los fertilizantes fosfóricos, que provienen de esta roca, son esenciales para el crecimiento de los cultivos, aproximadamente el 95% de la producción mundial de roca fosfórica se destina a esta industria, (Abouzeid, 2008). Sin embargo, el uso intensivo de roca fosfórica presenta un reto significativo para el futuro. Ya que se estima que para el año 2050 se requerirán entre 45 y 50 millones de toneladas de fertilizantes minerales fosfatados anuales para satisfacer las demandas de producción agrícola, lo que implicará la extracción de alrededor de 350 millones de toneladas de roca fosfórica (Herrera & López, 2016). Planteando problemas no solo por la limitación de las reservas de roca fosfórica, sino también los efectos negativos en el medio ambiente que se puede llegar a causar.

### **Tipos de roca fosfórica**

Las rocas fosfóricas, que se originan tanto de manera sedimentaria como ígnea, son minerales naturales que contienen una alta concentración de fosfatos (Abouzeid, 2008). El mineral más predominante en estas rocas es la fluorapatita, que a menudo está acompañada de impurezas como carbonatos, sodio y magnesio (Bamiki et al., 2021). Además de las rocas sedimentarias, los fosfatos también se encuentran en rocas ígneas y metamórficas, donde la fluorapatita sigue siendo el mineral principal, también pueden encontrarse otras formas de fosfato, como

la hidroxiapatita, que se presenta tanto en rocas como en depósitos biogénicos, como los huesos y dientes de animales (Pufahl & Groat, 2017). El fósforo en estas rocas siempre se encuentra combinado con otros elementos en minerales fosfóricos, principalmente en el grupo de las apatitas, que incluye fluorapatita, cloroapatita e hidroxiapatita. Estos minerales son predominantes no solo en rocas sedimentarias, sino también en ígneas y metamórficas (Pérez, 2019). Los recursos mundiales de fosfato están distribuidos de manera desigual: el 75% proviene de depósitos marinos sedimentarios, entre el 15% y el 20% de fuentes ígneas, metamórficas y meteorizadas, y alrededor del 2-3% proviene de fuentes biogénicas, como los depósitos de guano de aves y murciélagos (Mar y Okazaki, 2012). Más de 40 países producen rocas fosfóricas, siendo los principales productores Estados Unidos, Marruecos, China, Rusia, Túnez, Jordania, Brasil, Israel, Siria, Sudáfrica, Egipto, Australia, Senegal, India, Togo y Canadá. Estados Unidos es el mayor consumidor de roca fosfórica, además de ser el líder en la producción y exportación de fertilizantes (Chen et al., 2007). Marruecos posee la mayor reserva de fosfato, seguido de Sudáfrica y Estados Unidos (Mar & Okazaki, 2012). En términos de los minerales de fosfato presentes en el entorno primario, se incluyen diversos tipos como la apatita-harina (fluorapatita,  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ ), la hidroxiapatita ( $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ), la carbonato-hidroxiapatita ( $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4, \text{CO}_3)_6(\text{OH})_2$ ), y la francolita (Straaten, 2002; Abu-Eishah et al., 1991; Abouzeid, 2008).

### **Uso de la roca fosfórica en suelo**

En los suelos tropicales, la fertilización con roca fosfórica ofrece varias ventajas debido a tres condiciones clave: la alta humedad y temperaturas elevadas favorecen la disolución de los minerales, lo que mejora la disponibilidad de nutrientes (Edwards et al., 2010). No obstante, la efectividad de la roca fosfórica como fertilizante fosfatado varía considerablemente con respuestas agronómicas que van desde efectos mínimos hasta resultados comparables con los de fertilizantes altamente solubles como el superfosfato triple (Chien y Menon, 1995). Esta diversidad en la respuesta agronómica está influenciada por múltiples factores, tales como el manejo del fertilizante, las condiciones edáficas del suelo y las características de las especies vegetales (Edwards et al., 2010). Como fertilizante de baja o mediana solubilidad, la roca fosfórica se considera una fuente económica de fósforo, especialmente para suelos ácidos, donde su uso es más rentable en comparación con fertilizantes más solubles (Ramírez, 2006; Casanova, 1993; Hammond et al., 1986).

Khasawneh y Doll, 1978). Sin embargo, su efectividad se ve limitada en cultivos de ciclo corto debido a su lenta solubilidad en el suelo. Por esta razón, se considera más adecuada como fuente de fósforo para cultivos de ciclo largo, como las plantas forrajeras, que pueden beneficiarse del efecto residual del fósforo liberado por la roca fosfórica durante un período extendido (Chien et al., 1987; Ramírez, 2006). Además de su valor agronómico como fuente de fósforo provee calcio (Ca) para el cultivo, lo que la convierte en una opción viable a largo plazo para mejorar la fertilidad de los suelos ácidos (Morillo et al., 2007; Fernández y Ramírez, 2001; Adediran et al., 1998).

### **Uso de la roca fosfórica en cultivo sin suelo**

La hidropónica es reconocida como un sistema de producción más sostenible, ya que permite cultivar plantas sin el uso de un suelo, lo que favorece un uso más eficiente y controlado del agua y los nutrientes (Fayezizadeh et al., 2021; Kannan et al., 2022). Dentro de este contexto, los sistemas semihidropónicos, que utilizan sustratos para sostener las plantas, se consideran abiertos cuando la solución nutricional no se recupera. Esta solución puede ser aplicada de diversas maneras, como riego por goteo o inundación del sustrato (Fayezizadeh et al., 2021). En cuanto a la fertilización con uso de roca fosfórica ha sido investigada como una fuente alternativa y más sostenible de fósforo en cultivos sin suelo. Esta opción se presenta como una alternativa a los fertilizantes solubles tradicionales, contribuyendo a una gestión más eficiente de los recursos en estos sistemas de cultivo (Mendes et al., 2017). Aunque no reemplaza completamente a efectividad de un fertilizante soluble, esta podría llegar a actuar como un fertilizante de forma suplementaria en este sistema de cultivo.

### **Solubilidad de la roca fosfórica**

La solubilización de la roca fosfórica es un proceso esencial para mejorar la disponibilidad de fósforo en el suelo, ya que es un nutriente crucial para el crecimiento de las plantas (Amarasinghe et al., 2022). Diversos métodos biológicos, químicos y físicos han sido explorados para facilitar este proceso y optimizar el uso de la roca fosfórica en la agricultura (Rodrigues, 2023). En el ámbito biológico, se ha comprobado que ciertos hongos, como *Aspergillus niger* y *Penicillium sp.*, juegan un papel clave en la solubilización de los fosfatos, estos microorganismos, cuando se combinan con materiales orgánicos, como la vinaza de pulpa de café, pueden aumentar la solubilidad de la roca fosfórica hasta en un 17,8% bajo condiciones específicas (Argotte et al., 2020). Además, la aplicación de ácidos orgánicos,

especialmente el ácido cítrico, actúa como un agente quelante, facilitando la liberación del fósforo al promover la disolución del fosfato de roca (Amarasinghe et al., 2022).

Por otro lado, un medio ácido ha mostrado potencial para solubilizar el fósforo de rocas fosfóricas de baja calidad. Este enfoque no solo mejora la disponibilidad de fósforo, sino que también mejora las propiedades del suelo y el rendimiento de los cultivos (Mar y Okazaki, 2012). Además, los procesos de cristalización en dos etapas, utilizando ácido fosfórico y ácido sulfúrico, han sido efectivos para disolver la roca fosfórica, produciendo ácido fosfórico como producto principal y yeso como subproducto (Amarasinghe et al., 2022). En cuanto a los métodos físicos, el ajuste del pH del suelo es otro factor importante que afecta la solubilización de la roca fosfórica. Se ha observado que los niveles de pH más bajos, alrededor de 4,5, favorecen tasas de solubilización más altas en comparación con condiciones neutras, lo que indica que un ambiente más ácido facilita la liberación del fósforo (Novais et al., 2017).

A nivel molecular, el ión fosfato ( $P_i$ ) tiene una alta afinidad por cationes como el calcio, el hierro y el aluminio, con los que forma compuestos insolubles. Estos compuestos reducen la disponibilidad de fósforo para las plantas, dificultando su absorción (Holford, 1997; Peña et al., 2019). Sin embargo, factores como la actividad microbiológica, el pH del suelo y los exudados radiculares pueden facilitar la disolución del fosfato, haciendo que este sea más accesible para las plantas (Richardson et al., 2001; von Wandruszka, 2006).

### **Microorganismos benéficos y/o solubilizadores**

El uso de microorganismos beneficiosos, como bacterias y hongos, para mejorar la disponibilidad de fósforo en los suelos es una estrategia que ha cobrado relevancia en la agricultura, debido a reducir la dependencia de fertilizantes químicos. Estos microorganismos desempeñan un papel fundamental al facilitar la liberación de fósforo de compuestos insolubles, lo que permite su absorción por las plantas (Altomare et al., 1999). Entre los microorganismos más efectivos para la solubilización de fósforo se encuentran diversas especies bacterianas, como *Bacillus*, *Enterobacter* y *Serratia*. Estas bacterias no solo son eficaces para solubilizar fósforo, sino que también producen sustancias que promueven el crecimiento de las plantas (Chen et al., 2023).

Un grupo particularmente relevante de hongos son los hongos micorrícicos arbusculares (HMA), que, junto con otros microorganismos solubilizadores de fósforo presentes en la



rizósfera, juegan un papel esencial en el crecimiento y desarrollo de las plantas hospedadoras. Estos microorganismos facilitan la solubilización de fosfatos insolubles mediante la producción de ácidos orgánicos con fuertes propiedades quelantes, formando complejos con el fósforo y aumentando su disponibilidad para las plantas. En particular, los hongos solubilizadores de fósforo utilizan mecanismos como la acidificación del suelo, la quelación, el intercambio de iones y la producción de ácidos orgánicos de bajo peso molecular, tales como el ácido glucónico, cítrico y oxálico (Arrieta et al., 2015; Della Mónica et al., 2014, 2015; Velázquez et al., 2017a; Mendes et al., 2017).

Además, la aplicación de roca fosfórica de baja ley, una fuente menos procesada de fósforo, combinada con estos microorganismos, se está considerando una opción viable tecnológicamente para mejorar la disponibilidad de fósforo en el suelo (Chen et al., 2023). En suelos donde la roca fosfórica convencional no es eficiente, la combinación de este recurso con microorganismos beneficiosos puede promover la solubilización y movilización del fósforo, lo que trae beneficios significativos en términos de nutrición vegetal (Velázquez et al., 2017). Este enfoque microbiano de fertilización ofrece una alternativa más sostenible y eficiente para mejorar la disponibilidad de fósforo. Sin embargo, aunque los beneficios de estos microorganismos están bien documentados, algunos estudios sugieren que su eficacia puede variar según las condiciones específicas del suelo (Vassileva et al., 2022). Esto indica la necesidad de realizar más investigaciones para optimizar el uso de microorganismos solubilizadores de fósforo en diferentes tipos de suelos y ambientes agrícolas.

### **Trichoderma**

*Trichoderma* es un género de hongos que pertenece al Reino Fungi, en la División Ascomycota, Subdivisión Pezizomycotina, Clase Sordariomycetes, Orden Hypocreales y Familia Hypocraceae. A nivel global, se han identificado un total de 375 especies de este género (Cai y Druzhinina, 2021). En México, un análisis exhaustivo sobre *Trichoderma* reveló una notable diversidad, con 57 especies registradas en el país, lo que resalta la importancia y la amplia distribución de este hongo, especialmente cuando se considera la cifra global de especies (Ahedo-Quero et al., 2024; Cai y Druzhinina, 2021).

La incorporación de *Trichoderma* en sistemas agrícolas sostenibles, particularmente en la agricultura orgánica, ha demostrado ser una estrategia efectiva gracias a sus múltiples beneficios. Entre los más relevantes se encuentran su capacidad para controlar enfermedades

de las plantas de forma biológica, su acción bioestimulante en el crecimiento vegetal y su papel en la biorremediación del suelo, lo que contribuye a mejorar la calidad del medio ambiente (Shahnaz et al., 2024). En México, *Trichoderma harzianum* es la especie predominante, tanto en suelos agrícolas como en suelos no perturbados, lo que indica su excelente adaptación a diferentes tipos de ambientes y su potencial para ser utilizado de manera eficiente en diversas condiciones (Ahedo-Quero et al., 2024).

El funcionamiento de *Trichoderma* se basa en varios mecanismos de acción que incluyen micoparasitismo, antibiosis, competencia por nutrientes y espacio, así como la inducción de resistencia sistémica en las plantas (Altomare et al., 1999). Estos procesos no solo permiten el control de hongos fitopatógenos, sino que también favorecen el crecimiento de las plantas. En particular, se ha observado que *Trichoderma* estimula diversos parámetros del desarrollo vegetal, como el crecimiento de raíces, brotes, flores y frutos, lo que contribuye de manera significativa al rendimiento global de los cultivos (Shahnaz et al., 2024). Además, su capacidad antagónica contra hongos patógenos es fundamental para la competencia por recursos en el suelo, alterando las condiciones microbiológicas y fortaleciendo las defensas de las plantas, lo que mejora su salud y productividad (Gaur et al., 2024).

#### **Uso de *Trichoderma* sp. en la solubilización de minerales**

Muchos microorganismos, especialmente los presentes en la rizósfera, desempeñan un papel crucial en el desarrollo y rendimiento de las plantas. En particular, se ha sugerido que algunos de estos microorganismos contribuyen a la solubilización de nutrientes minerales, lo que facilita su acceso por parte de las raíces (Altomare et al., 1999).

Investigaciones sobre *Trichoderma harzianum* han demostrado su capacidad para solubilizar nutrientes esenciales como fitato, óxidos metálicos ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuO}$ ) y zinc metálico, elementos que son escasamente solubles en el suelo (Li et al., 2015). Lo que resulta un proceso beneficioso para las plantas, promoviendo un mayor crecimiento y acumulación de biomasa (Song et al., 2023). *Trichoderma* es un hongo comúnmente encontrado en la rizósfera, donde no solo actúa como un parásito de hongos fitopatógenos, sino que también contribuye a la producción de vitaminas y mejora la solubilidad de nutrientes esenciales (Singh et al., 2018). Estas interacciones microbianas en la rizósfera tienen un impacto significativo tanto en la nutrición de las plantas como en su resistencia a patógenos, mejorando su salud y productividad (Amoo et al., 2023).

### **Interacción *Trichoderma*-Planta**

El uso de *Trichoderma sp.* en la agricultura ha despertado un interés considerable gracias a sus múltiples beneficios, que van desde su acción como agente de control biológico hasta su capacidad para promover el crecimiento de las plantas. Este hongo establece una relación compleja con las raíces de las plantas, que comienza con su reconocimiento y continúa con etapas de penetración, adhesión y colonización (Ahedo-Quero et al., 2024). Para iniciar la colonización de las raíces, *Trichoderma* forma estructuras especializadas, similares a apresorios, que le permiten adherirse y penetrar en la superficie radicular. Este proceso de unión se ve facilitado por proteínas específicas, como TasHyd1 en *T. asperelloides* y qid74 en *T. harzianum*, que desempeñan un papel crucial en el reconocimiento y adhesión a las raíces (Puyam et al., 2016). Otra característica importante de *Trichoderma* es la presencia de hidrofobinas, proteínas hidrofóbicas ubicadas en la pared celular externa del hongo. Estas hidrofobinas permiten al hongo adherirse eficazmente a las raíces al reconocer la celulosa en la pared celular de las plantas, lo que conduce a modificaciones en su estructura (Gaur et al., 2024). Además, para optimizar la colonización, *Trichoderma* secreta enzimas como celulasas y proteasas, que ayudan a descomponer las paredes celulares vegetales. Por ejemplo, *T. harzianum* produce endopoligalacturonasa, una enzima que degrada la pectina y libera oligogalacturónidos, lo cual facilita aún más la colonización radicular (Behera et al., 2017; Gaur et al., 2024).

