



**CONAHCYT**

CONSEJO NACIONAL DE AGROPECUARIOS  
Y TECNÓLOGOS



**CIAQA**  
CENTRO DE INVESTIGACIÓN  
EN QUÍMICA APLICADA



Saltillo, Coahuila a 21 de octubre de 2024

**Programa de Maestría en Ciencias en Agroplasticultura**

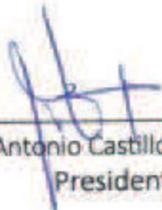
**Coordinación de Posgrado**

**PRESENTE**

Por este conducto nos permitimos informar a esta coordinación que, el documento de tesis preparado por **DIANA ELIZABETH GARCÍA CASTAÑEDA** titulado "Evaluación del efecto de fosfato monoamónico microencapsulado con goma de mezquite en el cultivo de tomate y su colonización micorrizica arbuscular" el cual fue presentado el día 17 de octubre de 2024, ha sido modificado de acuerdo a las observaciones, comentarios y sugerencias, realizadas por el Comité Evaluador asignado. Por tal motivo, avalamos que el documento corresponde a la versión final del documento de tesis.

Atentamente,

**SINODALES**

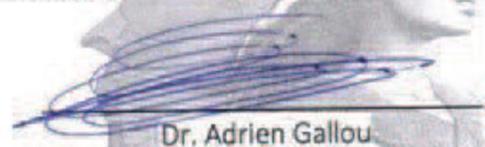
  
\_\_\_\_\_  
Dr. Marco Antonio Castillo Campohermoso  
Presidente

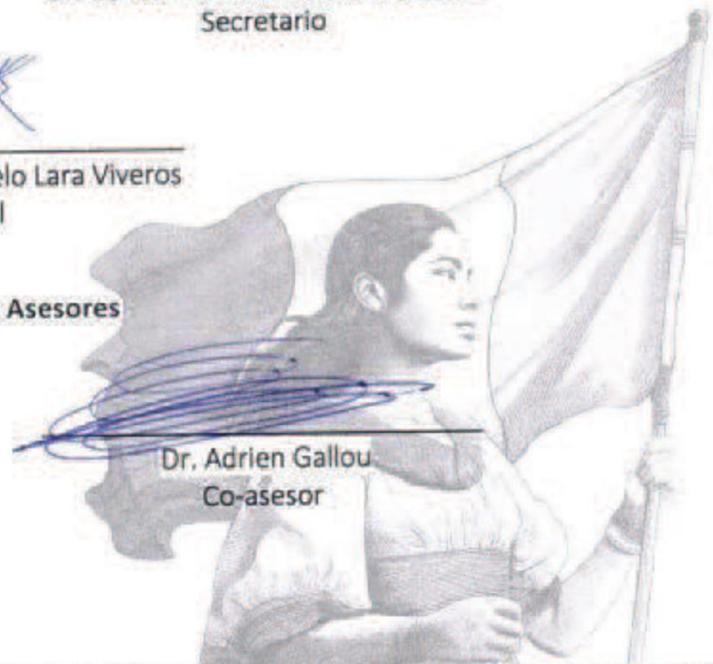
  
\_\_\_\_\_  
Dr. Carlos Patricio Illescas Riquelme  
Secretario

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Francisco Marcelo Lara Viveros  
Vocal

**Vo. Bo. de los Asesores**

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Antonio Cárdenas Flores  
Asesor

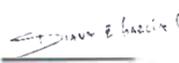
  
\_\_\_\_\_  
Dr. Adrien Gallou  
Co-asesor



## TESIS CON CARACTER ABIERTO

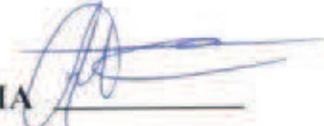
PROGRAMA: MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROPLASTICULTURA

---

AUTOR: DIANA ELIZABETH GARCÍA CASTAÑEDA FIRMA 

TITULO: Evaluación del efecto de fosfato monoamónico microencapsulado con goma de mezquite en el cultivo de tomate y su colonización micorrízica arbuscular

ASESORES: Dr. Antonio Cárdenas Flores

FIRMA 

Dr. Adrien Gallou

FIRMA 

El Centro de Investigación en Química Aplicada clasifica el presente documento de tesis como ABIERTO.

Un documento clasificado como Abierto se expone en los estantes del Centro de Información para su consulta. Dicho documento no puede ser copiado en ninguna modalidad sin autorización por escrito del Titular del Centro de Información o del Director General del CIQA.

Saltillo, Coahuila, a 17 de Octubre de 2024



Sello de la Institución

  
Dra. Julieta Torres González  
Directora General del CIQA



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA**  
**Programa de Maestría en Ciencias en Agroplasticultura**

*TESIS*

**Evaluación del efecto de fosfato monoamónico microencapsulado  
con goma de mezquite en el cultivo de tomate y su  
colonización micorrízica arbuscular**

*Presentada por:*

**DIANA ELIZABETH GARCÍA CASTAÑEDA**

*Para obtener el grado de:*

**Maestro en Ciencia en Agroplasticultura**

*Asesorada por:*

**Dr. Antonio Cárdenas Flores**  
**Dr. Adrien Gallou**

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA**  
**Programa de Maestría en Ciencias en Agroplasticultura**

**TESIS**

**Evaluación del efecto de fosfato monoamónico microencapsulado con goma de mezquite en el cultivo de tomate y su colonización micorrízica arbuscular**

**Presentada por:**

**DIANA ELIZABETH GARCÍA CASTAÑEDA**

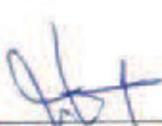
**Para obtener el grado de:**

**Maestro en Ciencia en Agroplasticultura**

**Asesorada por:**

**Dr. Antonio Cárdenas Flores**  
**Dr. Adrien Gallou**

**SINODALES**

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Marco Antonio Castillo Campohermoso**  
**Presidente**

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Carlos Patricio Illescas Riquelme**  
**Secretario**

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Francisco Marcelo Lara Viveros**  
**Vocal**

## DECLARACIÓN

Declaro que la información contenida en la Parte Experimental así como en la Parte de Resultados y Discusiones de este documento y que forman parte de las actividades de investigación y desarrollo realizadas durante el periodo que se me asignó para llevar a cabo mi trabajo de tesis, será propiedad del Centro de Investigación en Química Aplicada.

Saltillo, Coahuila a 17 de Octubre de 2024



DIANA ELIZABETH GARCÍA CASTAÑEDA

Nombre y Firma



**Programa de Maestría en Ciencias en Agroplasticultura**

Saltillo, Coah, a 28 de octubre de 2024

**Declaración de documento libre de plagio:**

Mediante esta declaración manifestamos que el documento de tesis titulado **"Evaluación del efecto de fosfato monoamónico microencapsulado con goma de mezquite en el cultivo de tomate y su colonización micorrizica arbuscular"** redactado por **Diana Elizabeth García Castañeda**, y revisado por el (la) **Dr. Antonio Cárdenas Flores y Dr. Adrien Gallou**, está libre de plagio cumpliendo los siguientes aspectos:

<b>Autenticidad y crédito a las fuentes</b>	<b>Revisado*</b>
Los textos son originales	X
El documento está libre de oraciones y párrafos copiados de otras fuentes bibliográficas, sitios de internet, etc.	X
El documento está libre de traducciones literales emanadas de literatura en otro idioma	X
Los textos están debidamente referenciados	X
Las citas textuales (si las hay) están entrecomilladas y referenciadas	X
Fotografías, esquemas, gráficas, tablas y otros materiales emanados de otras fuentes están referenciados.	X
Se adjunta reporte de revisión realizado con el software <u>iThenticate</u> con un registro de <u>10</u> % de similitud	X

\*Marque con una "X"

*Diana E. García C.*

\_\_\_\_\_  
Diana Elizabeth García Castañeda

*[Signature]*  
\_\_\_\_\_  
Dr. Antonio Cárdenas Flores

*[Signature]*  
\_\_\_\_\_  
Dr. Adrien Gallou

# Centro de Investigación en Química Aplicada



## MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROPLASTICULTURA

### TESIS

**Evaluación del efecto de fosfato monoamónico microencapsulado con goma de mezquite en el cultivo de tomate y su colonización micorrícica arbuscular**

Presentada por:

Diana Elizabeth García Castañeda

Directores de Tesis

Dr. Antonio Cárdenas Flores (CIQA)

Dr. Adrien Gallou (CIQA)

Saltillo, Coahuila, México

## AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por sus inmensas bendiciones en todo momento.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por otorgarme la beca para el estudio de esta maestría, y el apoyo en la investigación del proyecto: *Escalamiento a Nivel Piloto de Tecnologías de Fertilizantes Encapsulados: Fortalecimiento de Cadenas Productivas Sustentables en Favor del Campo Agrícola Mexicano*. Convocatoria CONACYT–PENTA–2019.

Al Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), por todo el apoyo brindado permitiéndome recibir una formación integral para mi desarrollo profesional y realizar la investigación de este proyecto.

A mis sinodales Dr. Marco Antonio Castillo Campohermoso, Dr. Carlos Patricio Illescas Riquelme y Dr. Francisco Lara Viveros por sus valiosas observaciones y recomendaciones para la realización de este trabajo.

Al Dr. Antonio Cárdenas Flores y al Dr. Adrien Gallou por su apoyo, confianza, y conocimientos compartidos. Muchas gracias.

Al Dr. Carlos Espinoza González, Layza Arizmendi Galaviz y Alfonso Mercado Silva, por su apoyo para la realización del microencapsulado.

Al M.C. Adolfo Baylón por las mediciones de fotosíntesis y apoyo con el fertirriego, al Dr. Eduardo Treviño, don Claudio Arredondo y Francisco Prado por el apoyo brindado en el manejo del cultivo, los muestreos y las mediciones realizadas. Asimismo, al Dr. Luis Sarmiento y a la M.C. Fátima Grajales, por su apoyo brindado durante la medición del área foliar. A la Dra. Yolanda Ortega, por todas las facilidades, atención y apoyo durante el trabajo en el laboratorio y cuarto de secado.

A Ismael por su apoyo durante el desarrollo de toda mi investigación y mi estancia en CIQA. A Ana Lilia, Abraham y Luis Hernández que me apoyaron en diversas actividades, trabajo en campo y muestreos realizados. Gracias por su amistad, me quedo con grandes recuerdos. Éxito en todo.

## DEDICATORIA

A mis hijos **Jorge, Ezequiel** y **Wendy**, por su incondicional apoyo, comprensión y ánimo en este camino que decidimos emprender juntos. Los amo profundamente.

A mi **madre**, la señora. **María Teresa Castañeda** por su apoyo incondicional y por estar siempre presente en mi vida.

A mis hermanos **Lester** y **Alonso** por su constante apoyo en todo momento.

A mi sobrina **Sivana García**, por su motivación y aliento.

Gracias familia por estar conmigo en los buenos y malos momentos. Los quiero.

# ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	II
DEDICATORIA	III
CONTENIDO DE CUADROS	VI
CONTENIDO DE FIGURAS	VIII
RESUMEN	X
<b>I. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
I.1 El fósforo como fertilizante	2
I.2 Factores que afectan la disponibilidad del fósforo para las plantas	4
I.3 Fertilización convencional	4
I.4 Fertilizantes microencapsulados	5
I.4.1 Microencapsulado MAP con matriz de goma de mezquite	7
I.5 Fertilizantes biológicos	8
I.5.1 Hongos micorrízico-arbusculares	9
I.6 El reto de fertilizar usando fertilizantes microencapsulados y hongos micorrízicos	12
I.7 Planta de tomate como modelo de estudio	13
<b>II. JUSTIFICACIÓN</b>	<b>14</b>
<b>III. HIPÓTESIS</b>	<b>14</b>
<b>IV. OBJETIVOS</b>	<b>15</b>
IV.1 Objetivos específicos	15
<b>V. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>16</b>
V.1 Establecimiento del experimento	16
V.2 Preparación del experimento en campo	18
V.2.1 Diseño experimental	19
	IV

V.3 Manejo del cultivo.	21
V.4 Determinaciones analíticas	21
<b>VI. RESULTADOS</b>	<b>25</b>
VI.1.1 Medición de temperatura	25
VI.1.2 Longitud de tallo	26
VI.1.3 Área foliar	29
VI.1.4 Biomasa seca	32
VI.1.5 Tasa fotosintética	35
VI.1.6. Conductancia estomática	38
VI.1.7 Tasa de transpiración	41
VI.1.8 Rendimiento del cultivo	44
VI.1.9. Estimación de la colonización micorrícica	50
VI.1.9.1 Primer muestreo	53
VI.1.9.2 Segundo muestreo	55
VI.1.9.3 Tercer muestreo	58
<b>VII. DISCUSIÓN</b>	<b>62</b>
VII.1 Temperatura.	62
VII.2 Variables de crecimiento	62
VII.3 Variables de intercambio gaseoso	66
VII.4 Rendimiento	67
VII.5 Establecimiento de la simbiosis micorrícica arbuscular	69
VII.5.1Primer muestreo	69
VII.5.2 Segundo muestreo	69
VII.5.3 Tercer muestreo	70
<b>VIII. CONCLUSIONES</b>	<b>72</b>
<b>IX. PERSPECTIVAS</b>	<b>73</b>
<b>X. REFERENCIAS</b>	<b>74</b>
<b>XI. ANEXOS</b>	<b>83</b>

## CONTENIDO DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Resultados del análisis de fertilidad de suelos de la muestra tomada de 0a 25 cm de profundidad. .....	16
<b>Cuadro 2.</b> La descripción de los tratamientos representa la forma de fertilización: 50,75 y 100 los porcentajes de P; E, microencapsulado; G, a granel; M+, inoculado; M-, sin inóculo.....	21
<b>Cuadro 3.</b> Longitud del tallo principal de plantas de tomate var. Floradade (30, 60 y 90 ddt) tratadas con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica.....	26
<b>Cuadro 4.</b> Longitud del tallo principal de plantas de tomate var. Floradade (30, 60 y 90 ddt) interactuando las diferentes dosis de fertilización de P con diferente fuente de P .....	28
<b>Cuadro 5.</b> Longitud del tallo principal de plantas de tomate var. Floradade (30, 60 y 90 ddt) interactuando las diferentes dosis de fertilización de P con diferente fuente de P .....	29
<b>Cuadro 6.</b> Área foliar de plantas de tomate var. Floradade (30, 60 y 90 ddt) tratadas con diferentes fuentes de P; diferente dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica .....	30
<b>Cuadro 7.</b> Área foliar de plantas de tomate var. Floradade (30, 60 y 90 ddt) tratadas con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica .....	31
<b>Cuadro 8.</b> Área foliar de plantas de tomate var. Floradade (30, 60 y 90 ddt), interactuando las diferentes dosis de fertilización de P, con diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica.....	32
<b>Cuadro 9.</b> Biomasa seca de plantas de tomate var. Floradade (30, 60 y 90 ddt) tratadas con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica .....	33
<b>Cuadro 10.</b> Biomasa seca de plantas de tomate var. Floradade (30, 60 y 90 ddt) interactuando con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica .....	34
<b>Cuadro 11.</b> Biomasa seca de plantas de tomate var. Floradade (30, 60 y 90 ddt) interactuando con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica. ....	35
<b>Cuadro 12.</b> Tasa fotosintética de plantas de tomate var. Floradade (30, 60 y 90 ddt) tratadas con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica .....	36
<b>Cuadro 13.</b> Tasa fotosintética de plantas de tomate var. Floradade (30, 60 y 90 ddt) interactuando con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica. ....	37
<b>Cuadro 14.</b> Tasa fotosintética de plantas de tomate var. Floradade (30, 60 y 90 ddt) interactuando con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica. ....	38
<b>Cuadro 15.</b> Conductancia estomática de plantas de tomate var. Floradade (30, 60 y 90 ddt) tratadas con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica.....	39
<b>Cuadro 16.</b> Conductancia estomática de plantas de tomate var. Floradade (30, 60 y 90 ddt) interactuando con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica.....	40
<b>Cuadro 17.</b> Conductancia estomática de plantas de tomate var. Floradade (30, 60 y 90 ddt) interactuando con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica.....	41
<b>Cuadro 18.</b> Tasa de transpiración de plantas de tomate var. Floradade (30, 60 y 90 ddt) tratadas con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica .....	42
<b>Cuadro 19.</b> Tasa de transpiración de plantas de tomate var. Floradade (30, 60 y 90 ddt) interactuando con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica.....	43

<b>Cuadro 20.</b> Tasa de transpiración de plantas de tomate var. Floradade (30, 60 y 90 ddt) interactuando con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica.....	44
<b>Cuadro 21.</b> Porcentaje de colonización micorrícica de plantas de tomate var. Floradade a los 30 ddt tratadas con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica .....	53
<b>Cuadro 22.</b> Porcentaje de colonización micorrícica de plantas de tomate var. Floradade (30 ddt) interactuando con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica .....	54
<b>Cuadro 23.</b> Porcentaje de colonización micorrícica de plantas de tomate var. Floradade (30 ddt) interactuando con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica .....	55
<b>Cuadro 24.</b> Porcentaje de colonización micorrícica de plantas de tomate var. Floradade a los 60 ddt tratadas con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica .....	56
<b>Cuadro 25.</b> Porcentaje de colonización micorrícica de plantas de tomate var. Floradade (60 ddt) interactuando con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica .....	57
<b>Cuadro 26.</b> Porcentaje de colonización micorrícica de plantas de tomate var. Floradade (60 ddt) interactuando con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica .....	58
<b>Cuadro 27.</b> Porcentaje de colonización micorrícica de plantas de tomate var. Floradade (90 ddt) tratadas con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica.....	59
<b>Cuadro 28.</b> Porcentaje de colonización micorrícica de plantas de tomate var. Floradade (90 ddt) interactuando con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica.....	60
<b>Cuadro 29.</b> Porcentaje de colonización micorrícica de plantas de tomate var. Floradade (90 ddt) interactuando con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica.....	61
<b>Cuadro 30.</b> Solución Hoagland modificada .....	83

## CONTENIDO DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Micrografía electrónica de barrido de un prototipo de fertilizante fosfórico microencapsulado con goma de mezquite, preparado mediante secado por aspersión. Imagen tomada en colector de cámara por Dr. Carlos Espinoza.....	7
<b>Figura 2.</b> Perfil de liberación de fertilizante MAP en la matriz de goma de mezquite. Imagen obtenida de (Pérez-Torres, C.A., Ibarra-Laclete, 2023).....	8
<b>Figura 3.</b> Esquema de una micorriza arbuscular mostrando que el HMA al penetrar la raíz la coloniza formando arbusculos, vesículas e hifas, para luego extender el micelio fuera de la raíz, allende la zona de agotamiento de P.	11
<b>Figura 4.</b> Aplicación del inóculo de <i>R. irregularis</i> al sustrato "peat moss" previo a su homogenización antes de la siembra.....	17
<b>Figura 5.</b> Aplicación de fertilizante microencapsulado, no microencapsulado y matriz de goma de mezquite al suelo.....	18
<b>Figura 6.</b> Esquematación de la distribución de los tratamientos experimentales: Fraccionamiento de la fertilización de P (100, 75 y 50%, parcela grande), tipo de fertilizante (MAP microencapsulado o no microencapsulado, parcela chica), biofertilización (Inoculado con HMA y no inoculado, parcela subdividida). Esta disposición se hizo con 5 repeticiones distribuyendo aleatoriamente su ubicación en el terreno. ....	20
<b>Figura 7.</b> Representación del montaje de raíces y de la dirección de observación en el microscopio, según el método de McGonigle et al. (1990). Se montan las raíces paralelamente al eje más largo del portaobjetos y las observaciones se hacen perpendicularmente a dicho eje (líneas punteadas). ....	23
<b>Figura 8.</b> Colonización micorrícica (hifas y arbusculos) de raíces de tomate var. Floradade a 45 días después de trasplante.....	24
<b>Figura 9.</b> Registros diarios de la temperatura promedio máxima y mínima.....	25
<b>Figura 10.</b> Rendimiento de plantas de tomate var. Floradade tratadas con diferentes dosis de fertilización de P (50, 75 y 100%), recolectado durante 5 semanas. Letras diferentes representan diferencias estadísticas significativas según la prueba Tukey ( $\alpha=0.05$ ).....	45
<b>Figura 11.</b> Rendimiento de plantas de tomate var. Floradade, tratadas con fertilizante fosfato monoamónico microencapsulado (E) y a granel (G), recolectado durante 5 semanas. Letras diferentes representan diferencias estadísticas significativas según la prueba Tukey ( $\alpha=0.05$ ). ....	45
<b>Figura 12.</b> Rendimiento de plantas de tomate var. Floradade inoculadas con el hongo <i>R. irregularis</i> . Letras diferentes representan diferencias estadísticas significativas según la prueba Tukey ( $\alpha=0.05$ ) .....	46
<b>Figura 13.</b> Rendimiento de plantas de tomate var. Floradade al interactuar el fertilizante fraccionado (50, 75 y 100% de P), con fertilizante microencapsulado y a granel. Comparación entre tratamientos dentro de la misma cosecha. Letras diferentes representan diferencias estadísticas significativas según la prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).....	47
<b>Figura 14.</b> Rendimiento de plantas de tomate var. Floradade al interactuar el fertilizante microencapsulado y a granel con el biofertilizante. Comparación entre tratamientos dentro de la misma cosecha. Letras diferentes representan diferencias estadísticas significativas según la prueba Tukey ( $\alpha=0.05$ ) .....	48
<b>Figura 15.</b> Rendimiento de plantas de tomate var. Floradade al interactuar fertilización fraccionada con diferente biofertilización micorrícica. Comparación entre tratamientos dentro de la misma cosecha. Letras diferentes representan diferencias estadísticas significativas según la prueba Tukey ( $\alpha=0.05$ ) .....	49
<b>Figura 16.</b> Rendimiento de plantas de tomate var. Floradade interactuando con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica. Comparación entre tratamientos dentro de la misma cosecha. Letras diferentes representan diferencias estadísticas significativas según la prueba Tukey ( $\alpha=0.05$ ) .....	50

<b>Figura 18.</b> Micrografías de secciones de raíz de tomate var. Floradade recolectadas 90 ddt, teñidas con azul de tripano. Las plantas pertenecían al tratamiento MAP encapsulado sin inoculación de HMA. ....	51
<b>Figura 19.</b> Micrografías de hongos micorrícicos arbusculares ( <i>R. irregularis</i> ) en raíces de tomate recolectadas en el tercer muestreo, de fertilizante a granel con inoculación. Tomadas a microscopio. A) Objetivo 10x. B) Objetivo 40x. 1: Arbúsculos; 2: Vesículas; 3: Hifas. ....	52
<b>Figura 20.</b> Micrografías en raíces de tomate recolectadas en el tercer muestreo, donde se observa la raíz no colonizada por el hongo arbuscular ( <i>R. irregularis</i> ). Tomadas a microscopio. A) Objetivo 10x. ....	52

## RESUMEN

Los fertilizantes minerales de fósforo (P) contribuyen a los altos rendimientos de los cultivos, ya que el P es fundamental para el crecimiento de las plantas debido a que participa en el metabolismo vegetal, actuando en los procesos que requieren transferencia de energía celular, en la respiración y fotosíntesis, entre otros. Los microencapsulados evitan que los fertilizantes se pierdan por lixiviación o volatilización. Por lo que el objetivo de este trabajo fue evaluar el fertilizante microencapsulado de fosfato monoamónico (MAP) con una matriz de goma de mezquite, la posibilidad de reducir la dosis necesaria de P, y su impacto sobre el establecimiento de la simbiosis micorrícica arbuscular con el hongo *Rhizophagus irregularis*, en el cultivo de tomate, para determinar si el fertilizante microencapsulado tiene la capacidad de proporcionar fósforo a las plántulas de tomate en condiciones de campo. Se utilizaron dosis convencionales de fertilizantes NPK y una dosis fraccionada de P al 50, 75 y 100%, distribuida por fertirriego, complementadas con y sin la aplicación de hongos micorrícicos arbusculares. Se midió mensualmente longitud de tallo, área foliar, biomasa seca, tasa de transpiración y conductancia estomática, tasa fotosintética, porcentaje de colonización y rendimiento. Se logró establecer la colonización micorrícica en todos los tratamientos. En la mayoría de las variables medidas no se obtuvieron diferencias significativas. La longitud de tallo a los 30 días después de trasplante (ddt) arrojó mejores resultados en los tratamientos donde se aplicó fertilizante a granel sin inóculo obteniendo una longitud de 67 cm, en comparación con el fertilizante microencapsulado con inóculo, al igual que la fertilización de 50% de P sin el inóculo en comparación con 75% de P con inóculo, para la interacción de los tres factores de fertilización solo a los 90 ddt hubo un mayor incremento en el tratamiento de 50% de P con microencapsulado con inóculo de 200 cm igual que el de 100% de P con microencapsulado sin inóculo. En el área foliar y la biomasa seca los mejores resultados se obtuvieron con la interacción del fertilizante 50% de P con fertilizante a granel a los 30 ddt. A los 90 ddt para biomasa seca el tratamiento sin inóculo y la interacción del microencapsulado sin inóculo. En la tasa fotosintética, solo hubo diferencia a los 90 ddt en la interacción del fertilizante 100% de P con el fertilizante a granel.

Se encontraron diferencias significativas en la segunda semana, destacando el fertilizante de 50% de P, al igual que en el tratamiento con inóculo. La interacción de dos factores de fertilización al 50% de P con microencapsulado y con inóculo obtuvo el mayor rendimiento. La interacción de los tres factores el mostró que el mayor rendimiento fue para el 50% de P con microencapsulado con el inóculo.

En la estimación del porcentaje de inoculación, hubo colonización tanto de hongos nativos del suelo como del aplicado, obteniéndose diferencias estadísticas en el primer muestreo para el porcentaje vesicular en tratamientos sin inóculo, en la interacción del fertilizante a granel sin inóculo y en la interacción de los tres factores de fertilización al 100% de P con fertilizante a granel sin inóculo. A los 60 ddt, se obtuvo mayor colonización hifal en los tratamientos con inóculo y en la interacción de fertilizante a granel con inóculo, así como el tratamiento de 75% de P con inóculo.

Los resultados mostraron que el fertilizante microencapsulado es efectivo y comparable al convencional en disponibilidad de P, promoviendo un buen crecimiento del tomate. Además, la tecnología de encapsulación es compatible con los hongos micorrícicos, sugiriendo una sinergia potencial que mejora la absorción de nutrientes y la resistencia a enfermedades. Esto hace del fertilizante encapsulado una alternativa viable y sostenible para la fertilización en tomate.

## I. INTRODUCCIÓN

La fertilización de los cultivos es una actividad primordialmente dirigida al suelo para aumentar su productividad, ya que a través de esta práctica las plantas cultivadas reciben los nutrientes necesarios para cumplir con su ciclo de vida, y en el mejor de los casos lograr el óptimo rendimiento desde el punto de vista agronómico.

La demanda de alimentos debido al aumento de la población ha ocasionado presión sobre la agricultura y por lo tanto, en la explotación del suelo, ya que con la necesidad de producir más producto para el consumo humano implica la aplicación de fertilizantes fosfóricos solubles, los cuales proceden de yacimientos minerales no renovables (Lgbal, 2019). Es decir, son un recurso finito. Además de esto, el aprovechamiento de los fertilizantes de fósforo (P) tienen una baja eficiencia dadas las propiedades químicas (baja solubilidad) y físicas (higroscopicidad) de este elemento como nutriente vegetal, en el suelo (Roberts, 1997).

Para mejorar la eficiencia de los fertilizantes de fósforo, una de las soluciones que más impulso ha tenido es la aplicación de biofertilizantes, bacterias y hongos solubilizadores de P (Santillán, 2016), o bien hongos micorrícicos que en simbiosis suministran el P a la planta. Esta simbiosis es común, sin embargo, usualmente se ve disminuida su eficiencia y abundancia cuando el suelo es altamente fertilizado, ya que la planta puede acceder a los nutrientes directamente del suelo (Romero-Salazar, 2022).

El uso de sales fertilizantes acarrea algunas desventajas, ya que cuando tenemos un suelo salino se restringe la absorción de agua que requiere el cultivo, reduce la infiltración y se afecta el desarrollo de éste, por falta de agua y por la resistencia al crecimiento de raíces. Otra desventaja es la contaminación del suelo y mantos acuíferos, ya que aproximadamente el 80% de las aguas residuales son liberadas sin someterse a algún tratamiento, lo cual resulta en aproximadamente 3 millones de toneladas de fósforo al medio ambiente anualmente (Lennon, 2024), que generan problemas que afectan la flora, la fauna y a la salud humana (Sharma y Singhvi, 2017). Los efectos de la salinidad en el suelo pueden reducirse controlando la concentración salina, mediante lavados, lixiviación y mejoramiento del drenaje (Villafañe *et al.*, 2004).

Para contrarrestar dichas desventajas se han desarrollado estrategias que permiten incrementar la eficiencia de uso de fertilizantes y la disminución del impacto ambiental (Shaviv, 2001) producto de la fertilización, como el uso de fertilizantes microencapsulados o recubiertos que pueden prevenir problemas de pérdidas por lixiviación o pérdidas de solubilidad ya que al estar cubiertos liberan las sales fertilizantes de forma gradual (García y María, 2005).

No existen reportes de utilización conjunta de biofertilizantes con fertilizantes fosfóricos microencapsulados ni su compatibilidad de uso en condiciones de campo, bajo malla sombra. Un ambiente semiprotegido de gran importancia en la agricultura (Costales *et al.*, 2018).

### **I.1 El fósforo como fertilizante**

Los fertilizantes minerales de P contribuyen los altos rendimientos de los cultivos y contribuyen a alimentar a una significativa fracción de la población mundial. Sin embargo, los procesos en el desarrollo de P inorgánico a partir de minerales y biomoléculas por bacterias, hongos y plantas como el cambio de pH del sustrato, el intercambio de ligandos y la actividad enzimática de éstos hacen que el P se inmovilice en el suelo, dificultando su disponibilidad para ser absorbido por las plantas de manera oportuna y eficiente (Sohrt *et al.*, 2017), el P que no es absorbido se acumula en el suelo y otra parte se disuelve y se mueve hacia las fuentes del agua.

Las prácticas actuales para aumentar la eficiencia en el uso de P son insuficientes y no han reducido trascendentalmente los problemas referidos. Hay que mencionar que existen otras implicaciones como es la función contrastante de algunos micronutrientes como el zinc y el hierro que estimulan la disponibilidad de P en el suelo cuando hay un bajo contenido de este macronutriente, sin embargo, también inhiben su absorción cuando la fertilización cuenta con un alto contenido de P; esto podría proporcionar una alternativa de manejo para que las plantas lo aprovechen en diferentes regímenes de fertilización, especialmente en el contexto de utilizar hongos micorrícicos (Fan *et al.*, 2018). Se ha documentado que la aplicación combinada de fertilizantes químicos y biofertilizantes puede mejorar el rendimiento y la calidad de numerosas plantas (Aghighi Shahverdi *et al.*, 2019).

La fertilización con P es de suma importancia en la producción de cultivos, ya que muchos suelos carecen de disponibilidad suficiente para obtener una producción óptima. El P es fundamental para el crecimiento de las plantas debido a que participa en el metabolismo vegetal, actuando en los procesos que requieren transferencia de energía celular, en la respiración y fotosíntesis, en la formación del almidón y carbohidratos simples, y en la translocación sistémica de estos (Bindraban *et al.*, 2020). Acorde con lo publicado por (Hasanuzzaman *et al.*, 2018), el P está implicado en la división celular, la activación/desactivación de enzimas, estimula la germinación de semillas, el desarrollo del tallo y raíces y le proporciona fuerza al tallo, además, participa en la formación de flores y semillas y en la calidad del cultivo, por lo tanto, este elemento es fundamental en todas las etapas de desarrollo hasta la madurez de los cultivos (Grant *et al.*, 2001).

El P es un componente principal de moléculas energéticas incluidos el trifosfato de adenosina ATP, necesario para la síntesis del almidón (Hawkesford *et al.*, 2012), es necesario para la transferencias de energía en los nucleotidos trifosfato de citidina (CTP), el trifosfato de guanosina (GTP), el trifosfato de uridina (UTP), el fosfoenolpiruvato y otros compuestos (García-Pérez, 2016) en la síntesis de RNA.

El déficit de P en la planta puede afectar su desarrollo y fisiología, provocando que las plantas se tornen de color verde oscuro a púrpura (Grant *et al.*, 2001). También puede provocar que las hojas se enrollen y se inclinen hacia arriba, aparezcan manchas internas de color marrón en los tubérculos, retrasar la madurez de la planta y reducir el crecimiento de los brotes (García-Pérez, 2016). La deficiencia también puede afectar la síntesis de proteínas y ácidos nucleicos, lo que lleva a la acumulación de nitrógeno soluble en los tejidos, pudiendo retrasar el crecimiento celular. Por lo tanto, si hay una deficiencia de P, se puede generar un cultivo con altura reducida, crecimiento de hojas retardado, amacollamiento y desarrollo de raíces secundarias (Grant *et al.*, 2001). Todo lo anterior se traduce en que los cultivos sin P suficiente ven reducida su producción.

A diferencia de elementos como el azufre que es añadido al suelo por las lluvias en zonas industriales, el potasio es reciclado de residuos orgánicos, el P disponible en el suelo es insuficiente para las plantas ya que éste no es reciclado por las lluvias ni es liberado rápidamente de los residuos orgánicos (Fernandez, 2007). Por lo tanto, la fertilización

con P es una práctica indispensable en la producción de cultivos, ya que los suelos no contienen la cantidad suficiente para el óptimo desarrollo del cultivo (Roberts, 1997).