### **Agricultura protegida**

La agricultura protegida se refiere a la práctica de producir cultivos en ambientes controlados o cerrados, con el objetivo de mejorar el rendimiento y la calidad de los cultivos, así como de reducir los efectos de factores adversos como el clima extremo y las plagas (Lamichhane et al., 2023). Esta técnica agrícola moderna permite controlar condiciones ambientales cruciales, como la temperatura y la humedad, aumentando considerablemente la productividad y la calidad de los cultivos (Banjare et al., 2024; Jain et al., 2023).

La horticultura protegida se ha extendido en la producción de una amplia variedad de productos hortícolas, incluyendo vegetales, frutas, flores y hierbas (Tüzel y Kacira, 2021). Una de sus ventajas principales es la posibilidad de producción continua durante todo el año, lo que reduce la dependencia de ciclos estacionales y mejora la disponibilidad de alimentos (Jain et al., 2023). Desde una perspectiva económica, estudios han demostrado que cultivos

como el pimiento y el tomate ofrecen altos beneficios netos bajo estas condiciones controladas (Ruli et al., 2024). Además, esta técnica de cultivo ha dado lugar a diferentes ideas de producción innovadoras como la hidroponía y la agricultura vertical, que optimizan el uso del espacio y los recursos disponibles, maximizando la eficiencia productiva (Banjare et al., 2024). Sin embargo, este tipo de agricultura también presenta desafíos, como los altos costos iniciales de instalación y las demandas energéticas significativas (Banjare et al., 2024; Jain et al., 2023). A nivel global, los cultivos bajo cubierta siguen expandiéndose. Según datos recientes de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, en 2023 la superficie mundial de cultivos hortícolas bajo condiciones protegidas alcanzó aproximadamente 623,302 hectáreas, siendo China el mayor productor con un 45% de esta área, seguido de Turquía, España, Italia y Japón.

### **Ornamentales**

El término "planta ornamental" hace referencia a todas aquellas plantas cultivadas principalmente por su valor estético, ya sea por sus flores llamativas, su arquitectura particular o su follaje decorativo (Zheng et al., 2021). Este grupo incluye una gran diversidad de especies que se emplean en paisajismo y decoración, abarcando desde árboles y arbustos hasta plantas anuales y suculentas. Se estima que existen entre 85,000 y 99,000 especies diferentes que son reconocidas por su valor ornamental (Chowdhuri y Deka, 2019). Dentro de la floricultura, el cultivo de plantas ornamentales se clasifica en varias categorías: plantas de jardín, herbáceas, perenes, con flores, de follaje (frecuentemente conocidas como plantas de interior), y flores de corte (Chen, 2021). Esta variedad satisface diversas necesidades decorativas, desde jardines exteriores hasta arreglos de interiores y eventos.

México cuenta con aproximadamente 12,600 hectáreas dedicadas al cultivo de plantas ornamentales, lo cual representa el 23% del área total de cultivos ornamentales en América Latina (Villalobos et al., 2024). La producción de flores en México tiene una larga historia que se remonta a tiempos prehispánicos, con el cultivo de plantas a los que se le denominaban, los jardines flotantes de las chinampas y jardines del gobernante Netzahualcóyotl. Además, en aquellos tiempos los aztecas ya cultivaban la nochebuena o cuetlaxochitl, que sigue siendo una planta emblemática (Quintero et al., 2011). La industria de la horticultura ornamental es de gran relevancia económica, impulsada por la demanda de los consumidores que buscan mejorar la estética de sus jardines, espacios interiores y eventos

mediante el uso de plantas y flores cortadas (Beruto et al., 2024). Esta creciente demanda sostiene el desarrollo y expansión de la industria, consolidando su importancia en el sector agrícola y decorativo.

### **Gerbera**

La Gerbera (*Gerbera jamesonii*), también conocida como margarita de Transvaal, margarita de Barbeton o margarita africana, es una especie herbácea de la familia Asteraceae originaria de regiones de Sudáfrica y Asia (Miyoshi y Asakura, 1996). Fue descubierta en 1880 en Barbeton, Sudáfrica, por el escocés Robert Jameson, y su nombre genérico honra al naturalista alemán Traugott Gerber. Actualmente se denominan cultivares modernos, que son ampliamente utilizados tanto en macetas como en la industria de las flores cortadas, son el producto de programas de hibridación interespecífica (Mahanta & Gantait, 2024). Ya que se trata de una planta herbácea, vivaz, de crecimiento en roseta, cuyo cultivo puede durar varios años, aunque comercialmente solo interesa cultivarla durante dos o tres (Soroa, 2005). Siendo características de importancia que la hace una planta capaz para su producción de flores tanto en maceta como de corte, con muy buen interés comercial debido a sus diversos colores y variedades.

La gerbera actual resulta de la hibridación entre *Gerbera jamesonii*, *Gerbera viridifolia* y, posiblemente, otras especies. Por ello, se le conoce con diversas denominaciones, tales como *Gerbera jamesonii hybrida*, híbridos de *Gerbera jamesonii* o simplemente *Gerbera hybrida* (Carrodegua-Gonzalez y Orozco, 2020). Es una hierba perenne sin tallo, con hojas radicales lanceoladas y pecioladas que crecen en forma de roseta en la base. Sus flores, disponibles en una amplia gama de colores como blanco, amarillo, naranja, rojo, magenta, rosa y escarlata, presentan una estructura floral compleja (Soroa, 2005). La cabeza floral o capítulo, aunque parece una sola flor, en realidad está compuesta por cientos de flores individuales organizadas en tres tipos de flósculos que forman un anillo difuso entre los flósculos radiales y de disco. El color del centro o disco puede ser claro u oscuro los discos de tonos más oscuros crean un contraste atractivo (Mahanta y Gantait, 2024)

El manejo agronómico de la gerbera requiere atención a diversos factores clave, que influyen directamente en la calidad y rendimiento del cultivo. La iluminación es uno de los elementos más críticos para el desarrollo de la gerbera. Este cultivo prospera bajo intensidades lumínicas altas, siendo ideales entre 43,000 y 65,000 lux después del trasplante. Sin embargo,

cuando los niveles de luz superan los 75,000 lux, se recomienda el uso de sombra para evitar daños en las plantas (Kieft Seed, 2013). La luz no solo afecta el crecimiento, sino también el color y tonalidad de las flores, además de incrementar la cantidad de flores producidas a medida que aumenta la radiación fotosintéticamente activa (PAR) (García, 2004). El uso de luz suplementaria de 12 horas en invernaderos ha demostrado aumentar la producción de flores hasta en un 21.3% en cultivares específicos como *Ruby Red* y *Vino* (Mustapić-Karlič et al., 2012). En cuanto a las condiciones climáticas, los mejores rendimientos de la gerbera se obtienen con periodos de luz superiores a 12 horas y temperaturas de 22°C durante el día y 15°C durante la noche, características típicas de la primavera y el verano (Monroy, 2001). Por otro lado, la humedad relativa también juega un papel crucial. Para lograr flores de corte de alta calidad, se recomienda mantener una humedad relativa del 80%, aunque niveles entre 75% y 90% son aceptables valores superiores pueden causar manchas y deformaciones en las flores (García, 2004).

### **Importancia de la gerbera**

La gerbera (*Gerbera jamesonii*) es una de las flores cortadas más importantes y populares en el mercado internacional, destacándose entre las cinco principales variedades en términos de demanda y valor ornamental (Zulfiqar et al., 2023). Su atractivo radica en la amplia gama de colores de sus flores, que incluye tonos vibrantes. Esta característica, junto con su disponibilidad durante todo el año, le ha generado a la gerbera una opción preferida en la industria floral en distintas partes del mundo (Mahanta y Gantait, 2024b).

En México, la producción de flores ornamentales, incluidas especies como el crisantemo, la rosa, la gladiola y la gerbera, alcanzaron un volumen de aproximadamente 27 millones 388 mil gruesas en 2023, de acuerdo con el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). La gerbera, en particular, es cultivada exclusivamente en el Estado de México, el cual registró una producción de un millón 375 mil gruesas en un área de 114 hectáreas (SIAP, 2024). Además que, este estado lidera la producción ornamental en el país, seguido por Morelos, Puebla, Querétaro, Jalisco, Ciudad de México, Guerrero, Hidalgo, Oaxaca y Tlaxcala (SIAP, 2023).

El impacto de la gerbera en el mercado nacional y global se debe tanto a su belleza como a sus propiedades decorativas, que la hacen ideal para arreglos florales y eventos especiales (Zulfiqar et al., 2023). La capacidad de esta planta para adaptarse a diversas condiciones de

cultivo y su cultivo especializado en México resaltan su importancia dentro de la floricultura ornamental y contribuyen al fortalecimiento del sector agrícola ornamental del país.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Localización del área de estudio

El trabajo de investigación se llevó a cabo durante el periodo de primavera a otoño de 2024 en un invernadero híbrido del departamento de Horticultura en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, que se encuentra ubicada entre los 25° 32' 42'' de latitud norte y 100° 50' 57'' de longitud oeste, a una altitud de 1790 msnm ubicada en Saltillo, Coahuila, México.

### Material vegetal

El material vegetal empleado consistió en plántulas de gerbera de la variedad *Forza*, reconocida por su distintivo color rojo intenso y centro negro. Estas plántulas fueron adquiridas en un vivero certificado ubicado en Villa Guerrero, Estado de México. Cada plántula con una longitud promedio de 8 a 10 cm, fue cuidadosamente agrupada en paquetes de cinco unidades y envuelta en nailon transparente, lo que proporcionó protección y estabilidad, reduciendo el riesgo de daños mecánicos al follaje y las raíces. Adicionalmente, las cajas de cartón utilizadas para el transporte incluían orificios de ventilación que aseguraron una adecuada circulación de aire, evitando la acumulación excesiva de humedad y manteniendo las plántulas en condiciones óptimas hasta su llegada.

### Material fúngico

*Trichoderma harzianum* se obtuvo de muestras conservadas en arena estéril, el cual fue reactivado en medio PDA (papa-dextrosa-agar 39 g/L) y una vez que el hongo colonizó por completo el medio de cultivo formando micelio, se procedió a cuantificar las esporas producidas empleando una cámara Neubauer y determinando la concentración de esporas ( $1 \times 10^6$ ).

### Roca fosfórica

Este mineral fue obtenido de manera comercial de la empresa “RORZA” dicho material contenía una concentración de 25% de  $P_2O_5$ .



### Diseño experimental

Se utilizó un diseño experimental de bloques al azar con un arreglo factorial 2x5, lo que resultó en un total de 10 tratamientos (Cuadro1) con 4 repeticiones, cada una con dos unidades experimentales, sumando un total de 80 plantas.

**Cuadro 1.-** Tratamientos evaluados obtenidos apartir de las combinaciones de los niveles de cada factor en estudio.

| Tratamiento | Roca<br>fosfórica<br>(ppm) | Hongo<br>(UFC)  |
|-------------|----------------------------|-----------------|
| T1          | 0                          | $1 \times 10^6$ |
| T2          | 45                         | $1 \times 10^6$ |
| T3          | 90                         | $1 \times 10^6$ |
| T4          | 135                        | $1 \times 10^6$ |
| T5          | 180                        | $1 \times 10^6$ |
| T6          | 0                          | 0               |
| T7          | 45                         | 0               |
| T8          | 90                         | 0               |
| T9          | 135                        | 0               |
| T10         | 180                        | 0               |

### Instalación del experimento

El experimento se instaló el 23 de marzo de 2024 en un invernadero tipo malla sombra, evaluando cinco concentraciones de fósforo (P) en forma de roca fosfórica: 0, 45, 90, 135 y 180 ppm, en combinación con dos niveles de inoculación de *Trichoderma* sp. 0 y  $1 \times 10^6$  UFC, (unidades formadoras de colonias) (cuadro 1). Se utilizaron 80 bolsas de polietileno negro con una capacidad de 8 litros cada una, llenadas con un sustrato compuesto por una mezcla de 65% turba (peat moss) y 35% perlita, (en base a volumen).

Las diferentes concentraciones de roca fosfórica se incorporaron de manera uniforme durante el llenado de las bolsas garantizando una distribución homogénea del fósforo. La aplicación se realizó gradualmente, espolvoreándola mientras se completaba el llenado con los 8 litros de sustrato, repitiendo este proceso para cada uno de los tratamientos. Posterior al llenado y la preparación de las bolsas, se procedió al trasplante de las plántulas y el acomodo dentro del invernadero, las cuales fueron colocadas encima de cajas de plástico para evitar alguna

contaminación. Se formaron dos hileras de plantas, con una distancia promedio de 20 a 25 cm de separación entre plantas y un aproximado de 15 a 20 cm entre hileras, obteniendo 4 bloques con 1m de separación.

El día del trasplante el riego se realizó manualmente colocando 1 L de agua por planta y a los dos días siguientes se realizó el riego con solución nutritiva, durante el transcurso del experimento, se aplicaron dos soluciones nutritivas distintas: en los tratamientos con roca fosfórica, se utilizó una solución de Steiner modificada al 80%, omitiendo el fósforo; mientras que, en los tratamientos sin roca fosfórica, se aplicó la solución completa de Steiner al 80%.

El riego se realizaba de cada 2 a 3 días dependiendo la temperatura del ambiente con ayuda de un sistema de riego por goteo, cuidando siempre de un 25 a 30 % de drenaje en la planta para evitar acumulación de sales en el sustrato.

Un mes después del trasplante se llevó a cabo la inoculación de *Trichoderma harzianum*, a una concentración de  $1 \times 10^6$ . Durante el periodo de cultivo, se realizaron varias podas de mantenimiento, enfocadas en eliminar únicamente las hojas viejas y dañadas. Estas hojas se recolectaban y almacenaban de manera individual por planta, para obtener el peso seco total al final del experimento.

Además, se aplicaron productos orgánicos como jabón potásico extracto de ajo y neem de manera preventiva para el control de plagas y enfermedades, garantizando un manejo adecuado de estos factores.

### **Variables**

Se evaluaron distintas variables relacionadas con el desarrollo radical, vegetativo y reproductivo de las plantas bajo diferentes tratamientos.

#### **Variables del sistema radical:**

- Volumen de raíz (VR). se realizó un lavado de raíz tratando de retirar todo el sustrato con cuidado de romper lo menos posible las raíces posteriormente, se colocaron en una probeta con un volumen conocido de agua, y se determinó el desplazamiento del agua como medida del volumen de la raíz en  $\text{cm}^3$ .
- Longitud de raíz (LR). Se midió desde la base de la corona hasta la raíz más distal con una regla graduada en cm.

- Peso seco de raíz (PSR). Las raíces fueron secadas en un horno a 70 °C durante 48 horas y el peso se registró utilizando una balanza analítica en gr.

#### **Variables de crecimiento vegetativo:**

- Número de hojas (NH). Se realizó un conteo manual de las hojas completamente desarrolladas en cada planta, cuando se hizo la evaluación completa de todas las variables, ya que fue un experimento destructivo.
- Peso seco aéreo (PSA). Las plantas fueron cosechadas, separadas en su biomasa aérea, y posteriormente secadas en un horno a 70 °C durante 48 horas. Y el peso se registró utilizando una balanza analítica en gramos.
- Dimensiones foliares:
  - Longitud de hoja (LH). Se midió desde la base del pecíolo hasta la punta de la hoja con una regla graduada en cm.
  - Ancho de hoja (AH). Se midió en la parte más ancha de la hoja utilizando una regla graduada en cm.
- Diámetro de corona (DC). Se registró el diámetro de la base de la planta con un vernier digital en mm.
- Peso seco de corona (PSC). Después de separar la corona de la planta, esta fue secada en horno a 70 °C durante 48 horas y pesada en una balanza analítica en gr.

#### **Variables de desarrollo reproductivo:**

- Número de flores (NF) y número de botones (NB). Se contabilizaron las flores abiertas por planta a lo largo del tiempo desde su establecimiento hasta su evaluación final, así mismo con los botones los cuales se contabilizaron en el momento de la evaluación final.
- Diámetro de flor (DF). Se midió en la parte más ancha de la flor utilizando una regla graduada en cm.
- Diámetro del tallo floral (DTF). Se midió a 15 cm por debajo de la base de la flor con un vernier, se tomaron 2 mediciones diferentes en orientación contraía y se sacó una media de ese valor en mm.
- Longitud del tallo floral (LTF). Se midió desde la base del tallo hasta la base de la flor con un flexómetro en cm.

**Análisis estadístico**

Los datos colectados fueron sometidos a un análisis de varianza (ANVA) y una comparación de medias con Tukey al 0.05. Se utilizó el paquete estadístico SAS versión 9.0.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La aplicación de *Trichoderma sp.* tuvo un efecto diferenciado sobre las variables radicales de *Gerbera jamesonii* (Cuadro 2). Aunque no se observaron diferencias significativas en el volumen de raíz (VR) ni en la longitud de raíz (LR), el peso seco de raíz (PSR) sí fue significativamente afectado. La inoculación con *Trichoderma sp.* provocó una reducción del 11.6 % en PSR respecto al tratamiento sin hongo. El efecto de la roca fosfórica (RF), se observaron diferencias altamente significativas en todas las variables evaluadas (Cuadro 2). El mayor VR al igual que el mayor PSR se registraron en el tratamiento sin adición de RF (fertilización de fósforo soluble) mientras que el valor más bajo se presentó con 45 ppm de P en forma de RF, lo que representa una reducción del 65.0 %. En cuanto a la longitud de raíz, el valor más alto se observó a los 45 ppm, un incremento del **29.5 %** respecto al tratamiento sin RF lo cual sugiere una elongación radicular en condiciones de baja disponibilidad de fósforo. Coincidiendo con Kim y Li, (2016) quienes señalan que, el incremento de la longitud de las raíces en condiciones de ausencia o baja disponibilidad de fósforo (P) es una respuesta adaptativa de las plantas para optimizar la adquisición de este nutriente esencial.

La interacción entre *Trichoderma sp.* y las diferentes dosis de fósforo fue significativa en todas las variables ( $p < 0.01$ ), lo que evidencia que la respuesta morfológica del sistema radical depende del equilibrio entre la disponibilidad de fósforo y la acción del hongo (cuadro 2 ). Por ejemplo, en presencia del hongo, la reducción del peso seco de raíz fue más pronunciada en los tratamientos con baja disponibilidad de fósforo (45 ppm), mientras que, en ausencia del hongo, la raíz mostró mayor volumen y biomasa, particularmente en el tratamiento sin RF. Así mismo Harman et al. (2004) afirman que los hongos *Trichoderma* estimulan el crecimiento de las raíces de las plantas cultivadas en suelo, pero esto dependerá totalmente de la especie ya que *T. sp. "atroviride B"* LU132 y *T. virens* Gv29.8, indujeron una reducción en la longitud de la raíz primaria y un aumento en el número de raíces secundarias. Resultados similares obtuvieron Nieto-Jacobo et al., (2017) pues mencionan que cuando las plantas de *Arabidopsis* se inocularon con *Trichoderma sp.*, la longitud de la raíz primaria disminuyó entre un 20 y un 25% y el número de raíces

secundarias aumentó entre un 60 y un 90%, lo que a su vez resultó en un aumento masivo en la densidad de raíces.

**Cuadro 2 .** Efecto de la inoculación de hongo y uso de diferentes concentraciones de roca fosfórica en variables relacionadas con la raíz de las plantas de gerbera Var. Forza.

| Hongo $1 \times 10^6$ UFC | Volumen de raíz (cm <sup>3</sup> ) | Longitud de raíz (cm) | Peso seco de raíz (gr) |
|---------------------------|------------------------------------|-----------------------|------------------------|
| sin                       | 119.333a                           | 28.986a               | 14.156a                |
| con                       | 116.8 000a                         | 27.950a               | 12.516b                |
| ANVA $P \leq$             | 0.4735                             | 0.1247                | 0.0027                 |
| Roca fosforica (ppm)      |                                    |                       |                        |
| 0                         | 208.583a                           | 24.507d               | 18.500a                |
| 45                        | 72.917d                            | 31.750a               | 9.891c                 |
| 90                        | 99.583bc                           | 30.833ab              | 13.708b                |
| 135                       | 114.167b                           | 28.583bc              | 13.833b                |
| 180                       | 95.083c                            | 26.667cd              | 10.750c                |
| ANVA $P \leq$             | <.0001                             | <.0001                | <.0001                 |
| INTERACCIÓN $P \leq$      | 0.0047                             | <.0001                | <.0001                 |
| CV                        | 11.4954                            | 9.0084                | 14.999                 |

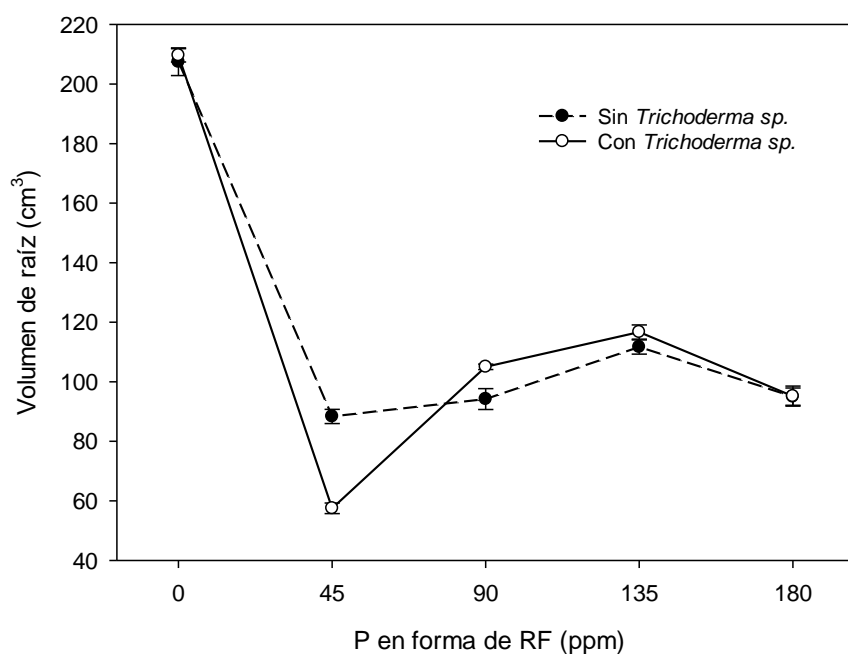
Medias con la misma letra en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de comparación múltiple de Tukey con  $p \leq 0.5$ , ANVA= análisis de varianza. C.V= coeficiente de variación.

### Volumen de raíz (VR)

La interacción entre *Trichoderma sp.* y la aplicación de roca fosfórica sobre el volumen de raíz indica que el efecto del hongo depende de la concentración de fósforo en el sustrato, y viceversa (Figura 1). A 0 ppm de P (fertilización soluble completa), con la inoculación de *Trichoderma sp.*, el volumen de raíz fue ligeramente menor que el tratamiento sin hongo, pero, a 45ppm de P en forma de RF redujo notablemente el volumen de raíz respecto al tratamiento sin hongo, sugiriendo una posible competencia por nutrientes en condiciones de deficiencia. Defiriendo con distintos autores quienes mencionan que el hongo del genero *Trichoderma* aparte de promover el crecimiento de las raíces también aumenta la biomasa radicular mejorando la absorción de los nutrientes (Ahedo-Quero et al., 2024; Battaglia et al., 2024; Gaur et al., 2024) del mismo modo es importante tomar en cuenta el medio de crecimiento del cultivo, ya que a pesar que el hongo genera buenos resultados en suelo

también es importante reconocer que en un cultivo sin suelo, estos efectos pueden variar así como lo mencionan Tančić-Živanov et al., (2020) pues argumentan que a pesar de que algunos estudios demuestran buenos resultados también es importante considerar la especie, la sepa y las condiciones ambientales.

No obstante, conforme se incrementó la dosis de RF, el efecto de *Trichoderma sp.* fue más favorable, observándose un aumento progresivo del volumen radical, alcanzando un valor máximo a 135 ppm. En contraste, en ausencia del hongo, la respuesta al fósforo fue disminuyendo conforme se aumentaba la dosis (Figura 1). Estos resultados evidencian una interacción fisiológica y nutricional entre ambos factores, donde la presencia de *Trichoderma sp.* puede potenciar el desarrollo radical únicamente en condiciones donde hay disponibilidad adecuada de fósforo. Investigaciones mencionan que a pesar de que este hongo contribuye a solubilizar el fosfato para ayudar a las plantas a su mejor absorción Bononi et al. (2020) reportan que solamente son algunas cepas las que tienen esta capacidad 47 de 251 aislados amazónicos presentaron potencial solubilizador.



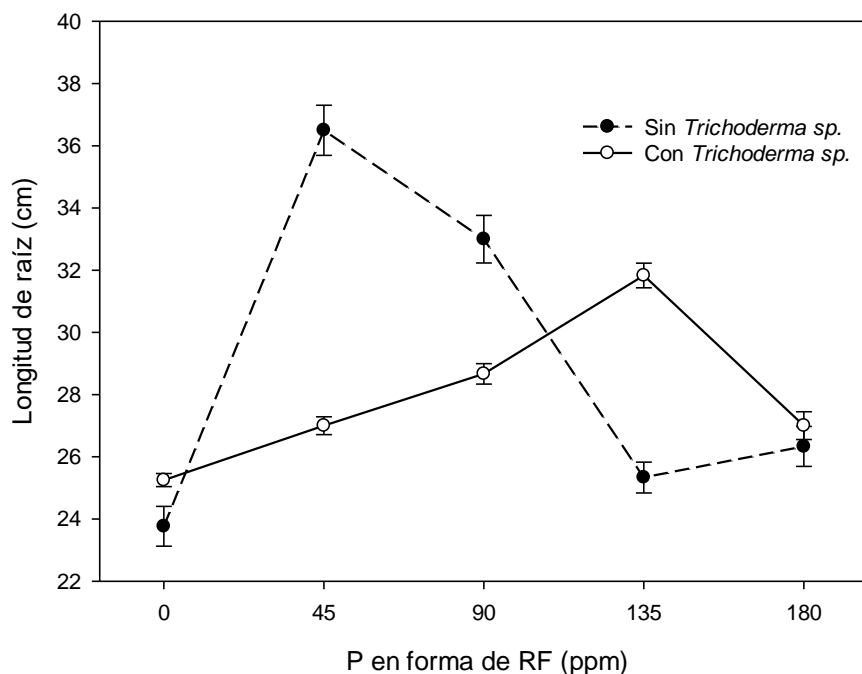
**Figura 1.-** Interacción entre la aplicación de roca fosfórica y la presencia o ausencia de *Trichoderma sp.* sobre el volumen de raíz en gerbera Var. Forza en cultivo sin suelo.

### **Longitud de la raíz (LR)**

La interacción entre *Trichoderma sp.* y las diferentes concentraciones de fósforo en forma de roca fosfórica tuvo un efecto altamente significativo sobre la longitud de raíz en *Gerbera Jamesonii* (Figura 2). En ausencia del hongo, la longitud de raíz mostró un incremento marcado hasta alcanzar su punto máximo con 45 ppm de fósforo, seguido por una disminución progresiva a mayores concentraciones. Indicando que bajo concentraciones de poca disponibilidad o limitación de P soluble las plantas priorizan el crecimiento y la elongación de las raíces como una estrategia adaptativa. Del mismo modo Liu et al., (2023) señalan que, el aumento en la longitud de las raíces bajo condiciones de baja disponibilidad de fósforo es una respuesta fisiológica clave para optimizar la adquisición de este nutriente. Además, White (2019) menciona que las plantas tienen la capacidad de sobrevivir y desarrollarse en ambientes con deficiencia de nutrientes mediante ajustes en su arquitectura radicular.

Por el contrario, en plantas inoculadas con *Trichoderma sp.*, se observó una tendencia ascendente en la longitud de raíz desde 0 hasta 135 ppm, con una disminución posterior a 180 ppm. A partir de 90 ppm, las plantas con *Trichoderma*, presentaron mayor longitud de raíz en comparación con las plantas no inoculadas *sp* (Figura 2). Indicando que la presencia del hongo a baja disponibilidad de P soluble la raíz no aumenta su longitud exponencialmente si no que aumenta gradualmente. Mismo que mencionan (Harman et al., 2004; Nieto-Jacobo et al., 2017) donde concuerdan que a pesar que los hongos del género *Trichoderma sp.* En algunas especies ayudan con el crecimiento y desarrollo radicular, existen especies de plantas en donde se puede reducir la longitud de raíz primaria entre un 20 y un 25%.