## **I.2 Factores que afectan la disponibilidad del fósforo para las plantas**

Existen diversos factores que influyen en la disponibilidad de P tales como; la humedad y la temperatura, ya que la movilidad del P aumenta con la cantidad de contenido de humedad en el suelo. La mineralización de P orgánico es afectada cuando la temperatura disminuye, ya que las bajas temperaturas tienen efectos en la absorción de P, aumentan la viscosidad de la solución del suelo, disminuyen la tasa de difusión y la cantidad de P disponible en la superficie de la raíz para la absorción (Juárez, 2018).

Cuando el pH del suelo está en rango óptimo (entre 6.5 y 7) la mayoría de los nutrientes mantienen su máxima disponibilidad, pero cuando es un suelo ácido limita la disponibilidad, la absorción y la concentración de nutrientes y el rendimiento del cultivo

El pH del suelo es uno de los principales factores que afecta la disponibilidad de nutrientes para las plantas, cuando el pH del suelo es ácido limita a disponibilidad, la absorción y la concentración de nutrientes, por lo tanto, afecta el rendimiento del cultivo (Rosas-Patiño *et al.*, 2021), pero en suelos alcalinos la disponibilidad de P y micronutrientes es baja, hay altos niveles de Ca y Mg (Osorio, 2012).

Por otro lado, la compactación del suelo disminuye la tasa de difusión del P y también la cantidad de oxígeno presente en el suelo, lo que afecta la respiración de la raíz y por consecuencia la absorción de P (Juárez, 2018) Se afecta el transporte de nutrientes, aumenta el contacto entre la raíz y el suelo, lo que disminuye el crecimiento de la raíz, ya que se limita la aireación y la estabilidad mecánica (Arvidsson, 1999). Las características químicas del suelo proporcionan la relación entre la fertilización con P y la disponibilidad de nutrientes del suelo.

## **I.3 Fertilización convencional**

La agricultura moderna depende del P adquirido de la roca fosfórica, recurso no renovable que se estima puede agotarse entre los próximos 50 a 100 años, por lo que los costos de producción están aumentando ya que la roca de fosfato está disminuyendo

(Cordell *et al.*, 2009). Algunos autores mencionan que el agotamiento de P alcanzará un pico de producción en el año 2050 (Vance *et al.*, 2003).

La relación superficial del abono junto con los residuos vegetales que se acumulan en la superficie enriquecen los primeros centímetros de la sección transversal, provocando una estratificación de P que contrasta con la uniformidad del horizonte de cultivo convencional. Esta disposición particular del P puede conducir a su deficiencia, en muchos casos, las plantas absorben más P cuando los fertilizantes se aplican a la superficie durante la siembra directa que cuando se aplican al suelo. Es conveniente promover el crecimiento de las plántulas proporcionando una fuente de P fácilmente disponible cerca de las raíces (González Fernández, 2003).

La necesidad de aumentar la producción de cultivos alimentarios, la escasez de tierras para la producción agrícola, la falta de agua o la mala calidad para su uso agrícola, son las razones por las que investigadores buscan obtener alguna solución alternativa al crecimiento de las plantas y el resultado fue la hidroponía, la cual requiere una solución nutritiva a base de agua y fertilizantes, y puede contener o no sustrato (Herrera, 1999).

Con el uso del fertirriego, el rendimiento por hectárea y la calidad del cultivo aumentarán con una producción continua durante todo el año. La fertilización asegura que los nutrientes se entreguen directamente en el bulbo de humedecimiento, donde ocurre la mayor cantidad de absorción de raíces, esto contribuye al uso eficiente del agua y los fertilizantes, lo que mejora su distribución y ubicación (Herrera, 1999).

#### **I.4 Fertilizantes microencapsulados**

Los fertilizantes microencapsulados son llamados también fertilizantes de liberación lenta o controlada por la AAPFCO (Asociación Americana del Control Oficial de Plantas y Alimentos) y lo define como aquellos que disponen de los nutrientes para las plantas de dos formas: a) Retarda la disponibilidad del fertilizante para que pueda ser usado después por la planta y b) Permite que la disponibilidad de los nutrientes en las plantas sea significativamente alta por un período largo de tiempo. Para la AAPFCO los términos de liberación lenta y controlada no tienen diferencia, pero, para efectos de comercialización, la descomposición microbiológica de productos nitrogenados como UFs (urea-formaldehídos), se distribuyen como fertilizantes de liberación lenta y los

productos recubiertos o encapsulados como fertilizantes de liberación controlada (García y María, 2005).

Este tipo de fertilizantes, son aquellos que proporcionan nutrientes a las plantas, pero de forma gradual o retardada, y así prolongan el tiempo de disponibilidad de los nutrientes. (Costales *et al.*, 2018). La creación de recubrimientos o matrices poliméricas diversas ha permitido recubrir los gránulos de fertilizante para generar prometedores fertilizantes con los cuales incluso sea posible pronosticar el tiempo en el que los nutrientes estarán disponibles obteniendo un producto de liberación controlada (Espinoza-González *et al.*, 2019; Navarro-Guajardo *et al.*, 2018).

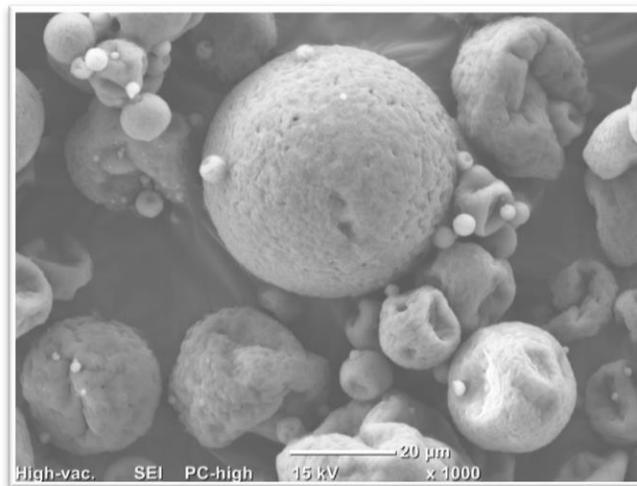
Fertahi y colaboradores realizaron un estudio con fertilizantes de fósforo recubiertos de biopolímeros los cuales muestran resultados prometedores en la desaceleración de la liberación de P, sin embargo, los estudios realizados han sido principalmente en agua, y rara vez se han abordado sus impactos en las propiedades del suelo. (Fertahi *et al.*, 2022) Los tratamientos fertilizantes fueron superfosfato de calcio triple granular (TSP) sin recubrimiento, TSP recubierto con lignina, TSP recubierto con lignina-carragenina y un suelo no fertilizado, el polímero de carragenina era un polisacárido vegetal, el polímero de lignina se extrajo de la biomasa de orujo de aceituna, se seleccionaron gránulos con aproximadamente la misma masa correspondientes a 9.8 mg de P. Se comparó la disolución de P a partir de TSP y fertilizantes TSP recubiertos de biopolímeros en la superficie de suelos cultivados. Los resultados mostraron que el TSP recubierto acidificó el suelo hasta un radio de 14 mm alrededor de cada gránulo de fertilizante, y en TSP sin recubrimiento la acidificación se extendió a 21 mm. Además, se observó un aumento de P microbiano en el suelo tratado con TSP recubierto, posiblemente debido a la entrada de carbono (C) y el consiguiente aumento de la biomasa microbiana. Sin embargo, se observó una liberación de P más lenta del TSP revestido debido al efecto de la barrera del revestimiento.

El análisis termodinámico mostró que los mecanismos físicos de absorción del P en microcápsulas impulsan un proceso que es endotérmico, no espontáneo y aumenta con la temperatura, lo cual mejora la transferencia de masa y aumenta la capacidad de adsorción. El trabajo concluye señalando que la recuperación del biopolímero alginato a

partir de biomasa residual, junto con la recuperación de P de los efluentes, puede aplicarse además como recurso secundario de P (Dall’Agnol *et al.*, 2022).

#### I.4.1 Microencapsulado MAP con matriz de goma de mezquite

Se ha desarrollado la estandarización en la producción de prototipos de fertilizante a nivel piloto (figura 1) basado en formulaciones con polímeros solubles en agua, utilizando como matriz encapsulante goma de mezquite en un 71% (*Prosopis velutina*) que es el formador de la película encapsulante, y 29% con otros aditivos biofuncionales como: cera de candelilla (*Euphorbia antisyphilitica*) la cual se usa para regular la solubilidad del mezquite y para impartir dispersabilidad de polvos en agua fría; saponinas (*Agave lechuguilla*) se utiliza para regular la solubilidad del mezquite y como estabilizante de la cera; ácido fúlvico (derivado de la Leonardita) se utiliza para mejorar la cristalización del fertilizante en la encapsulación. Se usa como mejorador de suelos y transporte de nutrientes; miel de maguey/mucílago de nopal, se usa para mejorar la cristalización del fertilizante en la encapsulación (Pérez-Torres, C.A., Ibarra-Laclete, 2023)

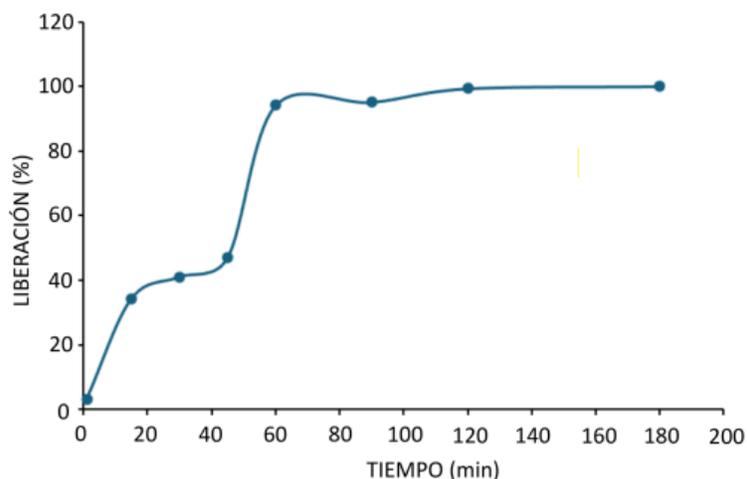


**Figura 1.** Micrografía electrónica de barrido de un prototipo de fertilizante fosfórico microencapsulado con goma de mezquite, preparado mediante secado por aspersión. Imagen tomada en colector de cámara por Dr. Carlos Espinoza.

Los nutrimentos se encuentran recubiertos por materiales orgánicos e inorgánicos que controlan la velocidad, cantidad y duración de la liberación de los nutrientes hacia el

suelo, para reducir el riesgo de pérdida por lixiviación y permite reducir el número de aplicaciones y la cantidad de fertilizante a aplicar.

La liberación de nutrientes se divide en tres etapas; el período de retraso, en la cual el agua del suelo ingresa a través de la superficie del recubrimiento y penetra lentamente en el núcleo, en esta etapa no se libera fertilizante, se crea un flujo de agua que entra y un flujo de soluto que sale. En la segunda etapa, el nivel de agua en el interior continúa aumentando, se disuelve más fertilizante, por lo que se acumula presión osmótica en el núcleo, lo que lleva a una liberación lenta del fertilizante a través de los poros. La última etapa es la descomposición, en la cual se libera la mayor parte del fertilizante, se reduce el gradiente de concentración, la fuerza impulsora y aumenta la tasa de liberación. El perfil de liberación se aprecia en la figura 2.



**Figura 2.** Perfil de liberación de fertilizante MAP en la matriz de goma de mezquite. Imagen obtenida de (Pérez-Torres, C.A., Ibarra-Laclete, 2023)

## I.5 Fertilizantes biológicos

Los fertilizantes biológicos o biofertilizantes son sustancias que contienen microorganismos vivos, los cuales se aplican al suelo y/o planta para incrementar la fertilidad (Armenta-Bojórquez et al., 2010)

Durante décadas la producción agrícola se vio en la necesidad de utilizar fertilizantes sintéticos que han tenido un impacto ambiental, ya que los suelos han sido dañados con

la contaminación y la acidificación. Debido a esta problemática se han desarrollado biofertilizantes, los cuales son formulados a base de bacterias u hongos que permiten a la planta adquirir nutrientes para mejorar su desempeño (Barragán Ocaña, 2021). Los biofertilizantes mantienen el suelo con un buen contenido de macro y micronutrientes mediante la fijación de nitrógeno, la mineralización de fosfato y potasio y la liberación de reguladores del crecimiento del cultivo, la producción de antibióticos y la biodegradación de la materia orgánica del suelo. Como se trata de organismos vivos, se pueden multiplicar y estar durante el ciclo de nutrientes para beneficiar los cultivos (Bhardwaj *et al.*, 2014). Dentro de este grupo destacan las bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) y los hongos micorrícicos arbusculares (HMA) los cuales operan de forma conjunta en la zona suelo-raíz.

### **I.5.1 Hongos micorrícico-arbusculares**

El término micorriza significa “raíces de hongos”, y es la simbiosis entre un hongo y la raíz de la planta. Existen siete tipos de micorrizas; arbusculares, ecto-, ectendo-, arbutoide, monotropoide, ericoide y orquidácea, de todas ellas las más abundantes son las arbusculares y las ectomicorrizas (Siddiqui y Pichtel, 2008).

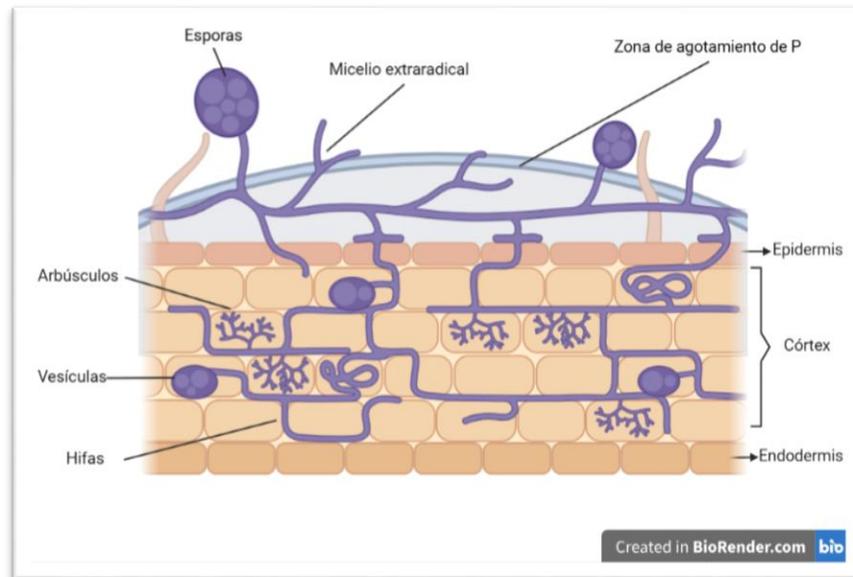
Los hongos micorrícico-arbusculares (HMA), pertenecientes al fílum Glomeromycota son simbioses obligados con la raíz de la planta de la cual obtienen el C que utilizan para completar su ciclo, y asimismo proporcionan a la planta nutrimentos minerales, como lo es el P; juegan un papel crucial en la translocación y el balance de P en el sistema suelo-planta, el ciclo de nutrientes e impactan positivamente la microbiota en el suelo (Garc y Alberto, 2014). De forma natural, los HMA forman parte de la microflora del suelo, colonizan las raíces de las plantas y favorecen el crecimiento de las mismas. En sistemas cultivados, la inoculación de micorrizas en suelos bajos en P provoca un incremento en la disponibilidad de P para las plantas (Siddiqui y Pichtel, 2008). Los HMA son de naturaleza simbiótica y se asocian fácilmente con cereales y plantas hortícolas (Birminhan, 2012 citado por Romero-Salazar *et al.*, 2022) y son más conocidos por mejorar la biodisponibilidad del P.

Los HMA proporcionan beneficios nutricionales a la planta con la entrega de minerales, incluidos biológicamente esenciales P y nitrógeno, este intercambio de nutrientes ocurre

dentro de las células corticales de la raíz donde se encuentran estructuras de hifas ramificadas que reciben el nombre de arbusculos, los cuales no penetran el citoplasma del hospedante (Siddiqui y Pichtel, 2008).

El aprovechamiento de HMA como inoculantes es una estrategia para abastecer a la planta de P dado que el hongo puede dar acceso a su planta hospedante a fuentes de P no disponibles para ésta. Las evidencias más importantes son que los HMA incrementan el volumen de suelo explorado, superan la zona de agotamiento de P que envuelve a las raíces y que tiene transportadores de P más eficientes que la planta los cuales incluso pueden trabajar a potenciales hídricos menores (Sawers *et al.*, 2008). Además, existen evidencias, aunque controversiales, de que los HMA ayudan a la planta a solubilizar el P.

La movilización de fósforo a través de las micorrizas inicia con la absorción de fósforo que se encuentra libre en el suelo por parte de las hifas extra radicales, éstas mismas lo traslocan desde el micelio extra radical hacia el micelio intrarradical, siendo este último el encargado de entregar el P dentro de las raíces. A cambio la planta funciona como la fuente de C para el hongo simbiote (Harrison *et al.*, 2002). Los HMA brindan a la planta hospedante grandes beneficios tales como: potenciar la nutrición mineral, aumentar la tolerancia al estrés hídrico, inducir una mayor resistencia a los patógenos y reducir la sensibilidad a las sustancias tóxicas que se encuentran en el suelo (Beltrano *et al.*, 2013).