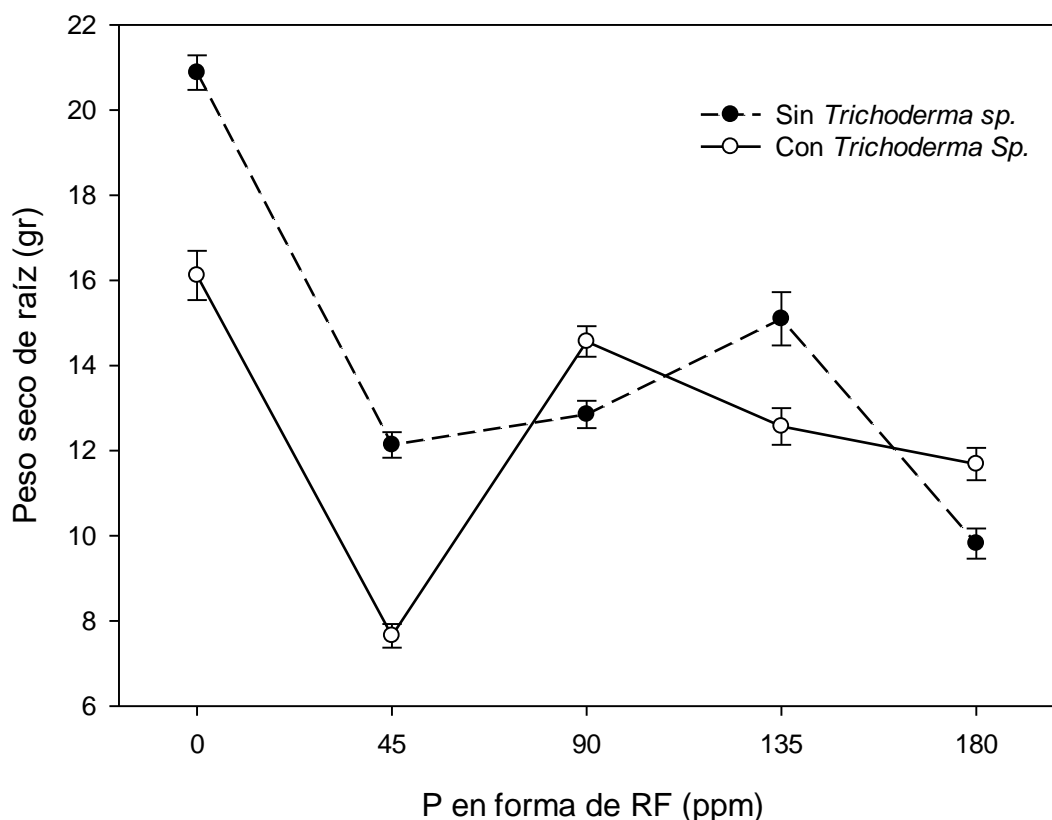
**Figura 2.-** Interacción entre la aplicación de roca fosfórica y la presencia o ausencia de *Trichoderma sp.* sobre la longitud de raíz en gerbera Var. Forza en cultivo sin suelo.

### Peso seco de raíz (PSR)

La interacción entre la inoculación con *Trichoderma sp.* y la aplicación de fósforo en forma de roca fosfórica sobre el peso seco de raíz en *Gerbera Jamesonii* (Figura 3). En ausencia del hongo, el mayor peso seco de raíz se observó a 0 ppm de roca fosfórica, lo cual indica que las plantas aprovecharon eficientemente el fósforo soluble del sistema. Al aplicar roca fosfórica, el crecimiento radicular disminuyó drásticamente, probablemente porque el fósforo en esta forma no fue disponible para la planta en estas condiciones. Taiz et al. (2023), mencionan para que las plantas crezcan y se desarrollen adecuadamente, es fundamental la presencia de los macronutrientes esenciales y estudios realizados por Kayoumu et al. (2023) demostraron que la baja disponibilidad de P reduce el área foliar, la longitud de los brotes y el peso seco en genotipos específicos de algodón.

Por otro lado, en plantas tratadas con *Trichoderma sp.*, el peso seco inicial fue menor, pero las plantas mostraron una mejora progresiva a medida que aumentó la dosis de roca fosfórica. Esto podría deberse a la acción del hongo al solubilizar el fósforo, mejorando su

disponibilidad en el sistema sin suelo. Las investigaciones indican que la aplicación de *Trichoderma* no solo mejora la disponibilidad de fósforo sino que también estimula la morfología radicular, resultando en un mejor rendimiento (Ahedo-Quero et al., 2024; Altomare et al., 1999; Arrieta et al., 2015) aunque esto dependerá de la sepa, especie y condiciones ambientales (Tančić-Živanov et al., 2020).



**Figura 3.-** Interacción entre la aplicación de roca fosfórica y la presencia o ausencia de *Trichoderma harzianum* sobre el peso seco de raíz en gerbera Var. Forzar en cultivo sin suelo.

La inoculación con *Trichoderma sp.* generó efectos significativos sobre las variables morfológicas aéreas de *Gerbera Jamesonii* (Cuadro 3). En ausencia del hongo, las plantas presentaron un mayor número de hojas (NH), lo que representa un incremento del 15.5 % respecto a las plantas inoculadas. Asimismo, el peso seco aéreo (PSA) fue 25.5 % superior sin *Trichoderma sp.* De forma similar, la longitud de hoja (LH) y el ancho de hoja (AH), así como el diámetro de corona (DC) y peso seco de corona (PSC), se redujeron en presencia del

hongo entre un 7.4 % y 23.6 %, lo que sugiere una limitación en el desarrollo vegetativo bajo estas condiciones.

En relación con la aplicación de roca fosfórica (RF), se observaron diferencias altamente significativas en la mayoría de las variables evaluadas, excepto en el ancho de hoja (AH). El mayor número de hojas (NH) se registró en el tratamiento sin RF (0ppm), lo cual fue **51.9 %** superior al tratamiento con 45 ppm. El peso seco aéreo (PSA) y peso seco de corona (PSC) también alcanzó su máximo valor en ausencia de RF. Estos resultados indican que una alta disponibilidad inicial de fósforo soluble favorece el crecimiento vegetativo. De la misma manera diferentes investigaciones concuerdan que una alta disponibilidad inicial de P mejora la absorción de nutrientes, la acumulación de biomasa y la productividad de la planta (Chen et al., 2023; Fouad Abobatta y Abd Alla, 2023; Grzebisz et al., 2024).

Para la longitud de hoja (LH), y el diámetro de corna (DC) mostraron una respuesta positiva con 180 ppm de P en forma de RF. Este comportamiento podría estar relacionado a una adecuada disponibilidad de este elemento ya que es un elemento indispensable para la división y elongación celular pudiendo promover un mayor alargamiento del tallo. De igual manera Justice y Faust, (2015) mencionan que, una reducción de los niveles de P en *Impatiens x hybrida* de 12 a 0 ppm resultó en una disminución notable de la altura del tallo asumiendo que una menor disponibilidad de P puede reducir su elongación. De la misma manera el uso de roca fosforica como fertilizante se ha comprobado que tiene una buena respuesta, así como lo concluyo Velasco (2006) mencionando que, la adición de polvo de roca al sustrato puede ser una alternativa en plantas de maracuyá para reducir la utilización de fertilizantes fosfatados.

La interacción entre *Trichoderma sp.* y la dosis de RF fue significativa en NH, PSA y PSC, lo que sugiere una respuesta dependiente del equilibrio entre la disponibilidad de fósforo y la presencia del hongo. En particular, el tratamiento sin RF y sin hongo mostró los mejores resultados en la mayoría de las variables, mientras que los tratamientos con 45 ppm, en presencia del hongo, presentaron los valores más bajos, indicando una posible competencia entre la planta. Walter et al. (2014) menciona que, en suelos con alta sorción de fosforo la capacidad de *Trichoderma* para aumentar el fosforo soluble se ve disminuido, lo que resalta en una menor respuesta de crecimiento, así mismo otros autores indican que la presencia de bajos niveles de fosforo puede desencadenar la conidiación en *Trichoderma*, lo que se refleja

como una respuesta al estrés, limitando su capacidad para promover el crecimiento en dichas condiciones (Osorio-Concepción et al., 2012). Además de esto estudios recientes de *Trichoderma* y diversos niveles de fósforo, se observó que si bien el *Trichoderma* puede promover el crecimiento y la absorción de nutrientes, sus beneficios son menos pronunciados cuando el fósforo es deficiente (Duan et al., 2023).

**Cuadro 3.-** Efecto de la inoculación de hongo y uso de diferentes concentraciones de roca fosfórica en variables morfológicas aéreas de las plantas de *Gerbera* Var. Forza.

| Hongo 1X106 UFC      | Numero de hojas | Peso seco aéreo (g) | Longitud de hoja (cm) | Ancho de hoja (cm) | Diámetro de corona (mm) | Peso seco de corona (g) |
|----------------------|-----------------|---------------------|-----------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------|
| sin                  | 28.866a         | 20.326a             | 28.204a               | 9.956a             | 28.204a                 | 2.773a                  |
| con                  | 25.000b         | 16.181b             | 25.940b               | 8.958b             | 25.962b                 | 2.250b                  |
| ANVA $P \leq$        | <.0001          | <.0001              | 0.0005                | 0.0026             | 0.0006                  | 0.0011                  |
| Roca fosfórica (ppm) |                 |                     |                       |                    |                         |                         |
| 0                    | 35.333a         | 24.483a             | 27.899ab              | 8.985a             | 27.899ab                | 3.950a                  |
| 45                   | 23.250c         | 14.366c             | 25.435b               | 9.295a             | 25.435b                 | 1.791c                  |
| 90                   | 25.500bc        | 17.258b             | 25.714b               | 9.554a             | 25.714b                 | 2.125bc                 |
| 135                  | 26.500b         | 17.766b             | 27.486ab              | 9.245a             | 27.486ab                | 2.025bc                 |
| 180                  | 24.083bc        | 17.391b             | 28.825a               | 10.208a            | 28.880a                 | 2.666b                  |
| ANVA $P \leq$        | <.0001          | <.0001              | 0.0034                | 0.1528             | 0.0029                  | <.0001                  |
| INTERACCIÓN $P \leq$ | <.0001          | <.0001              | 0.7487                | 0.5156             | 0.7425                  | <.0001                  |
| CV%                  | 7.74            | 9.13                | 8.68                  | 12.84              | 8.65                    | 23.18                   |

Medias con la misma letra en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de comparación múltiple de Tukey con  $p \leq 0.0$ . ANVA= análisis de varianza. C.V= coeficiente de variación.

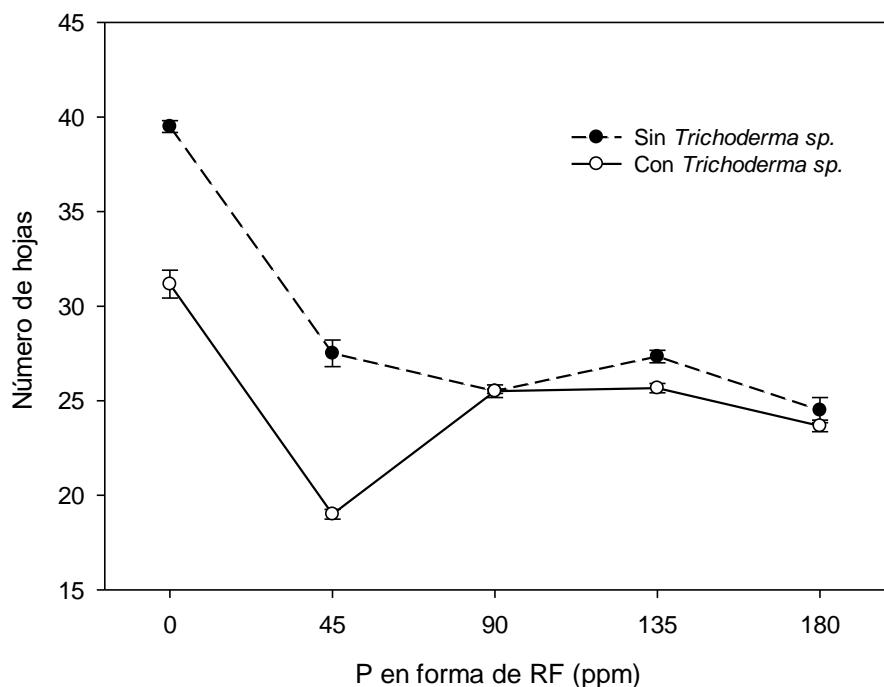
### Numero de hojas (NH)

La interacción entre la inoculación con *Trichoderma sp.* y la aplicación de fósforo en forma de RF afectó significativamente el número de hojas en *Gerbera* cultivada en un sistema sin suelo (Figura 4). En ausencia del hongo, el mayor número de hojas se observó a 0 ppm de RF (fertilización con fósforo soluble), las plantas sin inoculación con *Trichoderma sp.* presentaron el mayor NH, lo que indica una alta eficiencia en la respuesta vegetativa ante una fuente de fósforo de rápida disponibilidad. De la misma forma diversas investigaciones indican que los fertilizantes de fósforo soluble generalmente mejoran el crecimiento en las

plantas en comparación con la roca fosfórica debido a su mayor solubilidad y disponibilidad inmediata (Chatterjee y Margenot.,2023; Rezakhani et al., 2019; Somavilla et al., 2021)

En contraste, la presencia de *Trichoderma sp.* en esta condición redujo significativamente el número de hojas, con una disminución marcada a 45 ppm, aunque en 90 y 135 ppm se observó una tendencia hacia la estabilización. No obstante, en ningún punto la inoculación con *Trichoderma sp.* mejoró el número de hojas respecto al tratamiento sin el hongo (Figura 4).

Estos resultados sugieren que la acción de *Trichoderma sp.* en gerbera está influenciada por la forma y disponibilidad del fósforo, y que bajo las condiciones de este estudio no se evidenció una mejora en el desarrollo foliar atribuible a su presencia, especialmente cuando el fósforo provino exclusivamente de RF. A pesar de que varias investigaciones mencionan que el uso de *Trichoderma* puede mejorar la adquisición de nutrientes y mejorar el desarrollo de los cultivos la mayoría de estas se enfocan en plantas cultivadas en suelo (Altomare et al., 1999; Amarasinghe et al., 2022; Chen et al., 2023) lo que posiblemente el uso de roca fosfórica en un cultivo sin suelo el P se encuentra menos disponible a comparación de un fertilizante soluble ya que, Olivera et al., (2020) indican que, el uso de *Trichoderma harzianum* en sistemas hidropónicos aumento el contenido de P en las hojas contribuyendo a un mejor desarrollo de las plantas.



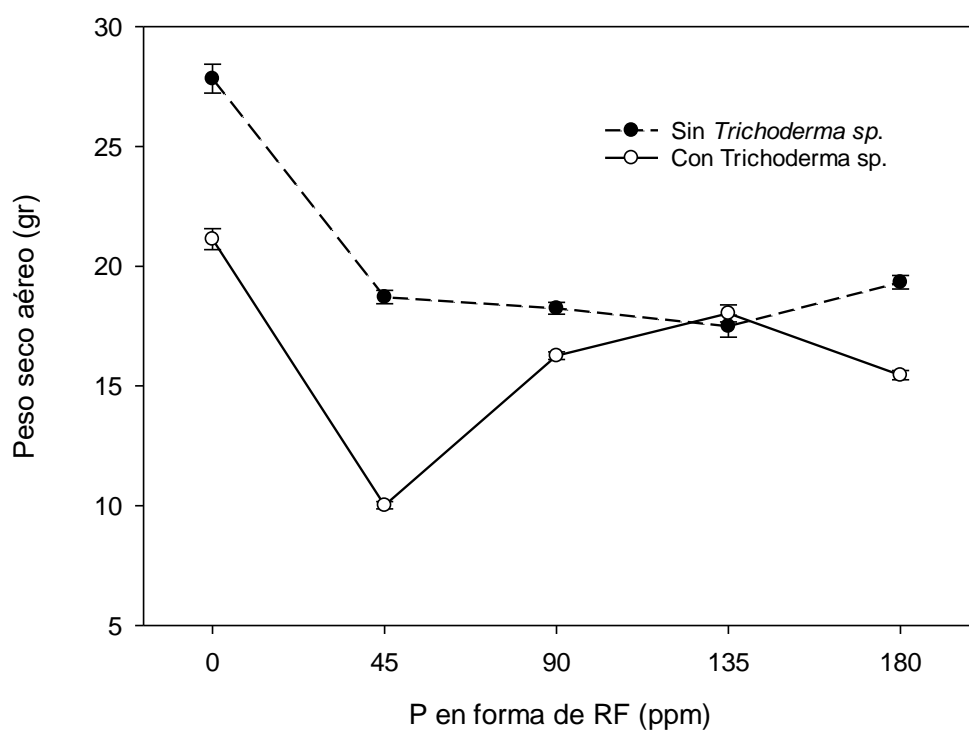
**Figura 4.-** Interacción entre la aplicación de roca fosfórica y la presencia o ausencia de *Trichoderma sp.* En el número de hojas de plantas de gerbera Var. Forzar en cultivo sin suelo.