**Figura 3.** Esquema de una micorriza arbuscular mostrando que el HMA al penetrar la raíz la coloniza formando arbusculos, vesículas e hifas, para luego extender el micelio fuera de la raíz, allende la zona de agotamiento de P.

### ***Rhizophagus irregularis***

El hongo llamado *Glomus intraradices* o *Rhizophagus irregularis* es el hongo micorrícico arbuscular más utilizado de la familia Glomeraceae (Stockinger *et al.*, 2009). Este se emplea en la agricultura para mejorar el rendimiento (Campos *et al.*, 2015) y frecuentemente se utiliza en estudios científicos (Barragán Ocaña, 2021).

Según Mathimaran *et al.*, (2005) *R. irregularis* es un hongo que coloniza rápidamente diferentes tipos de plantas como el maíz y predomina en suelos con alto contenido de arcilla.

Por ejemplo, se utilizó para evaluar el efecto de la coinoculación con *Rhizobium sp.* sobre el crecimiento de *P. vulgaris*, se inocularon plantas de frijol y se cultivaron en invernadero, los resultados mostraron que esta inoculación impulsa el incremento de los parámetros de crecimiento y desarrollo (Hidalgo y Ramos, 2019).

Ramos y colaboradores, determinaron el efecto de *R. irregularis* y NaCl sobre plántulas de tomate, utilizando tres concentraciones del inóculo 0, 1.5 y 3 g, al igual que tres concentraciones de NaCl; 0,100 y 200 mM, durante 30 días. Los resultados mostraron

que la cantidad de inóculo ocasionó un incremento en la longitud de tallo, el número de hojas, el número de entrenudos, el diámetro de tallo, el peso fresco de tallo y raíz. Las micorrizas ocasionaron reducción en la disminución de crecimiento causada por la salinidad (Ramos *et al.*, 2021)

En un estudio realizado por Carreón *et al.*, (2014) se evaluó el desempeño de 12 inoculantes de hongos micorrícicos arbusculares en portainjertos de plantas de aguacate, se utilizaron plantas de 60 días de edad, recién injertadas, las cuales se estuvieron midiendo altura, diámetro de los tallos y número de hojas cada dos semanas durante 5 meses, después las plantas fueron cosechadas y se determinó el peso seco del tallo y de la raíz. En la cosecha las plantas que fueron inoculadas con *R. irregulares* tuvieron 2 veces más el peso del tallo y de la raíz con relación a los otros tratamientos

## **I.6 El reto de fertilizar usando fertilizantes microencapsulados y hongos micorrícicos**

Como ya se mencionó, en la simbiosis establecida por los HMA, las hifas extra radicales absorben el fosfato y lo transmiten a la planta. En la mayoría de las especies de cultivos, el hongo crece primero en los espacio intercelulares de las raíces y en las células corticales, donde se forman las hifas diferenciadas llamadas arbusculos (Harrison *et al.*, 2002). En la mayoría de las células corticales colonizadas, las ramas de las hifas están rodeadas por una membrana vegetal llamada membrana periarbuscular, que es el sitio principal de la transferencia de fósforo. En el interior de las raíces, el hongo absorbe C para crecer y esparcir el micelio hacia el exterior, donde las raíces exploran el suelo y absorben P. Las hifas extra radiales absorben el P y luego se transporta al interior de la planta para el intercambio en los arbusculos (Kobae y Hata, 2010).

La aplicación de grandes cantidades de fertilizantes nitrogenados en suelos ricos en P reduce la abundancia y diversidad de hongos micorrícicos arbusculares (Hernandez-Hernandez *et al.*, 2023).

Cabe señalar que la presencia de micorrizas va ligada con el contenido de P del suelo. El bajo contenido de P en el suelo favorece la formación de simbiosis micorrícica, aumentando la colonización de las raíces y promueve la reproducción de esporas; pero

si el contenido de P en el suelo es alto, se reduce la simbiosis en las raíces de las plantas (Toro *et al.*, 2023).

### **I.7 Planta de tomate como modelo de estudio**

El tomate es una especie de cultivo que pertenece a la familia Solanaceae, el cual es un grupo de plantas capaces de formar micorrizas arbusculares (Alvarado-Carrillo *et al.*, 2014). Existen una amplia gama de estudios sobre la formación y función de las micorrizas arbusculares empleando como modelo al tomate (Ávila-Peralta *et al.*, 2018). Los resultados de un estudio sobre inoculación micorrícica en plantas de tomate bajo casa sombra, muestra los beneficios que aporta esta simbiosis como incrementar el contenido de clorofila, longitud de la planta y colonización micorrícica arbuscular, esto en comparación con las plantas que no fueron inoculadas (Alvarado-Carrillo *et al.*, 2014)

Considerando lo anteriormente expuesto, se plantea la interrogante de si es posible combinar dos estrategias de fertilización con enfoque en el P (microencapsulados y biofertilizantes HMA) a fin de dotar de este nutriente aumentando su eficiencia, usando al tomate cultivado en malla sombra como modelo de estudio.

## II. JUSTIFICACIÓN

De acuerdo con lo anteriormente expuesto, la fertilización es una actividad esencial para lograr óptimo rendimiento, sin embargo, ya que las técnicas de fertilización convencionales son ineficientes, es necesario obtener fertilizantes los cuales ayuden a evitar una mayor contaminación en suelos, aire, agua y evitar se pierdan y resulte bajo rendimiento en las plantas. Para lograrlo resulta conveniente conocer si se puede establecer una compatibilidad entre el fertilizante encapsulado y el establecimiento de la simbiosis micorrícica arbuscular con el hongo *R. irregularis*, en suelo, bajo malla sombra.

## III. HIPÓTESIS

El fertilizante microencapsulado MAP con una matriz de goma de mezquite pueden satisfacer las necesidades de fertilización de P del cultivo de tomate en malla sombra. Esta tecnología fertilizante es compatible con el uso de hongos micorrícico arbusculares biofertilizantes

## IV. OBJETIVOS

Evaluar el desempeño de fertilizante de fosfato monoamónico, microencapsulado con una matriz de goma de mezquite y su efecto sobre el establecimiento de la simbiosis micorrícica arbuscular con el hongo *R. irregularis*.

### IV.1 Objetivos específicos

- Determinar si los fertilizantes microencapsulados tienen la capacidad de proporcionar P al cultivo de tomate, cultivado en el suelo, bajo malla sombra.
- Determinar si es posible reducir la dosis fertilizante convencional de P, mediante el uso de fertilizante microencapsulado y del biofertilizante micorrícico sin alterar el desempeño del cultivo de tomate.
- Medir el impacto de la fertilización de microencapsulados de fosfato monoamónico sobre el establecimiento de la simbiosis micorrícica de tomate.

## V. MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación se llevó a cabo en el Campo Agrícola Experimental del CIQA, ubicado en San Antonio de Encinas, Ramos Arizpe, Coahuila y en los laboratorios de microbiología, biotecnología, del departamento de Biociencias y Agrotecnología del Centro de Investigación en Química Aplicada en Saltillo, Coahuila, México.

Material biológico: se utilizó la planta de tomate var. Floradade (Fax de occidente S.A. de C.V), mientras que como hongo formador de micorrizas arbusculares se empleó *R. irregularis* (MicorrizaFer Plus, Biofábrica Siglo XXI); el producto contenía 100 propágulos por gramo de producto, de los cuales 30% son esporas.

Material fertilizante encapsulado: las microcápsulas de fertilizante fosfórico fueron proporcionadas por el Dr. Carlos José Espinoza González del Departamento de Materiales Avanzados del CIQA. Éstas fueron generadas por la técnica de secado por aspersión, compuestas a base de fosfato monoamónico (MAP) en matriz de goma de mezquite, con una relación 55:45 (p/p).

### V.1 Establecimiento del experimento

Se caracterizó la fertilidad del sitio del experimento antes del establecimiento del cultivo (Cuadro 1), enviando las muestras al Laboratorio Nacional de análisis de agua, suelo, planta y atmósfera, en Gómez Palacio, Durango

**Cuadro 1.** Resultados del análisis de fertilidad de suelos de la muestra tomada de 0a 25 cm de profundidad.

Análisis de fertilidad de suelos			
N (Kg/ha)	22.2	pH	8.1
P (Kg/ha)	168.4	Da (g/cm <sup>3</sup> )	1.49
K (Kg/ha)	4242.4	Textura	52% arena, 18% arcilla, 30% limo

Para evaluar que el microencapsulado fuera capaz de liberar el P que contenía (proveniente del MAP), y que estos son aprovechados por las plantas, se realizó un ensayo en campo analizando el desarrollo del cultivo de tomate durante 150 días.

Para evaluar la compatibilidad entre el fertilizante microencapsulado con los biofertilizantes, se trabajó con una dosis convencional de fertilizantes N-P-K y con dosis fraccionadas de P, complementadas con la aplicación de HMA; las dosis fraccionadas de fertilización se establecieron a fin de conocer si el microencapsulado tenía la capacidad de eficientar el uso de la sal fertilizante, además de explorar la interacción funcional con el biofertilizante.

Se germinaron semillas de tomate en sustrato de turba (PRO MIX, Premier Peat Moss), en charolas germinadoras de 200 cavidades, siendo cada cavidad de 25x25x7 mm. Igualmente se pusieron a germinar semillas, pero inoculando el sustrato con el biofertilizante *R. irregularis*, la cantidad de inóculo utilizado fue de 1 g por planta, siendo 500 semillas las que sembraron fue un total de 500 gr de inóculo el que se adicionó al sustrato mezclándolo previamente como se muestra en la figura 4, antes de colocarlo en la charola, con un total de 100 propágulos por gramo, dejándolas el tiempo suficiente para que el tomate presentara 2 hojas verdaderas en el invernadero de CIQA. En esta etapa, las plantas fueron cultivadas con la solución nutritiva de Hoagland modificada (Cuadro 30).



**Figura 4.** Aplicación del inóculo de *R. irregularis* al sustrato “peat moss” previo a su homogenización antes de la siembra.

## V.2 Preparación del experimento en campo

La superficie en la que se trabajó es de 28 m x 12 m. Se levantaron camas de aproximadamente 20 cm de altura, con 0.6 m de ancho por 12 m de largo. Se dejó un espacio de 0.9 m entre cama y cama. Cada cama fue considerada como parcela grande, ésta se dividió a lo ancho en dos partes iguales (6 m de largo) como parcela chica en la que se aplicaron los tipos de fertilizante y cada parcela chica se subdividió (también a lo ancho) para separar las plantas inoculadas de las no inoculadas con HMA. En total se tuvieron 17 camas de las que 15 pertenecían a tratamientos (5 por cada dosis fraccionada de fertilizante) más 2 de amortiguamiento.



**Figura 5.** Aplicación de fertilizante microencapsulado, no microencapsulado y matriz de goma de mezquite al suelo.

El marco de plantación fue a doble hilera, en tresbolillo, con separación de 0.5 m entre planta y planta, y de 0.45 m entre hileras.

En campo, se establecieron 3 tratamientos de fertilización fraccionada: 50%, 75% y 100% de P, usando como dosis de referencia 224-60-360 kg ha<sup>-1</sup> de N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O;

Para la aplicación del fertilizante de P, se realizó una fertilización de fondo distribuida de la siguiente manera, 30% de la dosis total de P se aplicó en forma de microencapsulado

en la mitad de cada cama (figura 5) y 30% de la dosis total de P se aplicó con MAP a granel (ULTRASOL, 12-61-0) junto con la matriz de goma de mezquite en la otra mitad de la cama, ambos fertilizantes fueron mezclados manualmente con el estrato superior (entre 0 y 20 cm de profundidad) de suelo de cultivo. Es decir que 20%, 45% y 70%, respectivamente, de la aportación fertilizante de P fue dosificada a lo largo del ciclo de cultivo mediante fertirriego.

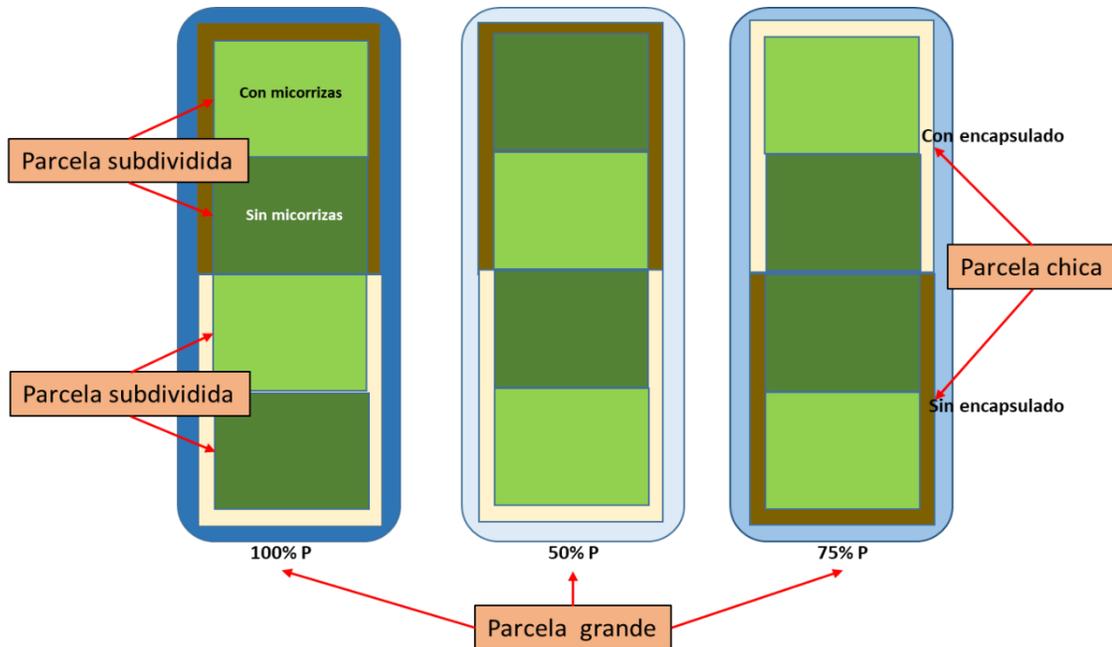
Para el fertirriego, inmediatamente después de la aplicación manual del fertilizante, se instalaron cintillas de riego con espaciamiento entre goteros de 0.30 m, con un gasto  $0.51 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ , a una presión en un rango de 8 a 12 psi se colocaron 2 líneas de riego por cada cama. Se colocó acolchado plástico blanco-negro, bajo malla sombra bicolor con un 25% de sombreo. Las cantidades de fertilizante utilizadas fueron proporcionadas de acuerdo a la fertilización en campo, ajustándolas de acuerdo a las necesidades de P para las diferentes etapas fenológicas, aproximadamente de 1.65 L por día por planta de solución nutritiva era aplicada vía fertirriego. Posteriormente, al momento de realizar el trasplante se aplicó una inoculación de refuerzo de 1 g por planta, solo para aquellas que estaban bajo este tratamiento.

Se instaló un sensor de temperatura (HOBO ext temp/RH logger para registrar la temperatura por hora diariamente durante todo el ciclo del cultivo.

### **V.2.1 Diseño experimental**

El experimento se estableció mediante un diseño de parcelas subdivididas con 3 tipos de fertilización fraccionada (parcela grande), dos tipos de fertilizante: microencapsulado y no microencapsulado (parcela chica) y la biofertilización (parcela subdividida). Así, se tuvieron 12 tratamientos con cinco repeticiones, los cuales fueron muestreados en tres ocasiones. La fertilización fraccionada fue considerada como parcela grande (tres niveles 50, 75 y 100% P), el tipo de fertilizante como parcela chica (2 niveles microencapsulado y no microencapsulado) y el biofertilizante como subparcela (HMA comercial y HMA nativo). El análisis de varianza (ANVA) y la comparación de medias (Tukey) se realizaron con el paquete estadístico Infostat versión 2020.

Los factores de variación mencionados se distribuyeron como se muestra en la figura 6. Como resultado, se obtuvieron 12 tratamientos, especificados en el Cuadro 2 los cuales se ejecutaron con 5 repeticiones distribuidas aleatoriamente.



**Figura 6.** Esquematización de la distribución de los tratamientos experimentales: Fraccionamiento de la fertilización de P (100, 75 y 50%, parcela grande), tipo de fertilizante (MAP microencapsulado o no microencapsulado, parcela chica), biofertilización (Inoculado con HMA y no inoculado, parcela subdividida). Esta disposición se hizo con 5 repeticiones distribuyendo aleatoriamente su ubicación en el terreno.

**Cuadro 2.** La descripción de los tratamientos representa la forma de fertilización: 50,75 y 100 los porcentajes de P; E, microencapsulado; G, a granel; M+, inoculado; M-, sin inóculo.