#### **Peso seco aéreo (PSA)**

La interacción entre la inoculación con *Trichoderma sp.* y la aplicación de fósforo en forma de roca fosfórica influyó de forma variable sobre el peso seco aéreo de Gerbera (Figura 5). En ausencia del hongo, el mayor valor se registró a 0 ppm de RF (fertilización soluble de fósforo), disminuyendo drásticamente a 45 ppm, y posteriormente una tendencia estable con ligeros incrementos hacia las dosis más altas. Así como lo señalan Melo et al., (2018) que el aumento de los niveles de P en el suelo mejora el crecimiento de las plantas de mijo forrajero donde dosis mas altas de P disponible mejoraron la altura de la planta, el diámetro del tallo y la materia seca de las partes aéreas. Además de esto Yadav et al., (2017) indican que, la deficiencia de P puede limitar el rendimiento de los cultivos debido a una baja disponibilidad en el suelo.

En contraste, las plantas inoculadas con *Trichoderma sp.* presentaron un menor peso seco aéreo a 0 ppm, y una reducción más marcada a 45 ppm, seguida de un incremento constante

hasta alcanzar un máximo relativo a 135 ppm, momento en el cual el tratamiento con hongo superó ligeramente al control. Estos resultados sugieren que *Trichoderma sp.* podría favorecer la acumulación de biomasa aérea en condiciones de disponibilidad media a alta de fósforo proveniente de roca fosfórica. Aunque diversos autores han demostrado que la combinación de *Trichoderma sp.* y uso de RF mejora parámetros de crecimiento vegetal como altura, desarrollo vegetal e incluso peso seco de algunas especies de plantas ( Bononi et al., 2020; Bedine et al., 2022).



**Figura 5.-** Interacción entre la aplicación de roca fosfórica y la presencia o ausencia de *Trichoderma sp.* En el peso seco aéreo de plantas de gerbera Var. Forzar en cultivo sin suelo.

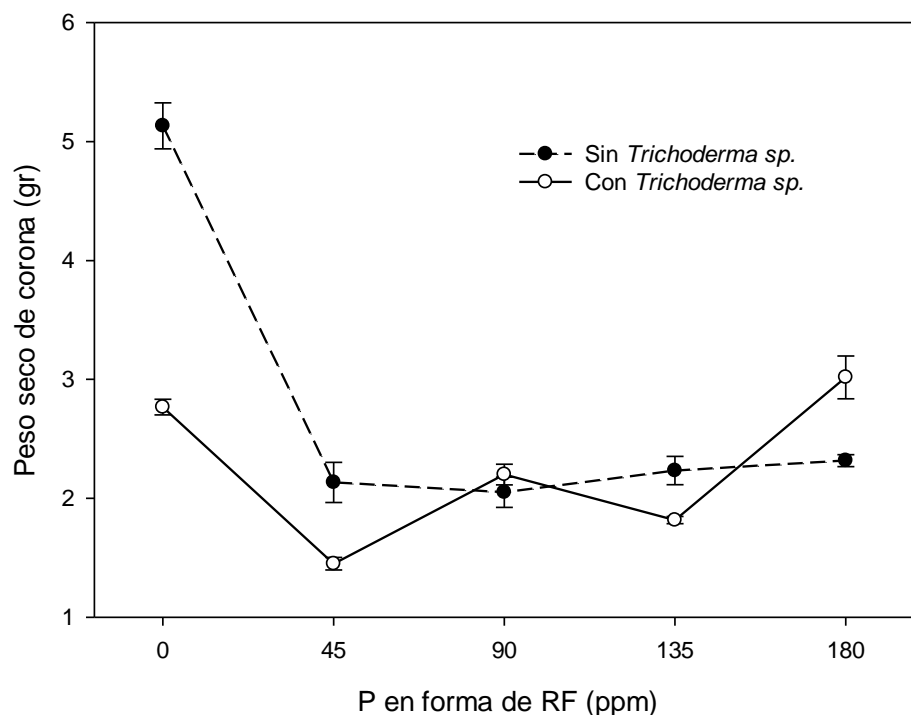
#### **Peso seco de corona (PSC)**

La interacción entre la inoculación con *Trichoderma sp.* y la aplicación de fósforo en forma de roca fosfórica afectó significativamente el peso seco de corona en Gerbera (Figura 6) En ausencia del hongo, el mayor valor se obtuvo a 0 ppm de RF (fertilización con fósforo soluble), con una disminución a 45 ppm y una recuperación parcial a concentraciones más

altas. A partir de ahí, el peso seco se mantuvo relativamente estable, con una ligera recuperación hacia los 180 ppm. Pudiendo deberse a que la roca fosfórica es menos soluble y por lo tanto menos disponible de forma inmediata para las plantas. Así mismo Deng et al., (2024) mencionan que, los fertilizantes de fosforo soluble como el superfosfato triple, pueden ser mas eficientes para aumentar el rendimiento de materia seca y absorción del fosforo por las plantas debido a su rápida liberación y disponibilidad. Así mismo varias investigaciones reportan que el uso de roca fosfórica en comparación con una fuente de P soluble resulta en un rendimiento de materia seca y productividad de las plantas (Somavilla et al., 2021; Chien et al., 1996).

Por su parte, las plantas inoculadas con *Trichoderma sp.* mostraron valores menores en general, alcanzando el mínimo a 45 ppm y evidenciando un ascenso progresivo hasta un máximo a 180 ppm, donde superaron ligeramente a las plantas sin inoculación. Este comportamiento sugiere que la actividad de *Trichoderma sp.* Aunque está comprobado que la combinación de *Trichoderma* y fuentes de fosforo puede generar efectos sinérgicos, mejorando el peso seco de las plantas (Rinindra y Hermiyanto, 2024). También es importante que considerar que no todas las interacciones producen resultados positivos, ya que dependiendo las condiciones o el ambiente esto puede cambiar afectando negativamente el crecimiento vegetal (Öğüt et al., 2005).





**Figura 6.-** interacción entre la aplicación de roca fosfórica y la presencia o ausencia de *Trichoderma sp.* sobre el peso seco de corona en gerbera Var. Forza en cultivo sin suelo.

La inoculación con *Trichoderma sp.* generó diferencias significativas en variables florales de Gerbera. En ausencia del hongo se produjo un mayor número de flores (NF), que representó un incremento del 46.5 % con respecto al tratamiento con *Trichoderma sp.* En el número de botones florales (NB), la reducción por efecto del hongo fue del 27.9 %. Asimismo, se observó una disminución en el diámetro de flor (DF), en el diámetro del tallo floral (DTF) y en la longitud del tallo floral (LTF), en comparación con las plantas no inoculadas. Lo que puede indicar una respuesta no tan favorable en las plantas con la inoculación de este hongo, diferenciando de algunas investigaciones que indican que estos hongos mejoran la calidad general y el estado nutricional de las plantas tales como; Andrzejak et al., (2021) quienes argumenta que este hongo puede reducir el tiempo de floración y aumentar la calidad de flor en begonia. De forma similar a Janowka et al., (2020) obtuvieron resultados similares en freesia refracta donde este aceleró la floración aproximadamente 1 semana. Así mismo se ha relacionado con una mejor calidad de flores y una mejor intensidad de color (Zawadzińska et al., 2015). En cuanto al efecto de la roca fosfórica, se detectaron diferencias significativas en el NF, NB y LT. La mayor producción de flores ocurrió con 0 ppm de RF (fertilización de fósforo soluble), mientras que la menor se registró con 45 ppm de P en forma de RF, representando una disminución del 69.7 %. En el NB, también se evidenció una disminución, y en la LT, el valor más alto se obtuvo con 180 ppm de RF. Diversas investigaciones indican que el P es crucial para mejorar el crecimiento y la producción de las flores de diferentes especies.

variando los niveles óptimos según el tipo de planta, por ejemplo: Biswas et al., (2022) indica que para gladiolo niveles mas altos de P (450 kg/ha) resultaron en mayor producción de espigas florales y cormos para la variedad Wite Queen. Por lo contrario, en plantas de *Scaevola aemula* concentraciones óptimas de P (20-40 mg L<sup>-1</sup>) promovieron el mayor número de flores, mientras que un exceso de P (superior a 43,5 mg L<sup>-1</sup>) provocó una reducción de la floración y un retraso en el crecimiento (Burnett et al., 2008; Zhang et al., 2004).

Los efectos de la interacción entre *Trichoderma sp.* y los niveles de fósforo fueron significativos para el NF, NB, DF y LT, indicando que la acción del hongo está altamente condicionada por la disponibilidad de fósforo. Por ejemplo, el tratamiento con 0 ppm (fertilización soluble) sin hongo mostró el mayor NF, mientras que en presencia del hongo esta cifra se redujo a cerca del 50 %, sugiriendo que *Trichoderma sp.* no compensa la ausencia de fósforo disponible con la RF.

**Cuadro 4.-** Efecto de la inoculación de hongo y uso de diferentes concentraciones de roca fosfórica en variables de calidad de flor de las plantas de Gerbera Var. Forza.

| Hongo 1x10 <sup>6</sup> UFC | Número de flores | Número de botones | Diámetro de flor (cm) | Diámetro del tallo floral (mm) | Longitud del tallo floral (cm) |
|-----------------------------|------------------|-------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| sin                         | 3.566a           | 4.300a            | 9.720a                | 5.098a                         | 40.568a                        |
| con                         | 2.433b           | 3.100b            | 9.372b                | 4.852b                         | 38.003b                        |
| ANVA $P \leq$               | <.0001           | <.0001            | 0.018                 | 0.0312                         | <.0001                         |
| Roca fosfórica (ppm)        |                  |                   |                       |                                |                                |
| 0                           | 6.333a           | 4.083a            | 9.448a                | 4.900a                         | 38.589bc                       |
| 45                          | 1.916b           | 3.083c            | 9.360a                | 5.024a                         | 37.3108c                       |
| 90                          | 2.166b           | 3.166bc           | 9.534a                | 4.892a                         | 38.707bc                       |
| 135                         | 2.166b           | 4.250a            | 9.520a                | 4.877a                         | 39.758ba                       |
| 180                         | 2.416b           | 3.916ab           | 9.870a                | 5.181a                         | 42.061a                        |
| ANOVA $P \leq$              | <.0001           | 0.0002            | 0.2207                | 0.368                          | <.0001                         |
| INTERACCIÓN $P \leq$        | <.0001           | <.0001            | 0.0038                | 0.106                          | <.0001                         |
| CV%                         | 18.89            | 18.87             | 5.7                   | 8.58                           | 5.28                           |

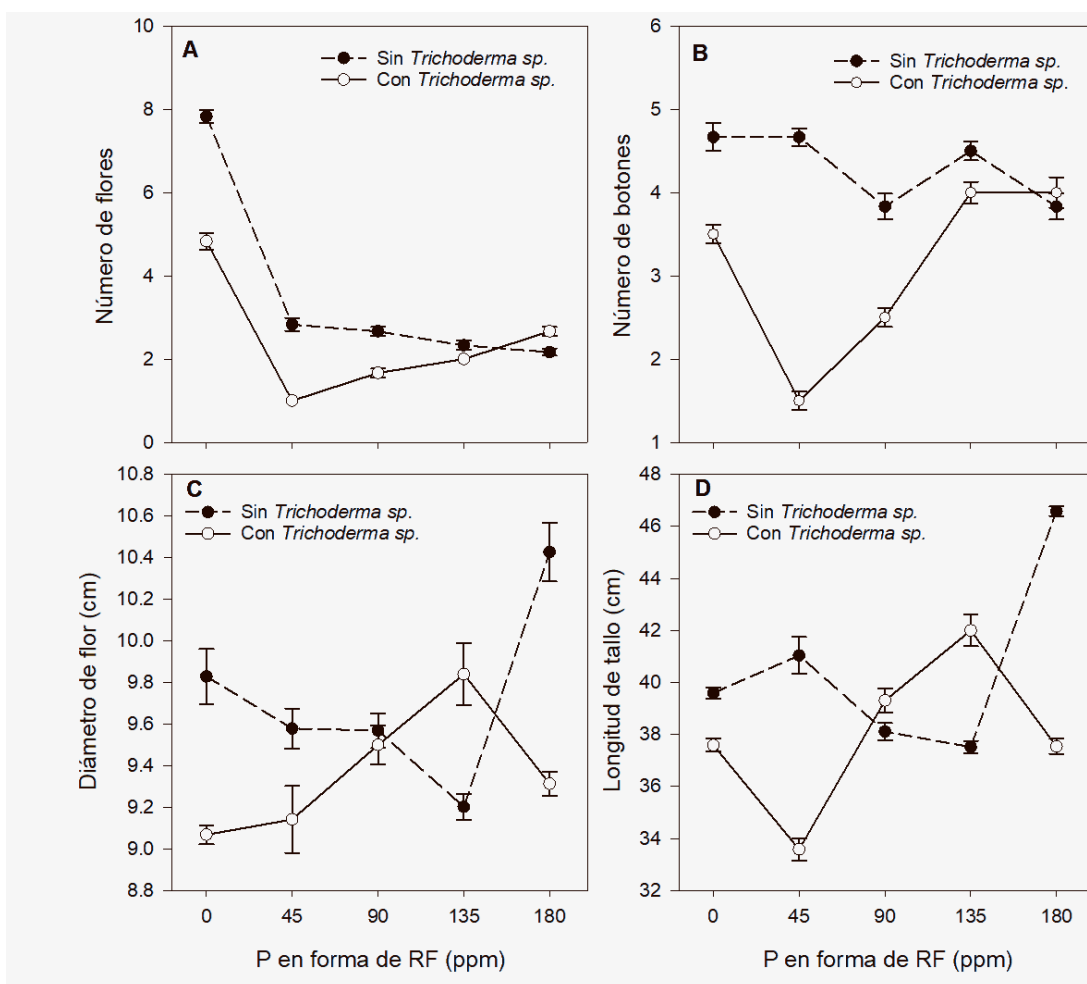
Medias con la misma letra en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de comparación múltiple de Tukey con  $p \leq 0.0$ . ANVA= análisis de varianza. C.V= coeficiente de variación.

El comportamiento de las variables NF (Figura 7, A), NB (Figura 7, B), DF (Figura 7, C) y LT (Figura 8, D) en función de la disponibilidad de fósforo soluble y en forma de RF. En la concentración 0 ppm, correspondiente exclusivamente al fósforo soluble, se obtuvo el mayor NF y NB, (figura 7 A, B) tanto en plantas con *Trichoderma sp.* Como sin él, esto indica que la disponibilidad inmediata de fósforo favoreció la floración y formación de botones,

independientemente de la presencia de microorganismos, aunque esto fue más marcado para plantas sin inoculación. Esta comprobado que el uso de una dosis ligeramente más alta de P en las plantas puede ayudar a obtener una floración mas temprana como lo es el caso del arroz, la Gaillardia y la caléndula, (Ye et al., 2019; Yadav et al.,2020). Así mismo, Andrzejak et al., (2024) mencionan que, el uso de este microorganismo mejora el desarrollo de los brotes florales y en número de flores pero las respuestas pueden variar dependiendo de la especie de *Trichoderma*.

Sin embargo, conforme se incrementó el fósforo en forma de RF (45–180 ppm), ambos parámetros disminuyeron drásticamente, con una reducción más acentuada en las plantas inoculadas con *Trichoderma* sp. Esto sugiere que el fósforo no disponible inmediatamente, como el de la RF, limita el desarrollo reproductivo en gerbera, bajo estas condiciones y que la actividad microbiana, en condiciones de fósforo no soluble, puede aumentar la competencia rizosférica, agravando la limitación inicial de fósforo disponible para la planta. En contraste, las variables de calidad de la flor, DF y LT, (figura 7, C, D) mostraron un patrón más diferenciado. El DF se mantuvo relativamente constante entre tratamientos, con ligeras variaciones que no indican una afectación severa por la disponibilidad de fósforo o la inoculación con *Trichoderma* sp. La relación entre el DF y los diferentes niveles de P puede ser significativa en varias especies de plantas, ya que el P es esencial para un crecimiento y una floración óptimos. Diversas investigaciones han examinado como la variación en los niveles de fosforo a veces en combinación con otros factores afecta el diámetro de las flores y las características de crecimiento relacionadas en varias especies. por ejemplo, en la zinnia, el mayor diámetro de flor se logro con 1mg/kg de P y un 20% de vermicompost ( Rahmani et al., 2019). En la gaillardia, 300 kg/ha de P (Yadav et al., 2020). La caléndula también mostro un mayor diámetro de flor con 80 kg/ha de P y caléndula africana, 200 kg/ha de P (Samoon et al.,2018). En narcisos tratados con hongos micorrízicos arbusculadores y 160 kg/ha de P también se obtuvo el mayor diámetro de flor. Sin embargo, aumentar el P por encima de los niveles óptimos no mejora el diámetro de la flor ni la calidad de la planta provocando una absorción innecesaria de P sin un beneficio adicional (Caspersen y Bergstrand, 2020).

La longitud del tallo floral, sin embargo, replicó en parte el patrón del número de flores: a 0 ppm (fósforo soluble), las plantas sin *Trichoderma* sp. alcanzaron buena longitud, mientras que, en presencia del hongo, el crecimiento fue más restringido (figura 7, D). A medida que aumentó la concentración de RF, la longitud del tallo disminuyó, particularmente a 45 ppm, pero volvió a incrementarse notablemente a 180 ppm, siendo superior en plantas sin inoculación. Esto podría indicar que a niveles adecuados de fósforo de lenta liberación (RF), la planta eventualmente accede a suficiente fósforo para recuperar el crecimiento estructural, aunque el efecto de *Trichoderma* sp. en este caso fue menos beneficioso o incluso neutral, así como las diferentes concentraciones de fosforo influye significativamente en la longitud del tallo floral en diversas especies de las plantas, los niveles óptimos varían según el tipo de planta. En *Scaevola aemula*, tanto las concentraciones bajas como las altas de P resultaron en tallos más cortos, observándose un crecimiento óptimo con concentraciones de 20 a 60  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  de P (Burnett et al., 2008). De igual manera, en *Cannabis sativa*, las concentraciones de P superiores a 11.25  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  no mejoraron el crecimiento, lo que indica un umbral más allá del cual el P adicional no beneficia la altura de la planta (Cockson et al., 2020). Si bien los niveles moderados de fósforo generalmente promueven un crecimiento óptimo del tallo y la producción floral, un exceso de fósforo puede provocar efectos negativos como retraso en el crecimiento y reducción de la floración



**Figura 7.-** Efecto de la interacción de diferentes concentraciones de roca fosfórica y la presencia o ausencia de *Trichoderma* sp. sobre en respuesta a las variables relacionadas con calidad de flor en plantas de gerbera, Número de flores (A), número de botones (B), diámetro de flor (C), longitud del tallo (D) .

## CONCLUSIÓN

La inoculación con *Trichoderma* sp. redujo el crecimiento radical, aéreo y floral de *Gerbera jamesonii*, especialmente en condiciones de baja disponibilidad de fósforo. La fertilización con fósforo soluble favoreció un mayor desarrollo en número de hojas, peso seco y producción floral. La interacción entre ambos factores mostró que la respuesta de la planta depende fuertemente del equilibrio entre fósforo disponible y la acción del hongo.

## REFERENCIAS

- Abdulraheem, M. I., Hu, J., Ahmed, S., Li, L., Naqvi, S. M. Z. A., Abdulraheem, M. I., Hu, J., Ahmed, S., Li, L., & Naqvi, S. M. Z. A. (2023). Advances in the Use of Organic and Organomineral Fertilizers in Sustainable Agricultural Production. En *Organic Fertilizers—New Advances and Applications*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1001465>
- Abel, S., Ticconi, C. A., & Delatorre, C. A. (2002). Phosphate sensing in higher plants. *Physiologia Plantarum*, 115(1), 1-8. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.2002.1150101.x>
- Abouzeid, A.-Z. M. (2008). Physical and thermal treatment of phosphate ores—An overview. *International Journal of Mineral Processing*, 85(4), 59-84. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2007.09.001>
- Ahedo-Quero, H. O., Aquino-Bolaños, T., Ortiz-Hernández, Y. D., & García-Sánchez, E. (2024). Trichoderma Diversity in Mexico: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Diversity*, 16(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/d16010068>
- Akande, M. O., Makinde, E. A., Aluko, O. A., Oluwatoyinbo, F. I., & Adediran, J. A. (2011). Rock phosphate amendment effects on Kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) growth and yield. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(2), 559-565.
- Alejo-Santiago, G., Aburto-González, C. A., Urbina-Sánchez, E., Sánchez-Hernández, E., & Bugarín-Montoya, R. (2023). Requerimiento nutrimental en papaya (*Carica papaya* L.) var. Mulata. *EDUCATECONCIENCIA*, 31(39), Article 39. <https://doi.org/10.58299/jd25fn95>
- Altomare, C., Norvell, W., Björkman, T., & Harman, G. (s. f.). *Solubilization of Phosphates and Micronutrients by the Plant-Growth-Promoting and Biocontrol Fungus Trichoderma harzianum* Rifai 1295-22. 65(7). <https://doi.org/10.1128/AEM.65.7.2926-2933.1999>
- Altomare, C., Norvell, W., Björkman, T., & Harman, G. (1999). Solubilization of Phosphates and Micronutrients by the Plant-Growth-Promoting and Biocontrol Fungus *Trichoderma harzianum* Rifai 1295-22. *Applied and Environmental Microbiology*, 65(7), 2926-2933. <https://doi.org/10.1128/AEM.65.7.2926-2933.1999>
- Amarasinghe, T., Madhusha, C., Munaweera, I., & Kottegoda, N. (2022). Review on Mechanisms of Phosphate Solubilization in Rock Phosphate Fertilizer. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 53(8), 944-960. <https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2034849>
- Amoo, A. E., Olanrewaju, O. S., Babalola, O. O., Ajilogba, C. F., Chukwuneme, C. F., Ojuederie, O. B., & Omomowo, O. I. (2023). The functionality of plant-microbe interactions in disease suppression. *Journal of King Saud University - Science*, 35(8), 102893. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2023.102893>

Andrzejak, R., Janowska, B., Reńska, B., & Kosiada, T. (2021). Effect of Trichoderma spp. And Fertilization on the Flowering of Begonia × tuberhybrida Voss. ‘Picotee Sunburst’. *Agronomy*, 11(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/agronomy11071278>

Andrzejak, R., Janowska, B., Rosińska, A., Skazińska, S., & Borsai, O. (2024). Flowering, Quality and Nutritional Status of Tropaeolum majus L. ‘Spitfire’ after Application of Trichoderma spp. *Sustainability*, 16(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/su16114672>

Arcand, M. M., & Schneider, K. D. (2006). Plant- and microbial-based mechanisms to improve the agronomic effectiveness of phosphate rock: A review. *Anais Da Academia Brasileira de Ciências*, 78, 791-807. <https://doi.org/10.1590/S0001-37652006000400013>

Argotte, L., Barreiro, O. F., Cerquera, N. E., & Castro, H. T. (2020). Evaluation of phosphate solubilization from phosphoric rock via Aspergillus niger and Penicillium sp. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 37(2), Article 2. <https://doi.org/10.22267/rcia.203702.133>

Arma, A., Alrayes, L., Pham, T. H., Nadeem, M., Manful, C., Bartlett, O., Fordjour, E., Cheema, M., Galagedara, L., Abbey, Lord, & Thomas, R. (2024). Rock dust-based potting media enhances agronomic performance and nutritional quality of horticultural crops. *Current Plant Biology*, 40, 100419. <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2024.100419>

Arrieta, A. M., Iannone, L. J., Scervino, J. M., Vignale, M. V., & Novas, M. V. (2015). Un endófito foliar aumenta la diversidad de hongos rizosféricos solubilizadores de fósforo y la colonización micorrízica en la gramínea silvestre *Bromus auleticus*. *Fungal Ecology*, 17, 146-154. <https://doi.org/10.1016/j.funeco.2015.07.001>

Bamiki, R., Raji, O., Ouabid, M., Elghali, A., Khadiri Yazami, O., & Bodinier, J.-L. (2021). Phosphate Rocks: A Review of Sedimentary and Igneous Occurrences in Morocco. *Minerals*, 11(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/min11101137>

Banjare, C., Mahanta, D., Sahu, P., & Choudhary, R. (2024). A Comprehensive Review on Protected Cultivation: Importance, Scope and Status. *International Journal of Environment and Climate Change*, 14(7), 46-55. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2024/v14i74250>

Basave-Villalobos, E., Cetina-Alcalá, V. M., López-López, M. A., Trejo, C., Ramírez-Herrera, C., & Conde-Martínez, V. (2020). Fertilización de Pithecellobium dulce (Roxb.) Benth en vivero: Efectos en la calidad de planta. *Madera y Bosques*, 26(3). <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2632059>

Battaglia, M. E., Martinez, S. I., Covacevich, F., & Consolo, V. F. (2024a). Trichoderma harzianum enhances root biomass production and promotes lateral root growth of soybean and common bean under drought stress. *Annals of Applied Biology*, 185(1), 36-48. <https://doi.org/10.1111/aab.12909>

Battaglia, M. E., Martinez, S. I., Covacevich, F., & Consolo, V. F. (2024b). Trichoderma harzianum enhances root biomass production and promotes lateral root growth of soybean



and common bean under drought stress. *Annals of Applied Biology*, 185(1), 36-48.  
<https://doi.org/10.1111/aab.12909>

Beruto, M., Dhooghe, E., & Dunn, B. (2024). Advancement in Propagation, Breeding, Cultivation, and Marketing of Ornamentals. *Horticulturae*, 10(7), Article 7.  
<https://doi.org/10.3390/horticulturae10070747>

Biswas, R. C., Mannan, Md. A., & Kabir, Md. Y. (2022). PHOSPHORUS INCREASES GROWTH AND FLOWER PRODUCTION OF GLADIOLUS (GLADIOLUS GRANDIFLORA L.). *Food and Agri Economics Review*, 2(1), 41-47.  
<https://doi.org/10.26480/faer.01.2022.41.47>

Burnett, S. E., Zhang, D., Stack, L. B., & He, Z. (2008a). *Effects of Phosphorus on Morphology and Foliar Nutrient Concentrations of Hydroponically Grown Scaevola aemula R. Br. 'Whirlwind Blue'*. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.3.902>

Burnett, S. E., Zhang, D., Stack, L. B., & He, Z. (2008b). *Effects of Phosphorus on Morphology and Foliar Nutrient Concentrations of Hydroponically Grown Scaevola aemula R. Br. 'Whirlwind Blue'*. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.3.902>

Cai, F., & Druzhinina, I. S. (2021). In honor of John Bissett: Authoritative guidelines on molecular identification of Trichoderma. *Fungal Diversity*, 107(1), 1-69.  
<https://doi.org/10.1007/s13225-020-00464-4>

Cai, Q., Ji, C., Yan, Z., Jiang, X., & Fang, J. (2017). Anatomical responses of leaf and stem of Arabidopsis thaliana to nitrogen and phosphorus addition. *Journal of Plant Research*, 130(6), 1035-1045. <https://doi.org/10.1007/s10265-017-0960-2>

Cai, Q., Ji, Chengjun, Fang, J., Jiang, Xingxing, & Yan, Z. (2017). *Anatomical responses of leaf and stem of Arabidopsis thaliana to nitrogen and phosphorus addition* | *Journal of Plant Research*. 130, 1035-1045. <https://doi.org/10.1007/s10265-017-0960-2>

Calderón-Vázquez, C., Sawers, R. J. H., & Herrera-Estrella, L. (2011). Phosphate Deprivation in Maize: Genetics and Genomics. *Plant Physiology*, 156(3), 1067-1077.  
<https://doi.org/10.1104/pp.111.174987>

Carrodegua-Gonzalez, A., & Orozco, A. Z. (2020). Bases para la mejora genética en Gerbera hybrida. *Repertorio Científico*, 23(2), Article 2.  
<https://doi.org/10.22458/rc.v23i2.3000>

Caspersen, S., & Bergstrand, K.-J. (2020). Phosphorus restriction influences P efficiency and ornamental quality of poinsettia and chrysanthemum. *Scientia Horticulturae*, 267, 109316.  
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109316>

Chen, F., Ma, J., Yuan, Q., & Yu, Z. (2023). Phosphate solubilizing microorganisms as a driving force to assist mine phytoremediation. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1201067>

Chen, G. C., He, Z. L., Stoffella, P. J., Yang, X. E., Yu, S., & Calvert, D. (2006). Use of dolomite phosphate rock (DPR) fertilizers to reduce phosphorus leaching from sandy soil. *Environmental Pollution*, 139(1), 176-182. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.12.016>

Chen, J. (2021). Ornamental Plant Research Inaugural Editorial. *Ornamental Plant Research*, 1(1), 1-2. <https://doi.org/10.48130/OPR-2021-0001>

Cho, H., Choi, I., Bouain, N., Nawaz, A., Zheng, L., Shahzad, Z., Brandizzi, F., Rhee, S. Y., & Rouached, H. (2025). *Phosphorus Availability Modulates Flowering Time Through Subcellular Reprogramming of bGLU25 and GRP7 in Flowering Plants* (p. 2025.01.02.631137). bioRxiv. <https://doi.org/10.1101/2025.01.02.631137>

Chowdhuri, T. K., & Deka, K. (2019). Biodiversity and Conservation of Ornamental Crops. En P. E. Rajasekharan & V. R. Rao (Eds.), *Conservation and Utilization of Horticultural Genetic Resources* (pp. 139-216). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-3669-0\\_6](https://doi.org/10.1007/978-981-13-3669-0_6)