Tratamiento		Descripción
T1	50EM+	50% P Microencapsulado con inóculo
T2	50EM-	50% P Microencapsulado sin inóculo
T3	50GM+	50% P No Microencapsulado con inóculo
T4	50GM-	50% P No Microencapsulado sin inóculo
T5	75EM+	75% P Microencapsulado con inóculo
T6	75EM-	75% P Microencapsulado sin inóculo
T7	75GM+	75% P No Microencapsulado con inóculo
T8	75GM-	75% P No Microencapsulado sin inóculo
T9	100EM+	100% P Microencapsulado con inóculo
T10	100EM-	100% P Microencapsulado sin inóculo
T11	100GM+	100% P No Microencapsulado con inóculo
T12	100GM-	100% P No Microencapsulado sin inóculo

### V.3 Manejo del cultivo.

Durante todo el ciclo del cultivo se realizó monitoreo de plagas y enfermedades. Para la prevención y control se utilizaron los siguientes productos Imidacloprid (FMC), Cupertron (Arysta, Lifescience), Abamectina (Agroformuladora Delta) y Fluoxastrobin (Arysta, Lifescience).

Para guiar a las plantas en forma vertical se colocó un sistema de tutorado español, colocando varias estacas y rafia como línea de tutoreo a lo largo de cada cama, a partir de que la planta alcanzó una altura entre 20 a 30 cm, colocando línea de tutoreo conforme lo requería el cultivo.

### V.4 Determinaciones analíticas

Con el fin de evaluar el desarrollo de las plantas, se realizaron 3 muestreos destructivos (30, 60 y 90 días después del trasplante; ddt) de 1 planta por repetición, se midió la longitud del tallo de las plantas mediante una cinta métrica desde la base del tallo hasta el ápice más alto (predominantemente el principal), luego se separaron las hojas de cada planta para medir área foliar con un integrador de área foliar (LI-COR modelo LI-3100 A). Para la obtención de biomasa seca se guardaron hojas y tallo en bolsas de papel

estraza previamente etiquetada y se almacenaron en el cuarto de secado a una temperatura de 60°C, posteriormente se registró el peso medido en balanza granataria cuando se verificó que su peso en secado fue constante.

Asimismo, la tasa de transpiración, la conductancia estomática y la fijación de CO<sub>2</sub>, fueron monitoreadas con un Analizador Infra Rojo de Gases LI-6400XT (LICOR Inc. Lincoln, Nebraska, E.U.) a una intensidad constante de PAR a 1100  $\mu\text{mol fotones m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , con temperatura variable, humedad relativa variable y una concentración constante de CO<sub>2</sub> a 400 ppm. Para evaluar la eficiencia fotosintética y el estado fisiológico de las plantas se escogió una planta al azar en cada repetición, las mediciones se llevaron a cabo entre las 12:00 y 14:00 horas una muestra por tratamiento.

Para evaluar el rendimiento del cultivo se llevó a cabo la cosecha a partir de los 96 ddt y hasta el fin del cultivo, se colocaron recipientes previamente identificados en cada una de las subparcelas, y se pesaron de forma individual.

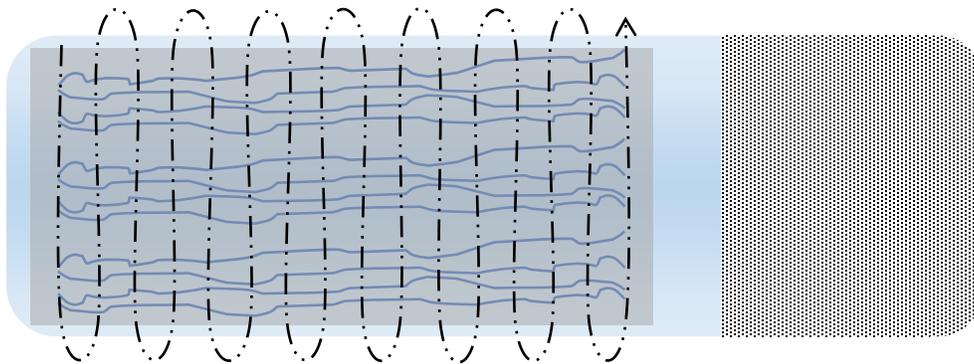
Para estimar el porcentaje de colonización por HMA se tomaron muestras de las raíces a los 30, 60 y 90 ddt. Éstas se lavaron con agua corriente y se almacenaron en una bolsa plástica con etanol al 50% y colocadas dentro de un cuarto frío a 4°C para conservarlas en buenas condiciones. La técnica utilizada de clarificación-tinción fue la propuesta por Herrera y Gutiérrez (2015).

Se lavaron las raíces con agua corriente y se colocaron en tubos de polipropileno de 50mL donde se les añadió una solución de KOH de concentración al 1 M, la suficiente para cubrir todas las raíces. Posteriormente se colocaron a baño maría durante 75 minutos a una temperatura de 60°C con el fin de degradar los pigmentos del tejido. Una vez terminado el proceso, se lavaron las raíces con agua corriente, se le agregó a cada tubo de ensayo HCl al 1% hasta cubrirlas y se dejaron reposar durante 5 minutos a temperatura ambiente, para después agregar el azul de tripano

La solución de tinción utilizada fue azul de tripano al 0.05% en HCl al 1%. Se agregó a cada tubo de ensayo 25 mL y se colocaron en baño maría durante 45 minutos a una temperatura de 60 °C. Una vez teñidas, se retiró la solución de tinción y se agregó glicerol

acidificado (50% de glicerol y 50% de HCl al 1%) para remover los excesos del colorante, se dejó reposar mínimo un día antes de montar las raíces.

Se tomaron de las muestras las raíces más delgadas y se montaron sobre un portaobjetos, distribuyéndolas en filas longitudinalmente (figura 7), basado en la técnica de McGonigle *et al.*, (1990). Una vez montadas, se les agregó 3 gotas de glicerol acidificado antes de colocar el cubreobjetos para mantenerlas humectadas. El portaobjetos se colocó en el microscopio y se hizo un recorrido visual de forma transversalmente, tal y como se indica en la figura 7.



**Figura 7.** Representación del montaje de raíces y de la dirección de observación en el microscopio, según el método de McGonigle *et al.* (1990). Se montan las raíces paralelamente al eje más largo del portaobjetos y las observaciones se hacen perpendicularmente a dicho eje (líneas punteadas).

Finalmente, se procedió a observar las muestras para hacer el conteo de arbusculos, vesículas e hifas, para lo cual se utilizó un microscopio (ZEISS AX IO), posicionando las laminillas y moviendo a través del revólver con el aumento de 10x de forma perpendicular. Cada portaobjeto contaba con 10 líneas de raíces teñidas de las cuales se obtuvieron 80 intersecciones; se montaron 2 portaobjetos por muestra, al final se realizó el cálculo de porcentaje de colonización total (C.H), arbuscular (C.A.) y vesicular (C.V) según McGonigle *et al.*(1990).

$$\% C.H = \frac{\text{No. intersecciones - negativos}}{\text{No. intersecciones}} * 100$$

$$\% C.A = \frac{\text{Arbusculos}}{\text{No. intersecciones}} * 100$$

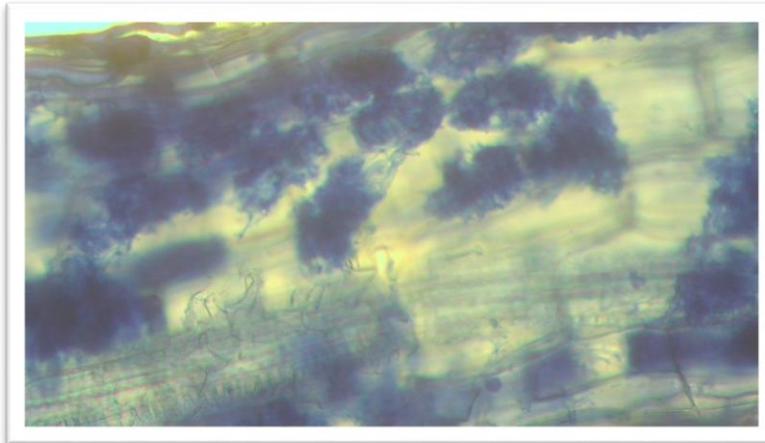
$$\% C.V = \frac{\text{Vesículas}}{\text{No. intersecciones}} * 100$$

Una vez que se obtuvo el porcentaje de colonización hifal, arbuscular y vesicular, se hicieron transformaciones de los resultados para obtener las proporciones de la colonización y así poder hacer el análisis estadístico.

$$\text{Arcoseno } \sqrt{\% C.H}$$

$$\text{Colonización transformada} = \text{Arcoseno } \sqrt{\% C.A}$$

$$\text{Arcoseno } \sqrt{\% C.V}$$



**Figura 8.** Colonización micorrícica (hifas y arbusculos) de raíces de tomate var. Floradade a 45 días después de trasplante.

## VI. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados de cada una de las variables medidas durante el experimento. En cada tabla tendremos la media de las variables, primero tendremos la media de cada fertilización, después las medias con interacción y por último las medias de los tratamientos completos. Se presenta la variable y su comparativo con los diferentes muestreos.

### VI.1.1 Medición de temperatura

Los registros diarios de las temperaturas dentro de la malla sombra, nos indican una temperatura máxima promedio por día de 34°C y una temperatura mínima promedio de 16.9°C, manteniendo una temperatura media promedio de 25.4°C, los registros diarios se pueden observar en la figura 9.

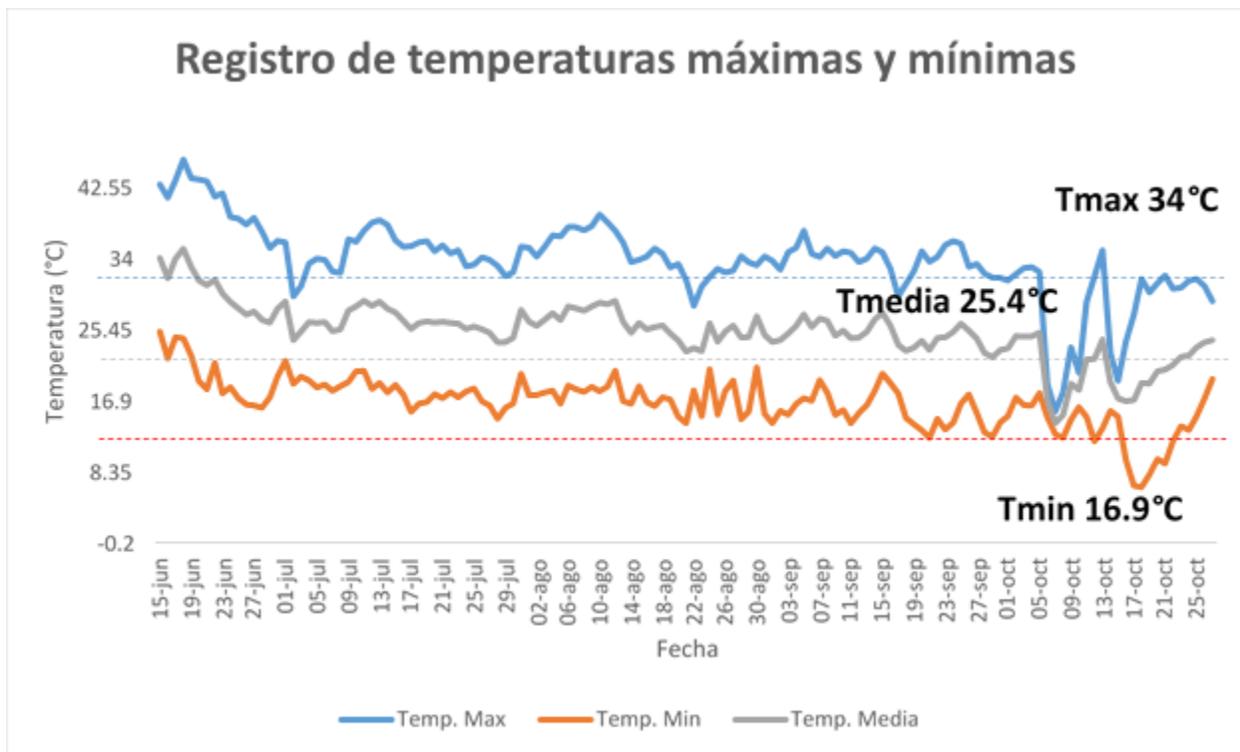


Figura 9. Registros diarios de la temperatura promedio máxima y mínima.

### VI.1.2 Longitud de tallo

En el Cuadro 3, se muestran los resultados de los análisis estadísticos realizados, para la fertilización fraccionada no hubo diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) entre la fertilización fraccionada de 50, 75 y 100% de P en el primer muestreo realizado a los 30 ddt, en cambio en el segundo muestreo (60 ddt) si hay diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) siendo la fertilización del 100% de P la de mayor crecimiento, pero en el tercer muestreo no se muestran diferencias ( $p > 0.05$ ) entre las diferentes dosis de fertilizante. En la fertilización microencapsulada y no microencapsulada no hubo diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) los resultados de los tres muestreos realizados fueron relativamente similares. En cuanto a la biofertilización en el primer muestreo realizado a los 30 ddt sí hubo diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) siendo las plantas sin inoculación las de mayor longitud, sin embargo, en el segundo y tercer muestreo no las hubo ( $p > 0.05$ ).

**Cuadro 3.** Longitud del tallo principal de plantas de tomate var. Floradade (30, 60 y 90 ddt) tratadas con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica.

Tratamientos <sup>§</sup>	Longitud del tallo (cm)		
	Muestreo		
	1ero	2do	3ero
<b>Fertilización fraccionada</b>			
50% P	65 a	143 ab	188 a
75% P	64 a	133 b	171 a
100% P	63 a	148 a	183 a
<b>Tipo de fertilizante</b>			
E	63 a	140 a	179 a
G	65 a	142 a	184 a
<b>Biofertilización</b>			
M+	63 b	142 a	180 a
M-	65 a	140 a	183 a

<sup>§</sup>La descripción de tratamientos representa los porcentajes de fertilización fraccionada con P (50, 75 y 100%) Fuente de MAP, E: Microencapsulado; G: Granel; Biofertilización: M+: Inoculado; M-: No inoculado. Medias de cada muestreo seguidas por letras diferentes difieren según la prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ )

En cuanto a la interacción de los tratamientos (Cuadro 4), en la fertilización fraccionada con el fertilizante microencapsulado y no microencapsulado, los resultados del primer muestreo (30 ddt) son estadísticamente similares ( $p > 0.05$ ), en cambio en el segundo muestreo (60 ddt) si hay diferencias estadísticas ( $p \leq 0.05$ ) siendo el de mayor crecimiento el del 100% de P con microencapsulado, y en el tercer muestreo (90 ddt) no se encontraron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ). Los tratamientos con y sin microencapsulado y con y sin inoculación, si mostraron diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) en el primer muestreo, siendo el de mayor longitud el que no tenía microencapsulado ni micorrizas, mientras que los del segundo y tercer muestreo son estadísticamente iguales ( $p > 0.05$ ). En cuanto a la fertilización fraccionada interactuando con el biofertilizante en el primer muestreo (30 ddt) se encontraron diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ), siendo el de mayor longitud el de 50% P sin inóculo.

**Cuadro 4.** Longitud del tallo principal de plantas de tomate var. Floradade (30, 60 y 90 ddt) interactuando las diferentes dosis de fertilización de P con diferente fuente de P

Tratamientos <sup>§</sup>	Longitud del tallo (cm)		
	Muestreo		
	1ero	2do	3ero
<b>Fertilización fraccionada con tipo de fertilizante</b>			
50E	64 a	139 ab	188 a
50G	67 a	146 ab	190 a
75E	64 a	132 b	159 a
75G	64 a	134 b	184 a
100E	62 a	149 a	190 a
100G	65 a	146 ab	177 a
<b>Tipo de fertilizante con biofertilizante</b>			
EM+	62 b	141 a	174 a
EM-	64 ab	140 a	183 a
GM+	64 ab	144 a	185 a
GM-	67 a	141 a	182 a
<b>Fertilización fraccionada con biofertilizante</b>			
50M+	63 ab	143 a	198 a
50M-	68 a	143 a	180 a
75M+	62 b	133 a	165 a
75M-	65 ab	134 a	178 a
100M+	63 ab	151 a	176 a
100M-	64 ab	145 a	191 a

<sup>§</sup>La descripción de tratamientos representa los porcentajes de fertilización fraccionada con P (50, 75 y 100%) Fuente de MAP, E: Microencapsulado; G: Granel; Biofertilización: M+: Inoculado; M-: No inoculado. Medias de cada muestreo seguidas por letras diferentes difieren según la prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ )

La interacción de los tres factores de fertilización (Cuadro 5), no muestran diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) en el primer y segundo muestreo, en cambio en el tercer muestreo si se muestran diferencias estadísticas ( $p \leq 0.05$ ), encontrándose el de mayor longitud los tratamientos de 50% de P con inóculo y 100% de P, microencapsulado sin inoculación.

**Cuadro 5.** Longitud del tallo principal de plantas de tomate var. Floradade (30, 60 y 90 ddt) interactuando las diferentes dosis de fertilización de P con diferente fuente de P

Tratamientos <sup>§</sup>	Longitud del tallo (cm)		
	Muestreo		
	1ero	2do	3ero
50EM+	62 a	142 a	200 a
50EM-	66 a	137 a	174 ab
50GM+	64 a	144 a	194 ab
50GM-	69 a	148 a	185 ab
75EM+	62 a	127 a	144 b
75EM-	65 a	138 a	174 ab
75GM+	63 a	139 a	187 ab
75GM-	65 a	130 a	181 ab
100EM+	63 a	153 a	178 ab
100EM-	61 a	145 a	200 a
100GM+	64 a	148 a	174 ab
100GM-	66 a	144 a	180 ab

§La descripción de tratamientos representa los porcentajes de fertilización fraccionada con P (50, 75 y 100%) Fuente de MAP, E: Microencapsulado; G: Granel; Biofertilización: M+: Inoculado; M-: No inoculado. Medias de cada muestreo seguidas por letras diferentes difieren según la prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

### VI.1.3 Área foliar

El análisis estadístico realizado a los muestreos de las diferentes dosis de fertilizante fraccionado (50, 75 y 100% de P) no mostró diferencias significativas ( $p > 0.05$ ); los resultados para el fertilizante microencapsulado y no microencapsulado son estadísticamente similares ( $p > 0.05$ ), en los tres muestreos realizados a las plantas con y sin inoculación no se encontraron diferencias estadísticas ( $p > 0.05$ ) (Cuadro 6).

**Cuadro 6.** Área foliar de plantas de tomate var. Floradade (30, 60 y 90 ddt) tratadas con diferentes fuentes de P; diferente dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica

Tratamientos <sup>§</sup>	Área foliar (cm <sup>2</sup> )		
	1ero	2do	3ero
<b>Fertilización fraccionada</b>			
50%	4557 a	21544 a	23168 a
75%	4266 a	17187 a	22653 a
100%	3861 a	20157 a	22378 a
<b>Tipo de fertilizante</b>			
E	4189 a	20212 a	22120 a
G	4268 a	19046 a	23346 a
<b>Biofertilización</b>			
M+	4112 a	20077 a	22450 a
M-	4345 a	19182 a	23016 a

<sup>§</sup>La descripción de tratamientos representa los porcentajes de fertilización fraccionada con P (50, 75 y 100%) Fuente de MAP, E: Microencapsulado; G: Granel; Biofertilización: M+: Inoculado; M-: No inoculado. Medias de cada muestreo seguidas por letras diferentes difieren según la prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

En el Cuadro 7 se muestran los resultados del análisis estadístico de los tres muestreos realizados a los 30, 60 y 90 ddt, se realiza el análisis a la interacción entre un fertilizante con otro. En la interacción de la fertilización fraccionada con el fertilizante microencapsulado y no, para el primer muestreo se encontraron que son estadísticamente diferentes ( $p \leq 0.05$ ), en donde la mayor área foliar se obtiene en los tratamientos de 50% de P con el fertilizante no microencapsulado, para el segundo y tercer muestreo no se encontraron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ). Con el fertilizante microencapsulado y no al interactuar con la fertilización con y sin inoculación, son estadísticamente similares ( $p > 0.05$ ). En la interacción de la fertilización fraccionada con la biofertilización para los tres muestreos no se encontraron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ).

**Cuadro 7.** Área foliar de plantas de tomate var. Floradade (30, 60 y 90 ddt) tratadas con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica

Tratamientos <sup>§</sup>	Área foliar (cm <sup>2</sup> )		
	Muestreo		
	1ero	2do	3ero
<b>Fertilización fraccionada con tipo de fertilizante</b>			
50E	4081 ab	22967 a	24252 a
50G	5033 a	20121 a	22085 a
75E	4447 ab	16171 a	21867 a
75G	4086 ab	18203 a	23438 a
100E	4038 ab	21499 a	20241 a
100G	3684 b	18814 a	24514 a
<b>Tipo de fertilizante con biofertilizante</b>			
EM+	3994 a	21427 a	20941 a
EM-	4383 a	18998 a	23299 a
GM+	4229 a	18727 a	23956 a
GM-	4306 a	19366 a	22733 a
<b>Fertilización fraccionada con biofertilizante</b>			
50M+	4325 a	22740 a	24909 a
50M-	4789 a	20347 a	21428 a
75M+	4278 a	16795 a	20283 a
75M-	4255 a	17579 a	25022 a
100M+	3732 a	20695 a	22158 a
100M-	3990 a	19619 a	22597 a

<sup>§</sup>La descripción de tratamientos representa los porcentajes de fertilización fraccionada con P (50, 75 y 100%) Fuente de MAP, E: Microencapsulado; G: Granel; Biofertilización: M+: Inoculado; M-: No inoculado. Medias de cada muestreo seguidas por letras diferentes difieren según la prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

La interacción de los tres tipos de fertilizante (Cuadro 8), en el análisis estadístico no mostraron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) en ninguno de los tres muestreos, lo cual indica que los tratamientos no tuvieron un impacto estadísticamente relevante.

**Cuadro 8.** Área foliar de plantas de tomate var. Floradade (30, 60 y 90 ddt), interactuando las diferentes dosis de fertilización de P, con diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica

Tratamientos <sup>§</sup>	Área foliar (cm <sup>2</sup> )		
	1 <sup>ero</sup>	2 <sup>do</sup>	3 <sup>ero</sup>
50EM <sup>+</sup>	3903 a	25746 a	25005 a
50EM <sup>-</sup>	4259 a	20187 a	23499 a
50GM <sup>+</sup>	4747 a	19735 a	24812 a
50GM <sup>-</sup>	5318 a	20506 a	19358 a
75EM <sup>+</sup>	4383 a	16613 a	20159 a
75EM <sup>-</sup>	4510 a	15730 a	23576 a
75GM <sup>+</sup>	4173 a	16978 a	20407 a
75GM <sup>-</sup>	4000 a	19429 a	26469 a
100EM <sup>+</sup>	3697 a	21923 a	17658 a
100EM <sup>-</sup>	4378 a	21076 a	22824 a
100GM <sup>+</sup>	3767 a	19467 a	27322 a
100GM <sup>-</sup>	3601 a	18162 a	22371 a

<sup>§</sup>La descripción de tratamientos representa los porcentajes de fertilización fraccionada con P (50, 75 y 100%) Fuente de MAP, E: Microencapsulado; G: Granel; Biofertilización: M<sup>+</sup>: Inoculado; M<sup>-</sup>: No inoculado. Medias de cada muestreo seguidas por letras diferentes difieren según la prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

#### VI.1.4 Biomasa seca

El análisis estadístico realizado para las mediciones de biomasa seca no muestra diferencias estadísticas ( $p > 0.05$ ) para aquellas plantas que estuvieron bajo tratamiento de fertilización fraccionada de 50, 75 y 100% de P en ninguno de los tres muestreos. Para los tratamientos bajo el fertilizante microencapsulado y no, se encontró que son estadísticamente similares ( $p > 0.05$ ). Se observa en el Cuadro 9 para aquellos bajo biofertilización, en el primer y segundo muestreo no arrojaron diferencias estadísticas ( $p > 0.05$ ), pero en el 3er muestreo tenemos unas medias con diferencia significativa entre aquellas con y sin inoculación, encontrándose un mayor valor en aquellas que no tenían el inóculo.

**Cuadro 9.** Biomasa seca de plantas de tomate var. Floradade (30, 60 y 90 ddt) tratadas con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica

Tratamientos <sup>§</sup>	Biomasa seca (g)		
	Muestreo		
	1ero	2do	3ero
<b>Fertilización fraccionada</b>			
50%	39 a	173 a	242 a
75%	37 a	167 a	271 a
100%	36 a	184 a	234 a
<b>Tipo de fertilizante</b>			
E	37 a	178 a	263 a
G	38 a	172 a	235 a
<b>Biofertilización</b>			
M+	36 a	177 a	224 b
M-	39 a	173 a	274 a

<sup>§</sup>La descripción de tratamientos representa los porcentajes de fertilización fraccionada con P (50, 75 y 100%) Fuente de MAP, E: Microencapsulado; G: Granel; Biofertilización: M+: Inoculado; M-: No inoculado. Medias de cada muestreo seguidas por letras diferentes difieren según la prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

En el Cuadro 10, se muestran los resultados de la comparación de medias obtenido en el análisis estadístico realizado a los tres muestreos realizados a los 30, 60 y 90 ddt, para la interacción de fertilización fraccionada con el microencapsulado y no, en el primer muestreo el análisis arrojó que son estadísticamente diferentes ( $p \leq 0.05$ ) siendo el de mayor valor de biomasa el tratamiento de 50% de P con el fertilizante aplicado a granel, sin embargo, en el segundo y en el tercer muestreo no se encontraron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ). En la interacción del fertilizante microencapsulado y no, con y sin inoculación, en el primer y segundo muestreo los resultados son similares estadísticamente ( $p > 0.05$ ), en el tercer muestreo si se muestran diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) siendo el de mayor biomasa el tratamiento microencapsulado sin inoculación. Para la fertilización fraccionada con y sin inoculación, en los tres muestreos realizados no se encontraron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ).

**Cuadro 10.** Biomasa seca de plantas de tomate var. Floradade (30, 60 y 90 ddt) interactuando con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica

Tratamientos <sup>§</sup>	Biomasa seca (g)		
	Muestreo		
	1ero	2do	3ero
<b>Fertilización fraccionada con tipo de fertilizante</b>			
50E	35 b	177 a	288 a
50G	44 a	170 a	196 a
75E	39 ab	165 a	274 a
75G	36 b	170 a	267 a
100E	37 b	191 a	226 a
100G	35 b	177 a	241 a
<b>Tipo de fertilizante con biofertilizante</b>			
EM+	35 a	182 a	234 ab
EM-	38 a	174 a	291 a
GM+	37 a	171 a	213 b
GM-	40 a	173 a	256 ab
<b>Fertilización fraccionada con biofertilizante</b>			
50M+	36 a	178 a	215 a
50M-	43 a	169 a	268 a
75M+	39 a	168 a	237 a
75M-	36 a	167 a	304 a
100M+	33 a	183 a	219 a
100M-	39 a	185 a	249 a

<sup>§</sup>La descripción de tratamientos representa los porcentajes de fertilización fraccionada con P (50, 75 y 100%) Fuente de MAP, E: Microencapsulado; G: Granel; Biofertilización: M+: Inoculado; M-: No inoculado. Medias de cada muestreo seguidas por letras diferentes difieren según la prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

En el Cuadro 11, observamos los resultados del análisis estadístico de la interacción de los tres factores de fertilización realizado a los tres muestreos, en los cuales no se muestran diferencias significativas ( $p > 0.05$ ).

**Cuadro 11.** Biomasa seca de plantas de tomate var. Floradade (30, 60 y 90 ddt) interactuando con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica.

Tratamientos <sup>§</sup>	Biomasa seca (g)		
	Muestreo		
	1ero	2do	3ero
50EM+	33 a	188 a	271 a
50EM-	37 a	166 a	305 a
50GM+	40 a	169 a	160 a
50GM-	49 a	171 a	232 a
75EM+	39 a	165 a	238 a
75EM-	39 a	166 a	311 a
75GM+	39 a	172 a	236 a
75GM-	33 a	168 a	198 a
100EM+	33 a	193 a	193 a
100EM-	40 a	190 a	259 a
100GM+	33 a	174 a	244 a
100GM-	38 a	180 a	239 a

§La descripción de tratamientos representa los porcentajes de fertilización fraccionada con P (50, 75 y 100%) Fuente de MAP, E: Microencapsulado; G: Granel; Biofertilización: M+: Inoculado; M-: No inoculado. Medias de cada muestreo seguidas por letras diferentes difieren según la prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

### VI.1.5 Tasa fotosintética

En las variables de intercambio gaseoso observamos que en la tasa fotosintética la actividad fue similar en todos los tratamientos, en el Cuadro 12, tenemos los resultados de las medias obtenidas de la medición de la tasa fotosintética durante los tres muestreos realizados a los 30, 60 y 90 ddt, los cuales arrojaron que para la fertilización fraccionada no hubo diferencias significativas ( $p > 0.05$ ). Para el fertilizante microencapsulado y no, el análisis estadístico mostró que son estadísticamente similares ( $p > 0.05$ ). Para aquellos en los que se aplicó la inoculación y no, no se encontraron diferencias estadísticas ( $p > 0.05$ ).

**Cuadro 12.** Tasa fotosintética de plantas de tomate var. Floradade (30, 60 y 90 ddt) tratadas con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica

Tratamientos <sup>§</sup>	Tasa fotosintética ( $\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )		
	Muestreo		
	1ero	2do	3ero
<b>Fertilización fraccionada</b>			
50%	26 a	19 a	14 a
75%	27 a	21 a	17 a
100%	27.1 a	18 a	17 a
<b>Tipo de fertilizante</b>			
E	26 a	19 a	16 a
G	27 a	19 a	16 a
<b>Biofertilización</b>			
M+	27 a	19 a	16 a
M-	26 a	16 a	16 a

<sup>§</sup>La descripción de tratamientos representa los porcentajes de fertilización fraccionada con P (50, 75 y 100%) Fuente de MAP, E: Microencapsulado; G: Granel; Biofertilización: M+: Inoculado; M-: No inoculado. Medias de cada muestreo seguidas por letras diferentes difieren según la prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

En la interacción de los fertilizantes (Cuadro 13), para la fertilización fraccionada con y sin microencapsulado, el primer y segundo muestreo el ANVA no arrojó diferencias estadísticas ( $p > 0.05$ ), en el tercer muestreo si se encontró que son estadísticamente diferentes ( $p \leq 0.05$ ), obteniendo un valor mayor en aquellos con el tratamiento de 100% de P sin microencapsulado. Para fertilizante microencapsulado y no en interacción con y sin inoculación, para los tres muestreos se encontró que son estadísticamente similares ( $p > 0.05$ ). En la fertilización fraccionada con y sin inoculación no se obtuvieron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) en ninguno de los tres muestreos realizados.

**Cuadro 13.** Tasa fotosintética de plantas de tomate var. Floradade (30, 60 y 90 ddt) interactuando con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica.

Tratamientos <sup>§</sup>	Tasa fotosintética ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )		
	Muestreo		
	1ero	2do	3ero
<b>Fertilización fraccionada con tipo de fertilizante</b>			
50E	25 a	17 a	16 ab
50G	26 a	20 a	12 b
75E	27 a	22 a	18 ab
75G	28 a	19 a	17 ab
100E	26 a	19 a	15 ab
100G	27 a	18 a	19 a
<b>Tipo de fertilizante con biofertilizante</b>			
EM+	26 a	18 a	16 a
EM-	26 a	20 a	16 a
GM+	27 a	21 a	17 a
GM-	27 a	18 a	15 a
<b>Fertilización fraccionada con biofertilizante</b>			
50M+	27 a	19 a	15 a
50M-	25 a	19 a	12 a
75M+	26 a	21 a	18 a
75M-	29 a	20 a	17 a
100M+	28 a	18 a	16 a
100M-	26 a	18 a	17 a

<sup>§</sup>La descripción de tratamientos representa los porcentajes de fertilización fraccionada con P (50, 75 y 100%) Fuente de MAP, E: Microencapsulado; G: Granel; Biofertilización: M+: Inoculado; M-: No inoculado. Medias de cada muestreo seguidas por letras diferentes difieren según la prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

En la interacción de los tres factores de fertilización (Cuadro 14); fertilización fraccionada, microencapsulado y no, con y sin inóculo, el análisis estadístico arrojó que son estadísticamente similares ( $p > 0.05$ ), en los tres muestreos realizados.

**Cuadro 14.** Tasa fotosintética de plantas de tomate var. Floradade (30, 60 y 90 ddt) interactuando con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica.

Tratamientos <sup>§</sup>	Tasa fotosintética ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )		
	Muestreo		
	1ero	2do	3ero
50EM+	26 a	16 a	18 a
50EM-	26 a	19 a	15 a
50GM+	29 a	22 a	14 a
50GM-	25 a	20 a	10 a
75EM+	27 a	22 a	18 a
75EM-	28 a	23 a	19 a
75GM+	26 a	22 a	18 a
75GM-	30 a	18 a	16 a
100EM+	28 a	18 a	14 a
100EM-	25 a	21 a	16 a
100GM+	28 a	20 a	18 a
100GM-	27 a	17 a	20 a

<sup>§</sup>La descripción de tratamientos representa los porcentajes de fertilización fraccionada con P (50, 75 y 100%) Fuente de MAP, E: Microencapsulado; G: Granel; Biofertilización: M+: Inoculado; M-: No inoculado. Medias de cada muestreo seguidas por letras diferentes difieren según la prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

#### VI.1.6. Conductancia estomática

Para la conductancia estomática (Cuadro 15) en la comparación de medias para la fertilización fraccionada en el análisis estadístico realizado a los tres muestreos, no se encontraron diferencias estadísticas ( $p > 0.05$ ). Para la fertilización con y sin microencapsulado, para los tres muestreos se encontró que son estadísticamente similares ( $p > 0.05$ ). Para aquellos en los que tenían y no inoculación, no se encontraron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ).

**Cuadro 15.** Conductancia estomática de plantas de tomate var. Floradade (30, 60 y 90 ddt) tratadas con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica.