Chrysargyris, A., Panayiotou, C., & Tzortzakis, N. (2016). Los niveles de nitrógeno y fósforo afectaron el crecimiento de las plantas, la composición del aceite esencial y el estado antioxidante de la planta de lavanda ( *Lavandula angustifolia* Mill.). *Industrial Crops and Products*, 83, 577-586. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.12.067>

Cockson, P., Schroeder-Moreno, M., Veazie, P., Barajas, G., Logan, D., Davis, M., & Whipker, B. E. (2020). Impact of Phosphorus on Cannabis sativa Reproduction, Cannabinoids, and Terpenes. *Applied Sciences*, 10(21), Article 21. <https://doi.org/10.3390/app10217875>

Cordell, D., Dominish, E., Esham, M., Jacobs, B., & Nanda, M. (2021). Adapting food systems to the twin challenges of phosphorus and climate vulnerability: The case of Sri Lanka. *Food Security*, 13(2), 477-492. <https://doi.org/10.1007/s12571-020-01118-8>

Cruz, L. R. D. da, Ludwig, F., Steffen, G. P. K., & Maldaner, J. (2018). Development and quality of gladiolus stems with the use of vermicompost and *Trichoderma* sp. In substrate <sup>(1)</sup>. *Ornamental Horticulture*, 24, 70-77. <https://doi.org/10.14295/oh.v24i1.1131>

Datta, S., Hamim, I., Jaiswal, D. K., & Sungthong, R. (2023). Sustainable agriculture. *BMC Plant Biology*, 23(1), 588. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04626-9>

Della Monica, I. F., Saparrat, M. C. N., Godeas, A. M., & Scervino, J. M. (2015). The co-existence between DSE and AMF symbionts affects plant P pools through P mineralization and solubilization processes. *Fungal Ecology*, 17, 10-17. <https://doi.org/10.1016/j.funeco.2015.04.004>

Della Mónica, I. F., Stefanoni Rubio, P. J., Cina, R. P., Recchi, M., Godeas, A. M., & Scervino, J. M. (2014). Effects of the phosphate-solubilizing fungus *Talaromyces flavus* on the development and efficiency of the *Gigaspora rosea*-*Triticum aestivum* symbiosis. *Symbiosis*, 64(1), 25-32. <https://doi.org/10.1007/s13199-014-0299-6>

Dias, R. de C., Stafanato, J. B., Zonta, E., Polidoro, J. C., Gonçalves, R. G. da M., & Teixeira, P. C. (2022). Effect of Phosphate Organomineral Fertilization on the Dry Matter Production and Phosphorus Accumulation of Corn. *Journal of Agricultural Science*, 14(8), Article 8. <https://doi.org/10.5539/jas.v14n8p78>

Dikr, W. (2022). Effects of Phosphorus Fertilizer on Agronomic, Grain Yield and Other Physiological Traits of Some Selected Legume Crops. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*, 12(12), 1.

Dinakar, K. A. (2023). Agriculture Based on Soil Minerals. En S. Chigullapalli, S. U. Susha Lekshmi, & A. P. Deshpande (Eds.), *Rural Technology Development and Delivery* (pp. 65-69). Springer Nature. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-2312-8\\_6](https://doi.org/10.1007/978-981-19-2312-8_6)

Duan, X., Liu, W., Wang, X., Zhang, L., Liu, S., Guo, L., Guo, D., & Hou, X. (2022). *Effects of Phosphorus Fertilization on Growth Characteristics, Fatty Acid Composition, and Seed Yields of Fengdan (Paeonia ostii T. Hong & J. X. Zhang)*. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI16555-22>

Fatima, R., Basharat, U., Safdar, A., Haidri, I., Fatima, A., Mahmood, A., Ullah, Q., Ummer, K., & Qasim, M. (2024). AVAILABILITY OF PHOSPHOROUS TO THE SOIL, THEIR SIGNIFICANCE FOR ROOTS OF PLANTS AND ENVIRONMENT. *EPH - International Journal of Agriculture and Environmental Research*, 21-34. <https://doi.org/10.53555/eijaer.v10i1.97>

Fayezizadeh, M. R., Ansari, N. A. Z., Albaji, M., & Khaleghi, E. (2021). Effects of hydroponic systems on yield, water productivity and stomatal gas exchange of greenhouse tomato cultivars. *Agricultural Water Management*, 258, 107171. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107171>

Fixen, P. E., & Johnston, A. M. (2012). World fertilizer nutrient reserves: A view to the future. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 92(5), 1001-1005. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4532>

Fixen, P. E., & Johnston, A. M. (2011). *World fertilizer nutrient reserves: A view to the future*. 92(5), 1001-1005. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4532>

Fouad Abobatta, W., & Abd Alla, M. A. (2023). *Role of Phosphates Fertilizers in Sustain Horticulture Production: Growth and Productivity of Vegetable Crops*. <https://doi.org/DOI:10.3923/ajar.2023.1.7>

Gabriel, A. G., Libia I, T. T., & Fernando C., G. M. (2016). *NUTRICIÓN DE CULTIVOS* (segunda edición). Colegio de Posgraduados.

Gallardo, A., Fernández-Palacios, J. M., Bermúdez, A., de Nascimento, L., Durán, J., García-Velázquez, L., Méndez, J., & Rodríguez, A. (2020). The pedogenic Walker and Syers model under high atmospheric P deposition rates. *Biogeochemistry*, 148(3), 237-253. <https://doi.org/10.1007/s10533-020-00657-8>

Gaur, K., Ravi, S., Singh, K., Pant, A., & Suman, M. (2024). Trichoderma: Defence army against soil borne fungi. *Journal of Mycopathological Research*, 62(1), 41-49. <https://doi.org/10.57023/JMycR.62.1.2024.041>

Gerber, A. (2015). Past progress and future potential for research of Australian natives and *Proteaceae*. *Acta Horticulturae*, 1104, 1-8. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2015.1104.1>

Ghani, M., Kumar, S., & Thakur, M. (2012, noviembre). *In Vitro Propagation and Assessment of Plant Genetic Fidelity by RAPD and SSR Markers in Gerbera (Gerbera jamesonii)*. 7(4), 53-57.

Githua, F. W., Ntinyari, W., Korir, N. K., & Gweyi-Onyango, J. P. (2019). Influence of Elemental Sulphur, Oxalic Acid, and Phosphoric Acid as Acidulating Agents on Phosphorous Dissolution from Rock Phosphate. *Journal of Agriculture and Ecology Research International*, 1-8. <https://doi.org/10.9734/jaeri/2019/v18i430067>

Grzebisz, W., Niewiadomska, A., Potarzycki, J., & Andrzejewska, A. (2024). Phosphorus HotSpots in Crop Plants Production on the Farm—Mitigating Critical Factors. *Agronomy*, 14(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/agronomy14010200>

Gupta, P. K. (2022). Chapter 10—Sustainable agriculture. En P. K. Gupta (Ed.), *Fundamentals of Nanotoxicology* (pp. 187-201). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90399-8.00005-2>

Hernandez-Mora, A., Duboc, O., Lombi, E., Bünemann, E. K., Ylivainio, K., Symanczik, S., Delgado, A., Abu Zahra, N., Nikama, J., Zuin, L., Doolette, C. L., Eigner, H., & Santner, J. (2024). Fertilization efficiency of thirty marketed and experimental recycled phosphorus fertilizers. *Journal of Cleaner Production*, 467, 142957. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142957>

Hernández-Terrón, J. J., Gutiérrez Rodríguez, F., Serrato Cuevas, R., González Huerta, A., & Rodríguez, E. G. (2021). Manejo nutricional integrado: Herramienta clave para la agricultura sostenible. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(5), 885-897. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i5.2290>

Herrera-Estrella, L., & López-Arredondo, D. (2016). Phosphorus: The Underrated Element for Feeding the World. *Trends in Plant Science*, 21(6), 461-463. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.04.010>

Hidayat, C., Frasetya, B., & Syamsudin, I. N. (2018). Adjustment of phosphorus concentration to increase growth and yield of cherry tomato using hydroponic drip system. *Jurnal AGRO*, 5(2), Article 2. <https://doi.org/10.15575/3658>

Hinsinger, P. (2001). Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: A review. *Plant and Soil*, 237(2), 173-195. <https://doi.org/10.1023/A:1013351617532>

Hirzel C., J., Ruz J., E., & Schiappacasse, F. (2003). Determinación de la producción de materia seca y extracción de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio en *Liatris callilepis*. *Agricultura Técnica*, 63(2), 193-201. <https://doi.org/10.4067/S0365-28072003000200008>

Huang, W., Zhao, X., Liang, N., He, L., Yu, L., & Zhan, Y. (2019). Phosphorus deficiency promotes the lateral root growth of *Fraxinus mandshurica* seedlings. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 182(4), 552-559. <https://doi.org/10.1002/jpln.201800465>

Husnain, Rochayati, S., Sutriadi, T., Nassir, A., & Sarwani, M. (2014). Improvement of Soil Fertility and Crop Production through Direct Application of Phosphate Rock on Maize in Indonesia. *Procedia Engineering*, 83, 336-343. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.025>  
 Huzenko, M., & Kononenko, S. (2024). Sustainable Agriculture: Impact on Public Health and Sustainable Development. *Health Economics and Management Review*, 5(2), 125-150. <https://doi.org/10.21272/hem.2024.2-08>

Jain, S., Kore, D. S., K, K. G., Mohapatra, A., Baksh, H., Kumar, V., Mohanty, S., & Haokip, S. W. (2023). A Comprehensive Review on Protected Cultivation of Horticultural Crops: Present Status and Future Prospects. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(11), 3521-3531. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i113528>

Justice, A., & Faust, J. E. (2015). Phosphorus-restriction as a potential technique to control *Impatiens* stem elongation. *Acta Horticulturae*, 1104, 9-14. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2015.1104.2>

Kannan, M., Elavarasan, G., Balamurugan, A., Dhanusiya, B., & Freedon, D. (2022). Hydroponic farming – A state of art for the future agriculture. *Materials Today: Proceedings*, 68, 2163-2166. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.416>

Karikari, B., & Arkorful, E. (s. f.). *Effect of Phosphorus Fertilizer on Dry Matter Production and Distribution in Three Cowpea (Vigna unguiculata L. Walp.) Varieties in Ghana*. 10, 167-178. <https://doi.org/10.3923/jps.2015.167.178>

Karikari, B., & Arkorful, E. (2015). Effect of Phosphorus Fertilizer on Dry Matter Production and Distribution in Three Cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) Varieties in Ghana. *Journal of Plant Sciences*, 10(5), 167-178. <https://doi.org/10.3923/jps.2015.167.178>

Kayoumu, M., Iqbal, A., Muhammad, N., Li, X., Li, L., Wang, X., Gui, H., Qi, Q., Ruan, S., Guo, R., Zhang, X., Song, M., & Dong, Q. (2023). Phosphorus Availability Affects the Photosynthesis and Antioxidant System of Contrasting Low-P-Tolerant Cotton Genotypes. *Antioxidants*, 12(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/antiox12020466>

Kellermeier, F., Armengaud, P., Seditas, T. J., Danku, J., Salt, D. E., & Amtmann, A. (2014). Analysis of the Root System Architecture of Arabidopsis Provides a Quantitative Readout of Crosstalk between Nutritional Signals. *The Plant Cell*, 26(4), 1480-1496. <https://doi.org/10.1105/tpc.113.122101>



Kenenbaev, S., Ramazanova, S., & Gusev, V. (2023). STATE AND PROSPECTS OF MINERAL FERTILIZERS USE IN AGRICULTURE OF KAZAKHSTAN. *SABRAO Journal of Breeding and Genetics*, 55(3), 886-895. <https://doi.org/10.54910/sabrao2023.55.3.23>

Kent, J. A. (2003). Phosphorus and Phosphates. En J. A. Kent (Ed.), *Riegel's Handbook of Industrial Chemistry* (pp. 362-385). Springer US. [https://doi.org/10.1007/0-387-23816-6\\_10](https://doi.org/10.1007/0-387-23816-6_10)

Khandan-Mirkohi, A., & Schenk, M. K. (2009). Phosphorus efficiency of ornamental plants in peat substrates. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172(3), 369-377. <https://doi.org/10.1002/jpln.200700360>

Kirchgesser, J., Hazarika, M., Bachmann-Pfabe, S., Dehmer, K. J., Kavka, M., & Uptmoor, R. (2023). Phenotypic variation of root-system architecture under high P and low P conditions in potato (*Solanum tuberosum* L.). *BMC Plant Biology*, 23(1), 68. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04070-9>

Kumar, A., Choudhary, C. S., Paswan, D., Kumar, B., & Arun, A. (2014). Sustainable way for enhancing phosphorus efficiency in agricultural soils through phosphate solubilizing microbes. *AN ASIAN JOURNAL OF SOIL SCIENCE*, 9(2), 300-310. <https://doi.org/10.15740/HAS/AJSS/9.2/300-310>

Kumar, D. V. (2024). Sustainable Agriculture. *Journal of Progress in Engineering and Physical Science*, 3(2), Article 2.

Li, H.-P., Han, Q.-Q., Liu, Q.-M., Gan, Y.-N., Rensing, C., Rivera, W. L., Zhao, Q., & Zhang, J.-L. (2023). Roles of phosphate-solubilizing bacteria in mediating soil legacy phosphorus availability. *Microbiological Research*, 272, 127375. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127375>

Li, R.-X., Cai, F., Pang, G., Shen, Q.-R., Li, R., & Chen, W. (2015). Solubilisation of Phosphate and Micronutrients by *Trichoderma harzianum* and Its Relationship with the Promotion of Tomato Plant Growth. *PLOS ONE*, 10(6), e0130081. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130081>

Liu, X., Tian, J., Liu, G., & Sun, L. (2023). Multi-Omics Analysis Reveals Mechanisms of Strong Phosphorus Adaptation in Tea Plant Roots. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(15), Article 15. <https://doi.org/10.3390/ijms241512431>

Lopez, G., Ahmadi, S. H., Amelung, W., Athmann, M., Ewert, F., Gaiser, T., Gocke, M. I., Kautz, T., Postma, J., Rachmilevitch, S., Schaaf, G., Schnepf, A., Stoschus, A., Watt, M., Yu, P., & Seidel, S. J. (2023). Nutrient deficiency effects on root architecture and root-to-shoot ratio in arable crops. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1067498>

Lu, H., Ren, M., Lin, R., Jin, K., & Mao, C. (2024). Developmental responses of roots to limited phosphate availability: Research progress and application in cereals. *Plant Physiology*, 196(4), 2162-2174. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiac495>

Ma, Q., Wang, X., Yuan, W., Tang, H., & Luan, M. (2021). The Optimal Concentration of  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  Enhances Nutrient Uptake and Flower Production in Rose Plants via Enhanced Root Growth. *Agriculture*, 11(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/agriculture11121210>

Mahanta, D., Rai, R. K., Dhar, S., Varghese, E., Raja, A., & Purakayastha, T. J. (2018). Modification of root properties with phosphate solubilizing bacteria and arbuscular mycorrhiza to reduce rock phosphate application in soybean-wheat cropping system. *Ecological Engineering*, 111, 31-43. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.11.008>

Mahanta, M., & Gantait, S. (2024). Trends in plant tissue culture and genetic improvement of gerbera. *Horticultural Plant Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2024.03.003>

Mar, S. S., & Okazaki, M. (2012). Investigation of Cd contents in several phosphate rocks used for the production of fertilizer. *Microchemical Journal*, 104, 17-21. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2012.03.020>

Mardamootoo, T., Preez, C. C. du, & Barnard, J. H. (2021). Phosphorus management issues for crop production: A review. *African Journal of Agricultural Research*, 17(7), 939-952. <https://doi.org/10.5897/AJAR2020.15205>

Mendes, G. de O., Galvez, A., Vassileva, M., & Vassilev, N. (2017). Fermentation liquid containing microbially solubilized P significantly improved plant growth and P uptake in both soil and soilless experiments. *Applied Soil Ecology*, 117-118, 208-211. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.05.008>

Millán, P. E. F. (2021). *Modeling a Business Intelligence Web Module based on Association Rules to commercialize ornamental plants*. 15(3).