Tratamientos <sup>§</sup>	Conductancia estomática (mol H <sub>2</sub> O m <sup>-2</sup> *s <sup>-1</sup> )		
	Muestreo		
	1ero	2do	3ero
<b>Fertilización fraccionada</b>			
50%	0.69 a	0.34 a	0.14 a
75%	0.69 a	0.39 a	0.16 a
100%	0.70 a	0.34 a	0.14 a
<b>Tipo de fertilizante</b>			
E	0.68 a	0.36 a	0.15 a
G	0.70 a	0.35 a	0.15 a
<b>Biofertilización</b>			
M+	0.71 a	0.35 a	0.17 a
M-	0.67 a	0.37 a	0.13 a

<sup>§</sup>La descripción de tratamientos representa los porcentajes de fertilización fraccionada con P (50, 75 y 100%) Fuente de MAP, E: Microencapsulado; G: Granel; Biofertilización: M+: Inoculado; M-: No inoculado. Medias de cada muestreo seguidas por letras diferentes difieren según la prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

En el Cuadro 16 se muestran los resultados del análisis estadístico cuando hay interacción de dos factores de fertilización, y se encontró que son similares estadísticamente ( $p > 0.05$ ) para fertilización fraccionada con fertilizante microencapsulado y no. En la interacción de fertilizante microencapsulado y no, con y sin inoculación no hubo diferencias significativas ( $p > 0.05$ ). En la fertilización fraccionada con el biofertilizante no se encontraron diferencias estadísticas ( $p > 0.05$ ).

**Cuadro 16.** Conductancia estomática de plantas de tomate var. Floradade (30, 60 y 90 ddt) interactuando con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica

Tratamientos <sup>§</sup>	Conductancia estomática (mol H <sub>2</sub> O m <sup>-2</sup> *s <sup>-1</sup> )		
	Muestreo		
	1ero	2do	3ero
<b>Fertilización fraccionada con tipo de fertilizante</b>			
50E	0.68 a	0.28 a	0.17 a
50G	0.70 a	0.40 a	0.12 a
75E	0.68 a	0.43 a	0.16 a
75G	0.70 a	0.35 a	0.16 a
100E	0.69 a	0.37 a	0.12 a
100G	0.71 a	0.31 a	0.18 a
<b>Tipo de fertilizante con biofertilizante</b>			
EM+	0.70 a	0.32 a	0.15 a
EM-	0.67 a	0.40 a	0.14 a
GM+	0.73 a	0.37 a	0.18 a
GM-	0.68 a	0.33 a	0.12 a
<b>Fertilización fraccionada con biofertilizante</b>			
50M+	0.72 a	0.32 a	0.16 a
50M-	0.65 a	0.35 a	0.13 a
75M+	0.70 a	0.39 a	0.19 a
75M-	0.69 a	0.39 a	0.13 a
100M+	0.72 a	0.33 a	0.16 a
100M-	0.68 a	0.36 a	0.14 a

<sup>§</sup>La descripción de tratamientos representa los porcentajes de fertilización fraccionada con P (50, 75 y 100%) Fuente de MAP, E: Microencapsulado; G: Granel; Biofertilización: M+: Inoculado; M-: No inoculado. Medias de cada muestreo seguidas por letras diferentes difieren según la prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

Para el caso de la interacción de los tres factores de fertilización el análisis estadístico de la conductancia estomática no muestra diferencias significativas, como se puede observar en el Cuadro 17.

**Cuadro 17.** Conductancia estomática de plantas de tomate var. Floradade (30, 60 y 90 ddt) interactuando con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica

Tratamientos <sup>§</sup>	Conductancia estomática (mol H <sub>2</sub> O m <sup>-2</sup> *s <sup>-1</sup> )		
	Muestreo		
	1ero	2do	3ero
50EM+	0.69 a	0.25 a	0.18 a
50EM-	0.66 a	0.3 a	0.14 a
50GM+	0.75 a	0.40 a	0.13 a
50GM-	0.65 a	0.40 a	0.10 a
75EM+	0.66 a	0.38 a	0.16 a
75EM-	0.71 a	0.48 a	0.15 a
75GM+	0.74 a	0.40 a	0.22 a
75GM-	0.67 a	0.30 a	0.10 a
100EM+	0.75 a	0.32 a	0.11 a
100EM-	0.63 a	0.42 a	0.11 a
100GM+	0.70 a	0.33 a	0.19 a
100GM-	0.72 a	0.29 a	0.15 a

<sup>§</sup>La descripción de tratamientos representa los porcentajes de fertilización fraccionada con P (50, 75 y 100%) Fuente de MAP, E: Microencapsulado; G: Granel; Biofertilización: M+: Inoculado; M-: No inoculado. Medias de cada muestreo seguidas por letras diferentes difieren según la prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

### VI.1.7 Tasa de transpiración

El análisis estadístico realizado a las mediciones de la tasa de transpiración (Cuadro 18), para la fertilización fraccionada en la primera medición se encontró que son estadísticamente similares ( $p > 0.05$ ), sin embargo, en el segundo muestreo se observan diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ), siendo la fertilización fraccionada de 75% la de mayor valor y en la tercera medición no se mostraron estadísticamente diferentes ( $p > 0.05$ ). Para la fertilización microencapsulada y no, en las tres mediciones no se mostraron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ). Para la fertilización con y sin inóculo se encontró que son estadísticamente similares ( $p > 0.05$ ).

**Cuadro 18.** Tasa de transpiración de plantas de tomate var. Floradade (30, 60 y 90 ddt) tratadas con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica

Tratamientos <sup>§</sup>	Tasa de transpiración (mmol H <sub>2</sub> O m <sup>-2</sup> *s <sup>-1</sup> )		
	Muestreo		
	1ero	2do	3ero
<b>Fertilización fraccionada</b>			
50%	14.7 a	9.2 b	2.3 a
75%	15.2 a	10.8 a	2.3 a
100%	14.9 a	9.0 b	2.1 a
<b>Tipo de fertilizante</b>			
E	14.7 a	9.6 a	2.3 a
G	15.2 a	9.7 a	2.1 a
<b>Biofertilización</b>			
M+	15.0 a	9.5 a	2.4 a
M-	14.9 a	9.9 a	2.0 a

<sup>§</sup>La descripción de tratamientos representa los porcentajes de fertilización fraccionada con P (50, 75 y 100%) Fuente de MAP, E: Microencapsulado; G: Granel; Biofertilización: M+: Inoculado; M-: No inoculado. Medias de cada muestreo seguidas por letras diferentes difieren según la prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

En el Cuadro 19, se observa la interacción entre dos factores de fertilización. Para fertilización fraccionada con y sin microencapsulado, no se observan diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) en ninguna de las tres mediciones. En la interacción del fertilizante con y sin microencapsulado con y sin inoculación, no se encontraron diferencias estadísticas ( $p > 0.05$ ). en cuanto a la interacción de fertilización fraccionada con y sin inoculación el ANVA mostró que son estadísticamente similares ( $p > 0.05$ ).

**Cuadro 19.** Tasa de transpiración de plantas de tomate var. Floradade (30, 60 y 90 ddt) interactuando con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica

Tratamientos	Tasa de transpiración (mmol H <sub>2</sub> O m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )		
	Muestreo		
	1ero	2do	3ero
<b>Fertilización fraccionada con tipo de fertilizante</b>			
50E	14.6 a	8.2 a	2.7 a
50G	14.8 a	10.3 a	1.9 a
75E	14.9 a	11.2 a	2.4 a
75G	15.5 a	10.4 a	2.2 a
100E	14.5 a	9.5 a	1.8 a
100G	15.3 a	8.4 a	2.4 a
<b>Tipo de fertilizante con biofertilizante</b>			
EM+	14.8 a	8.9 a	2.4 a
EM-	14.6 a	10.3 a	2.2 a
GM+	15.3 a	10.0 a	2.5 a
GM-	15.1 a	9.4 a	1.8 a
<b>Fertilización fraccionada con biofertilizante</b>			
50M+	14.8 a	9.0 a	2.5 a
50M-	14.6 a	9.5 a	2.0 a
75M+	15.1 a	10.8 a	2.5 a
75M-	15.3 a	10.8 a	2.0 a
100M+	15.2 a	8.6 a	2.2 a
100M-	14.6 a	9.3 a	2.0 a

§La descripción de tratamientos representa los porcentajes de fertilización fraccionada con P (50, 75 y 100%) Fuente de MAP, E: Microencapsulado; G: Granel; Biofertilización: M+: Inoculado; M-: No inoculado. Medias de cada muestreo seguidas por letras diferentes difieren según la prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

En el Cuadro 20 se muestran los resultados de los análisis estadísticos de la interacción entre los tres factores de estudio, en los cuales no se encontraron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) en ninguna de las tres mediciones realizadas.

**Cuadro 20.** Tasa de transpiración de plantas de tomate var. Floradade (30, 60 y 90 ddt) interactuando con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica

Tratamientos	Tasa de transpiración (mmol H <sub>2</sub> O m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )		
	Muestreo		
	1ero	2do	3ero
50EM+	14.4 a	7.6 a	3.0 a
50EM-	14.9 a	8.7 a	2.4 a
50GM+	15.2 a	10.3 a	2.1 a
50GM-	14.4 a	10.3 a	1.7 a
75EM+	14.6 a	10.4 a	2.4 a
75EM-	15.2 a	12.0 a	2.3 a
75GM+	15.5 a	11.2 a	2.7 a
75GM-	15.5 a	10.3 a	1.7 a
100EM+	15.3 a	8.8 a	1.7 a
100EM-	13.7 a	10.3 a	1.8 a
100GM+	15.1 a	8.5 a	2.8 a
100GM-	15.5 a	8.4 a	2.1 a

§La descripción de tratamientos representa los porcentajes de fertilización fraccionada con P (50, 75 y 100%) Fuente de MAP, E: Microencapsulado; G: Granel; Biofertilización: M+: Inoculado; M: No inoculado. Medias de cada muestreo seguidas por letras diferentes difieren según la prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

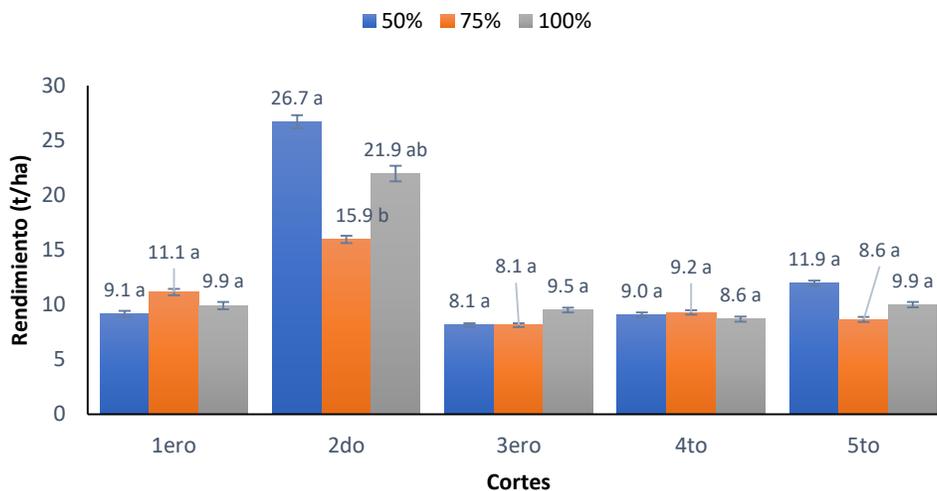
### VI.1.8 Rendimiento del cultivo

Los análisis estadísticos muestran que no hubo diferencias significativas ( $p > 0.05$ ), en la fertilización fraccionada (50, 75 y 100% de P) para el rendimiento del cultivo en la primera semana, pero, mostrándose una diferencia significativa ( $p \leq 0.05$ ) durante la segunda semana, siendo que la dosis de 50% de P fue la que mayor rendimiento tuvo, mientras que la del 75% de P fue mucho menor ( $p > 0.05$ ) (figura 10).

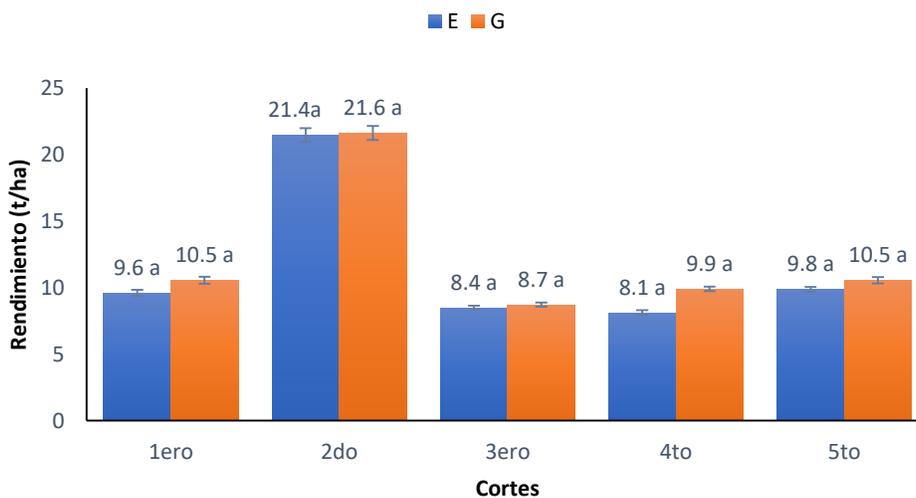
En la figura 11, tenemos la gráfica que nos muestra los resultados del análisis estadístico para el fertilizante microencapsulado y a granel, donde no se observan diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) en ninguna de las semanas que se recolectó el fruto.

Para el rendimiento de la fertilización con y sin el hongo *R. irregularis*, durante la primera semana no se observan diferencias significativas ( $p > 0.05$ ), pero durante la segunda semana se muestra diferencia ( $p \leq 0.05$ ), obteniéndose mayor rendimiento en aquellas

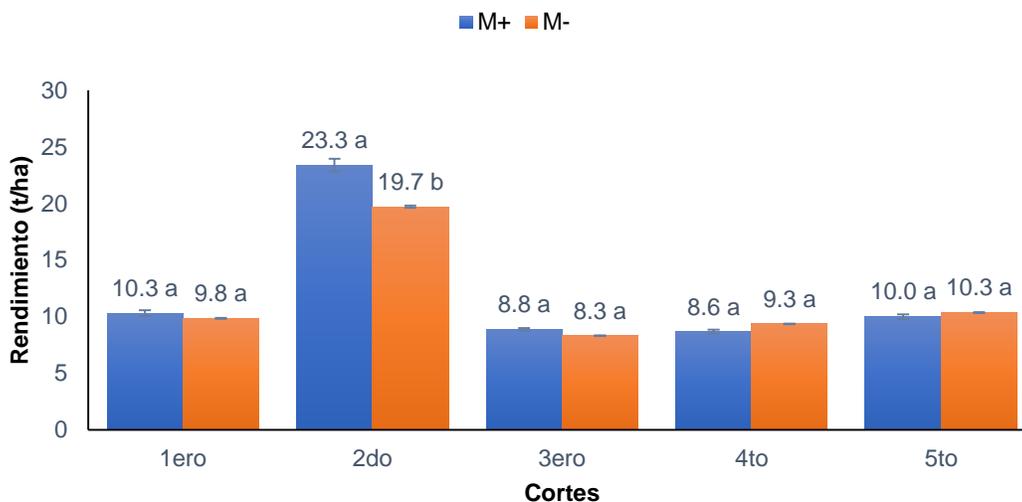
plantas que tenían el inóculo, durante la 3era, 4ta y 5ta semana, el rendimiento fue relativamente similar, no mostrándose diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) (figura 12).



**Figura 10.** Rendimiento de plantas de tomate var. Floradade tratadas con diferentes dosis de fertilización de P (50, 75 y 100%), recolectado durante 5 semanas. Letras diferentes representan diferencias estadísticas significativas según la prueba Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

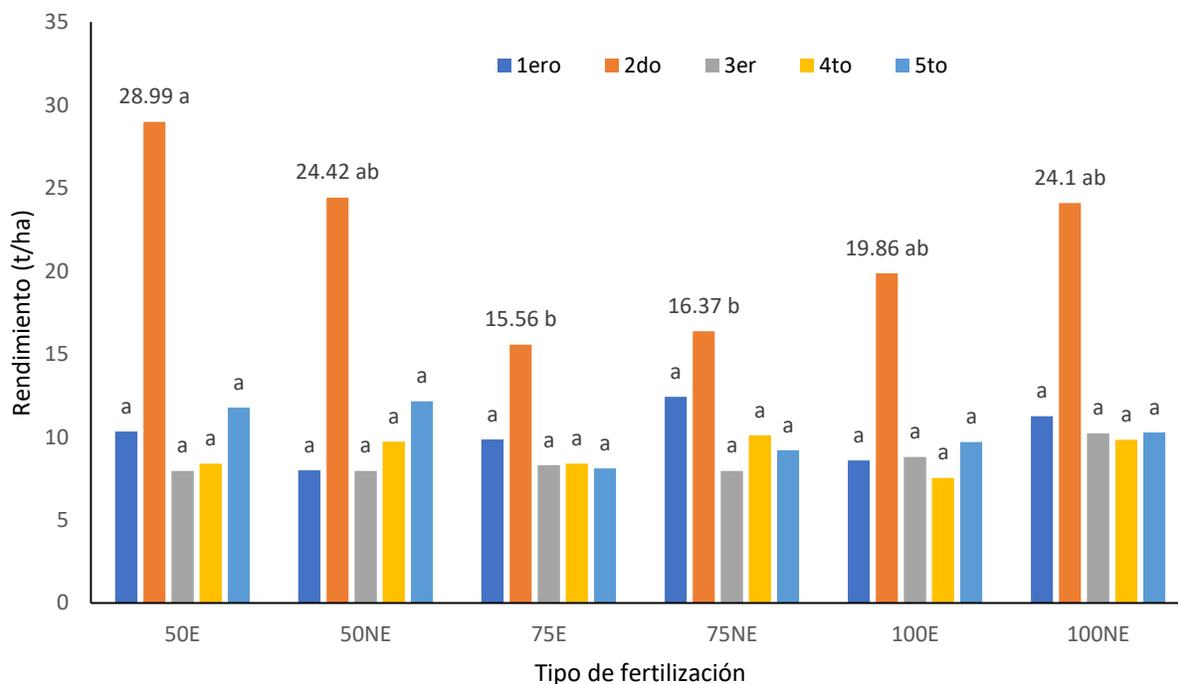


**Figura 11.** Rendimiento de plantas de tomate var. Floradade, tratadas con fertilizante fosfato monoamónico microencapsulado (E) y a granel (G), recolectado durante 5 semanas. Letras diferentes representan diferencias estadísticas significativas según la prueba Tukey ( $\alpha=0.05$ ).