Miyoshi, K., & Asakura, N. (1996). Callus induction, regeneration of haploid plants and chromosome doubling in ovule cultures of pot gerbera (*Gerbera jamesonii*). *Plant Cell Reports*, 16(1), 1-5. <https://doi.org/10.1007/BF01275438>

Morillo, A., Sequera, O., & Ramírez, R. (2007). Roca fosfórica acidulada como fuente de fósforo en un suelo ácido con o sin encalado. *Bioagro*, 19(3), 161-168.

Mutetwa, M., Chagonda, I., Gwaziwa, T., Mangezi, P., Midzi, T., Sithole, L., Mtaita, T., Masaka, J., & Muziri, T. (2022). Effect of Trichoderma-Based Biofertilizers on the Flower and Fruit Pattern of Horned Melon (*Cucumis metuliferus* E. Mey. Ex Naudin). *International Journal of Agronomy*, 2022(1), 6866853. <https://doi.org/10.1155/2022/6866853>

Negi, M., Sanagala, R., Rai, V., & Jain, A. (2016). Deciphering Phosphate Deficiency-Mediated Temporal Effects on Different Root Traits in Rice Grown in a Modified Hydroponic System. *Frontiers in Plant Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00550>

Nieto-Jacobo, M. F., Steyaert, J. M., Salazar-Badillo, F. B., Nguyen, D. V., Rostás, M., Braithwaite, M., De Souza, J. T., Jimenez-Bremont, J. F., Ohkura, M., Stewart, A., &

Mendoza-Mendoza, A. (2017). Environmental Growth Conditions of *Trichoderma* spp. Affects Indole Acetic Acid Derivatives, Volatile Organic Compounds, and Plant Growth Promotion. *Frontiers in Plant Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00102>

Novais, S. V., Mattiello, E. M., Vergutz, L., Junior, E. F. F., & Novais, R. F. (2017). Solubilization of Bayóvar Natural Phosphate Rock under the Drain Effect of Calcium and Phosphorus at Two Levels of Acidity. *Open Journal of Soil Science*, 7(8), Article 8. <https://doi.org/10.4236/ojss.2017.78013>

Nurgalieva, G., Dzhussipbekov, U., Bayakhmetova, Z., Duisenbai, D., & Aksakalova, U. (2024). ПОЛУЧЕНИЕ ГУМАТ-, АЗОТ И МОЛИБДЕНСОДЕРЖАЩИХ ЖИДКИХ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ. *Chemical Journal of Kazakhstan*, 2, Article 2. <https://doi.org/10.51580/2024-2.2710-1185.20>

Öğüt, M., Akdağ, C., Düzdemir, O., & Sakin, M. A. (2005). Single and double inoculation with *Azospirillum*/*Trichoderma*: The effects on dry bean and wheat. *Biology and Fertility of Soils*, 41(4), 262-272. <https://doi.org/10.1007/s00374-004-0818-3>

Oliveira, R. C. de, Almeida, R. F., Oliveira, P. L. S., Silva, J. R., & Luz, J. M. Q. (2024). Organomineral as a substitute for mineral fertilization in potato cultivation. *Comunicata Scientiae*, 15, e4121-e4121. <https://doi.org/10.14295/cs.v15.4121>

Osorio-Concepción, M., Casas-Flores, S., & Cortés-Penagos, C. (2013). Efecto de la limitación de fosfato sobre la conidiación de *Trichoderma atroviride* y mutantes ciegas a la luz. *Scientia Fungorum*, 37, Article 37. <https://doi.org/10.33885/sf.2013.3.1111>

Pérez, N. M. E. (2019). Aprovechamiento de roca fosfórica, por vía térmica, para la obtención de termofosfatos. *Revista de Investigación*, 12(2), Article 2. <https://doi.org/10.29097/2011-639X.266>

Poudyal, S., Owen, J. S., Sharkey, T. D., Fernandez, R. T., & Cregg, B. (2021). Phosphorus requirement for biomass accumulation is higher compared to photosynthetic biochemistry for three ornamental shrubs. *Scientia Horticulturae*, 275, 109719. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109719>

Prates, F. B. de S., Lucas, C. dos S. G., Sampaio, R. A., Brandão Júnior, D. da S., Fernandes, L. A., & Junio, G. R. Z. (2012). Crescimento de mudas de pinhão-mansão em resposta a adubação com superfosfato simples e pó-de-rocha. *Revista Ciência Agronômica*, 43, 207-213. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902012000200001>

Pufahl, P. K., & Groat, L. A. (2017). Sedimentary and Igneous Phosphate Deposits: Formation and Exploration: An Invited Paper. *Economic Geology*, 112(3), 483-516. <https://doi.org/10.2113/econgeo.112.3.483>

Rashid, M. H. U., Guo, H., Zheng, S., Li, L., Ma, X., Farooq, T. H., Nawaz, M. F., Gautam, N. P., & Wu, P. (2023). Effects of low phosphorus availability on root cambial activity, biomass production and root morphological pattern in two clones of Chinese fir. *Forestry*:



*An International Journal of Forest Research*, 96(1), 76-86.  
<https://doi.org/10.1093/forestry/cpac030>

Reineke, T., & Steffens, D. (s. f.). Phosphorus requirement of barley and wheat for seed and food quality. *Plant, Soil and Environment*, 68(10), 459-465.  
<https://doi.org/10.17221/138/2022-PSE>

Reis, D. R., Teixeira, G. C. S., Teixeira, I. R., Silva, G. R., & Ribeiro, B. B. A. (2023). Organomineral Fertilization Associated with Inoculation of *Rhizobium tropici* and Co-Inoculation of *Azospirillum brasilense* in Common Bean. *Sustainability*, 15(24), Article 24.  
<https://doi.org/10.3390/su152416631>

Richardson, A. E., Lynch, J. P., Ryan, P. R., Delhaize, E., Smith, F. A., Smith, S. E., Harvey, P. R., Ryan, M. H., Veneklaas, E. J., Lambers, H., Oberson, A., Culvenor, R. A., & Simpson, R. J. (2011). Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture. *Plant and Soil*, 349(1), 121-156. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0950-4>  
 Rinindra, R. J., & Hermiyanto, B. (2024). Pengaruh Pupuk Hayati Jamur Mikoriza Dan Pupuk Rock Phosphate Terhadap Serapan P, Pertumbuhan serta Hasil Tanaman Cabai Rawit (*Capsicum frutescens* L.). *Berkala Ilmiah Pertanian*, 7(1), Article 1.  
<https://doi.org/10.19184/bip.v7i1.42530>

Robin, P. (1998). Horticulture sans sol: Histoire et actualité. *Cahiers d'Economie et sociologie rurales*, 46(1), 97-130. <https://doi.org/10.3406/reae.1998.1573>

Rodrigues, M. M. (2023). *Organomineral fertilizer from sewage sludge: Nutrient recycling and environmental safety for tropical agriculture* [Text, Universidade de São Paulo].  
<https://doi.org/10.11606/T.11.2023.tde-04082023-113749>

Rogers, E. D., & Benfey, P. N. (2015). Regulation of plant root system architecture: Implications for crop advancement. *Current Opinion in Biotechnology*, 32, 93-98.  
<https://doi.org/10.1016/j.copbio.2014.11.015>

Rout, S., Abhilash, Meshram, P., & Zhang, P. (2024). A Comprehensive Review on Occurrence and Processing of Phosphate Rock Based Resources- Focus on REEs. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 45(4), 368-388.  
<https://doi.org/10.1080/08827508.2022.2161537>

Ruli, S. S., Patil, G. I., Veeresh, K., & B, G. S. (2024). Economics of Capsicum and Tomato Crops Production under Protected Cultivation in the Regions of Kalyana-Karnataka, India. *Journal of Scientific Research and Reports*, 30(6), 53-58.  
<https://doi.org/10.9734/jsrr/2024/v30i62020>

Ryszko, U., Rusek, P., & Kołodyńska, D. (2023). Quality of Phosphate Rocks from Various Deposits Used in Wet Phosphoric Acid and P-Fertilizer Production. *Materials*, 16(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/ma16020793>

Saleem, S., Mushtaq, N. U., Rasool, A., Shah, W. H., Tahir, I., & Rehman, R. U. (2023). Chapter two - Plant nutrition and soil fertility: Physiological and molecular avenues for crop

improvement. En T. Aftab & K. R. Hakeem (Eds.), *Sustainable Plant Nutrition* (pp. 23-49). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18675-2.00009-2>

Si, C., Liang, Q., Liu, H.-J., Wang, N., Kumar, S., Chen, Y., & Zhu, G. (2022). Response Mechanism of Endogenous Hormones of Potential Storage Root to Phosphorus and Its Relationship With Yield and Appearance Quality of Sweetpotato. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.872422>

Singh Jayara, A., Kumar, R., Pandey, P., Kumar Bhatt, M., Pandey, S., & Lal Meena, R. (2023). Alternatives to Soluble Phosphorus Fertilizers in Indian Context. En S. Ameen, M. Shaheer Akhtar, & H.-S. Shin (Eds.), *Functional Phosphate Materials and Their Applications*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.105561>

Song, M., Wang, X., Xu, H., Zhou, X., & Mu, C. (2023). Effect of *Trichoderma viride* on insoluble phosphorus absorption ability and growth of *Melilotus officinalis*. *Scientific Reports*, 13(1), 12345. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-39501-y>

Thilini, A., Chamalki, M., Imalka, M., & Nilwala, K. (2022). *Review on Mechanisms of Phosphate Solubilization in Rock Phosphate Fertilizer*. 52(8), 944-960. <https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2034849>

Valdez Aguilar, L. A., Tucuch Pérez, M. A., Hernández Pérez, A., Pérez Arias, G. A., García Santiago, J. C., & Alvarado Carrillo, D. (2017). Aplicaciones de aluminio mantienen el crecimiento de fresa (*Fragaria* × *ananassa* Duch.) suplementada con roca fosfórica en condiciones de cultivo sin suelo. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 35(3), 193. <https://doi.org/10.28940/terra.v35i3.190>

Vassileva, M., Mendes, G. de O., Deriu, M. A., Benedetto, G. di, Flor-Peregrin, E., Mocali, S., Martos, V., & Vassilev, N. (2022). Fungi, P-Solubilization, and Plant Nutrition. *Microorganisms*, 10(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10091716>

Vassileva, M., Olivera Mendes, G., Agostino Deriu, M., Benedetto, G. di, Flor Peregrin, E., Mocali, S., Martos, V., & Vassilev, N. (2022). *Fungi, P-Solubilization, and Plant Nutrition*. 10(9). <https://doi.org/10.3390/microorganisms10091716>

Velázquez, M. S., Cabello, M. N., Elíades, L. A., Russo, M. L., Allegrucci, N., & Schalamuk, S. (2017). Combinación de hongos movilizadores y solubilizadores de fósforo con rocas fosfóricas y materiales volcánicos para la promoción del crecimiento de plantas de lechuga (*Lactuca sativa* L.). *Revista Argentina de Microbiología*, 49(4), 347-355. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2016.07.005>

Villalobos, A. I. P., López, M. G. M., Gómez, M. I. T., Valencia, L. P. U., & Arizpe, F. N. V. (2024). Exploración del mercado de plantas ornamentales de vivero en Delicias, Chihuahua. *Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan*, 12(1), 104-114. <https://doi.org/10.47808/revistabioagro.v12i1.546>

Wang, L., Zheng, J., You, J., Li, J., Qian, C., Leng, S., Yang, G., & Zuo, Q. (2021). Effects of Phosphorus Supply on the Leaf Photosynthesis, and Biomass and Phosphorus Accumulation and Partitioning of Canola (*Brassica napus* L.) in Saline Environment. *Agronomy*, 11(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/agronomy11101918>

White, P. J. (2019). Root traits benefitting crop production in environments with limited water and nutrient availability. *Annals of Botany*, 124(6), 883-890. <https://doi.org/10.1093/aob/mcz162>

Williamson, L. C., Ribrioux, S. P. C. P., Fitter, A. H., & Leyser, H. M. O. (2001). Phosphate Availability Regulates Root System Architecture in *Arabidopsis*. *Plant Physiology*, 126(2), 875-882. <https://doi.org/10.1104/pp.126.2.875>

xia, jing, wang, kun, & Nan, L. (2023). *Changes in root architecture and endogenous hormone levels in alfalfa under phosphorus stress*. Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3305096/v1>

Zaidi, A., Khan, S. M., Ahmad, E., Saif, S., Rizvi, A., & Shahid, M. (2016). *Growth stimulation and management of diseases of ornamental plants using phosphate solubilizing microorganisms: Current perspective*. 38(117). <https://doi.org/10.1007/s11738-016-2133-7>

Zapata, F., & Roy, R. N. (2007). *Utilización de las rocas fosfóricas para una agricultura sostenible*.

Zawadzińska, A., Salachna, P., & Wilas, J. (2015). Evaluation of morphological and chemical composition of seed geranium ‘Floever Deep Red’ F<sub>1</sub> grown in substrate containing municipal sewage sludge and potato pulp. *Acta Horticulturae*, 1104, 15-20. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2015.1104.3>

Zhang, D., Moran, R. E., & Stack, L. B. (2004). *Effect of Phosphorus Fertilization on Growth and Flowering of Scaevola aemula* R. Br. ‘New Wonder’. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.39.7.1728>

Zhao, X., Lyu, Y., Jin, K., Lambers, H., & Shen, J. (2021). Leaf Phosphorus Concentration Regulates the Development of Cluster Roots and Exudation of Carboxylates in *Macadamia integrifolia*. *Frontiers in Plant Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.610591>

Zheng, T., Li, P., Li, L., & Zhang, Q. (2021). Research advances in and prospects of ornamental plant genomics. *Horticulture Research*, 8, 65. <https://doi.org/10.1038/s41438-021-00499-x>

Zulfiqar, F., Moosa, A., Ferrante, A., Nafees, M., Darras, A., Nazir, M. M., Abid, I., & Soliman, T. M. A. (2023). La aplicación foliar exógena de melatonina mitiga el estrés oxidativo inducido por la sal y promueve el crecimiento en *Gerbera jamesonii*. *South African Journal of Botany*, 161, 678-684. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.08.055>