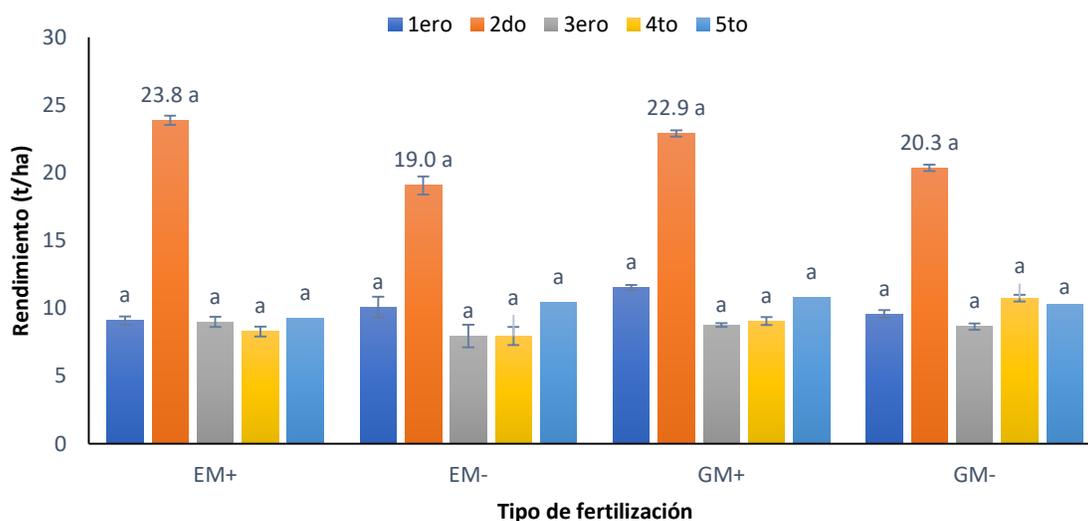
**Figura 12.** Rendimiento de plantas de tomate var. Floradade inoculadas con el hongo *R. irregularis*. Letras diferentes representan diferencias estadísticas significativas según la prueba Tukey ( $\alpha=0.05$ )

En lo que corresponde a la interacción de los diferentes tipos de fertilizante, la fertilización fraccionada con y sin microencapsulado, en la primera cosecha no se encontraron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ), mientras que en la segunda cosecha se encontraron diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) siendo el tratamiento de 50% de P con el fertilizante microencapsulado, el que obtuvo el mayor rendimiento y para aquellos con 75% de P y fertilizante a granel el de menor rendimiento. Para la 3er, 4ta y 5ta recolección de fruto, no se obtuvieron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) (figura 13)



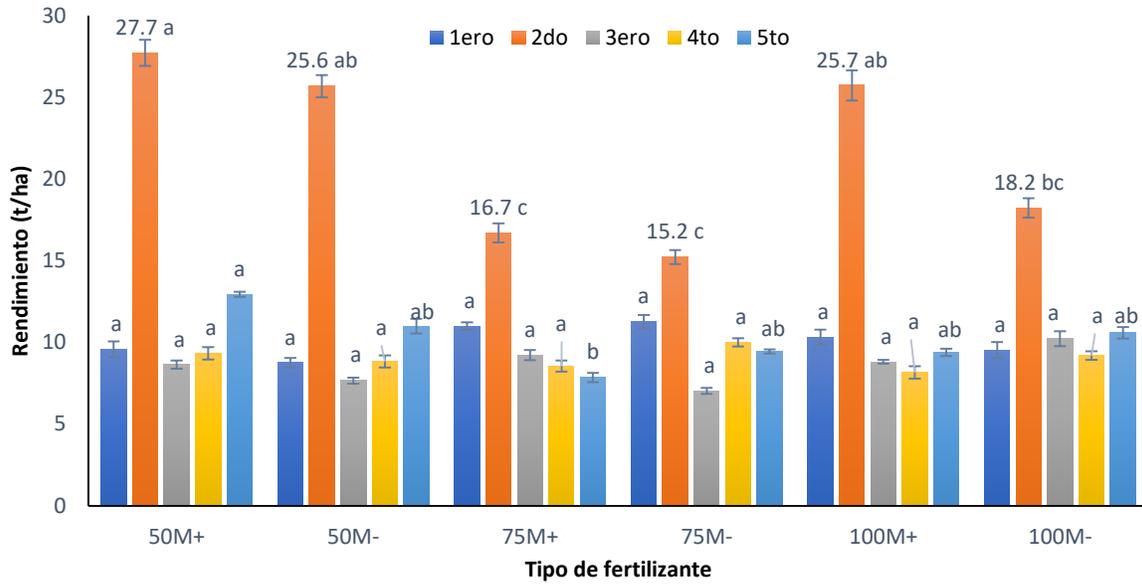
**Figura 13.** Rendimiento de plantas de tomate var. Floradade al interactuar el fertilizante fraccionado (50, 75 y 100% de P), con fertilizante microencapsulado y a granel. Comparación entre tratamientos dentro de la misma cosecha. Letras diferentes representan diferencias estadísticas significativas según la prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

El análisis estadístico para la interacción del fertilizante microencapsulado y no, con y sin inoculación, se realizaron análisis estadísticos para el rendimiento durante las 5 semanas (figura 14), los cuales no mostraron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ).



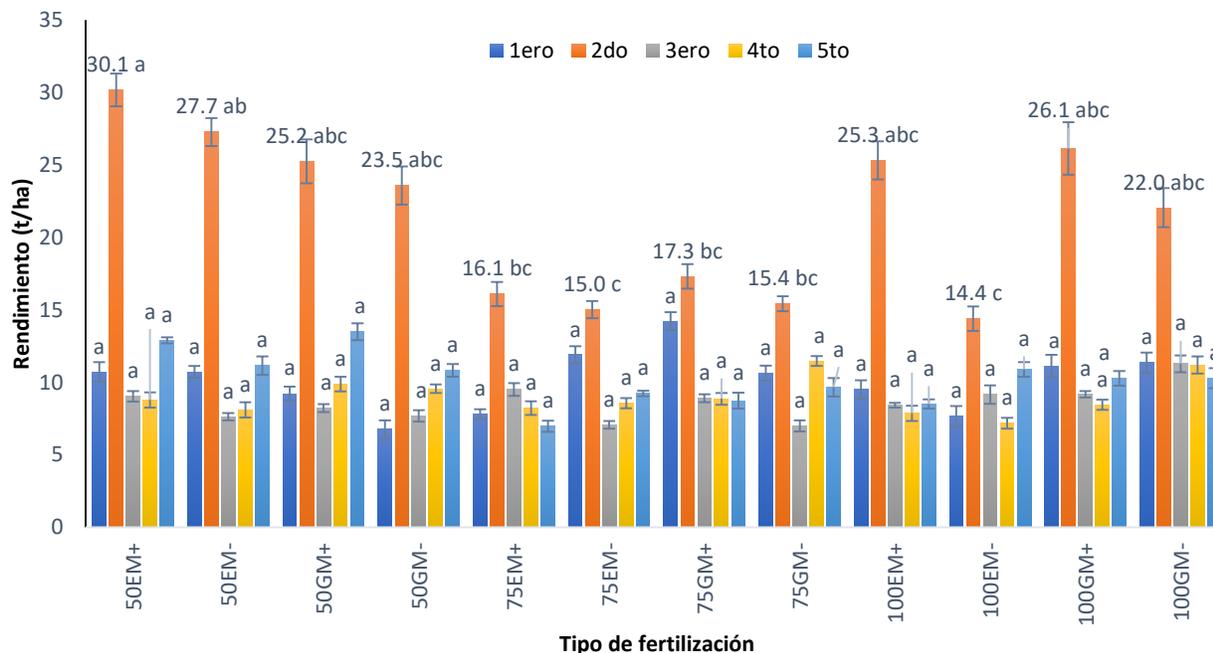
**Figura 14.** Rendimiento de plantas de tomate var. Floradade al interactuar el fertilizante microencapsulado y a granel con el biofertilizante. Comparación entre tratamientos dentro de la misma cosecha. Letras diferentes representan diferencias estadísticas significativas según la prueba Tukey ( $\alpha=0.05$ )

La interacción de la fertilización fraccionada (50, 75 y 100% de P) con y sin inoculación, durante la primera cosecha no se muestran diferencias significativas ( $p > 0.05$ ), en la segunda cosecha se muestran diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) siendo el mayor rendimiento el tratamiento de 50% de P con micorrizas y el de menor rendimiento aquellos con 75% de P sin micorrizas. En la tercer y cuarta cosecha el rendimiento no arrojo diferencias estadísticas ( $p > 0.05$ ), sin embargo, en la quinta cosecha fueron diferentes estadísticamente ( $p \leq 0.05$ ) mostrando un mayor rendimiento el tratamiento de 50% de P con inoculación (figura 15).



**Figura 15.** Rendimiento de plantas de tomate var. Floradade al interactuar fertilización fraccionada con diferente biofertilización micorrícica. Comparación entre tratamientos dentro de la misma cosecha. Letras diferentes representan diferencias estadísticas significativas según la prueba Tukey ( $\alpha=0.05$ )

En lo que corresponde a la interacción de los tres factores de fertilización; fertilización fraccionada (50, 75 y 100% P), fertilizante microencapsulado y a granel, y diferente biofertilización con y sin inóculo (figura 16), no se encontraron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) para la primera recolección de fruto, para la segunda cosecha si se encontraron diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) siendo el tratamiento de 50% P, microencapsulado con inoculación el de mayor rendimiento. Para los análisis estadísticos de la tercera, cuarta y quinta cosecha no se encontraron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ).

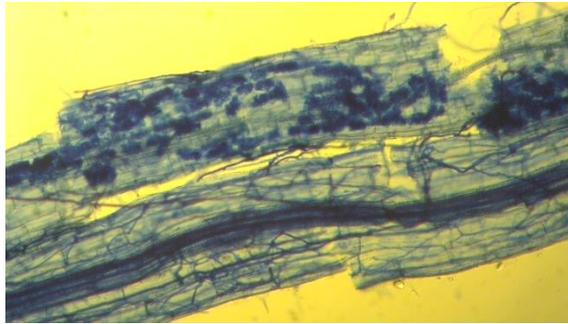


**Figura 16.** Rendimiento de plantas de tomate var. Floradade interactuando con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica. Comparación entre tratamientos dentro de la misma cosecha. Letras diferentes representan diferencias estadísticas significativas según la prueba Tukey ( $\alpha=0.05$ )

### VI.1.9. Estimación de la colonización micorrícica

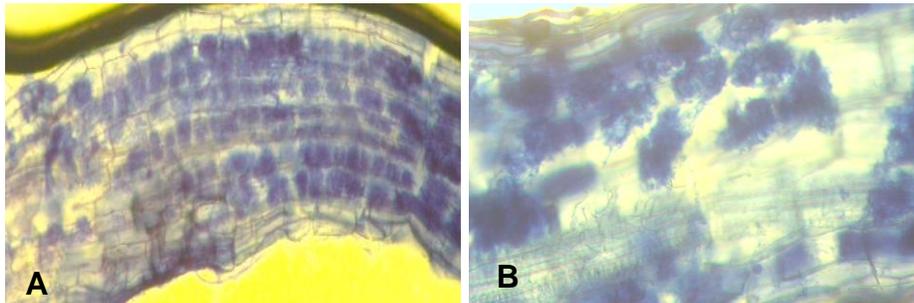
El porcentaje de colonización micorrícica nos proporciona información sobre la efectividad de la simbiosis en la planta. No se puede especificar si la relación planta-hongo sea con el inóculo aplicado *R. irregularis*, debido a que en el suelo se encuentran hongos nativos los cuales pudieron hacer simbiosis también con la raíz de la planta, ya que cualquier especie de HMA puede colonizar y formar simbiosis.

En las raíces de nuestras plantas de tomate fueron encontradas diversas estructuras colonizantes predominando hifas y arbuscúlos y se encontró menor presencia de vesículas. En la figura 17, tenemos el segmento de una raíz la cual, si recibió inoculación por *R. irregularis*, donde observamos que también están formados arbuscúlos e hifas.



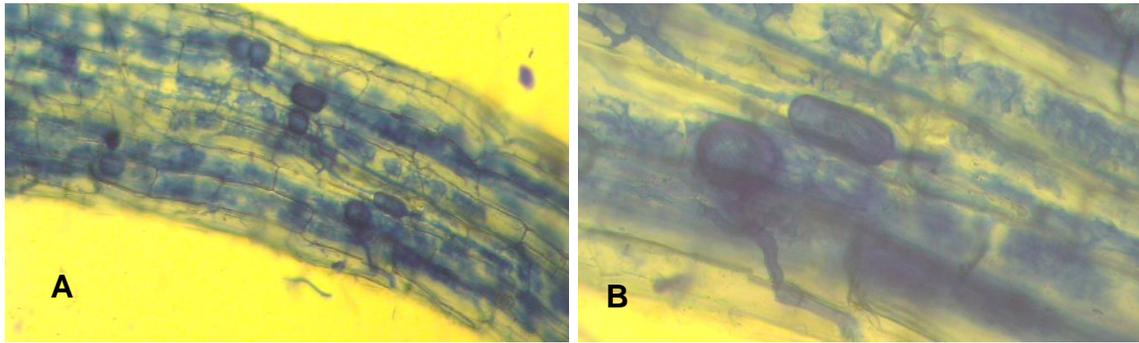
**Figura 17.** Arbúsculos e hifas de hongos micorrícicos arbusculares en raíces de tomate recolectadas en el tercer muestreo, tratamiento con fertilizante a granel inoculadas con *R. irregularis*. Tomadas a microscopio objetivo 10x.

En la figura 18 observamos la imagen de un segmento de raíz la cual no fue inoculada por *R. irregularis*, sin embargo, los hongos nativos del suelo lograron realizar la simbiosis con la raíz de la planta de tomate, en la figura 18b, se observan los arbúsculos formados en las células corticales.



**Figura 178.** Micrografías de secciones de raíz de tomate var. Florada recolectadas 90 ddt, teñidas con azul de tripano. Las plantas pertenecían al tratamiento MAP encapsulado sin inoculación de HMA.

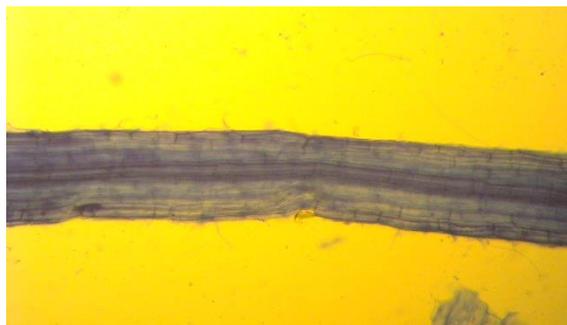
En la figura 19, tenemos una muestra de la raíz, obteniendo dos micrografías, una con el objetivo 10x y otra con 40x, donde podemos observar más claramente las vesículas



**Figura 18.** Micrografías de hongos micorrícicos arbusculares (*R. irregularis*) en raíces de tomate recolectadas en el tercer muestreo, de fertilizante a granel con inoculación. Tomadas a microscopio. A) Objetivo 10x. B) Objetivo 40x. 1: Arbusculos; 2: Vesículas; 3: Hifas.

y arbusculos formadas, cabe señalar que las muestras en las que se obtuvo un mayor porcentaje hifal (14.20% a los 60 ddt) fueron aquellas muestras en las que se tenía aplicado el inóculo en comparación con aquellas plantas que no recibieron el inóculo (8.11% a los 60 ddt).

En la figura 20, podemos observar el segmento de una raíz la cual no recibió inoculación y a diferencia de la imagen presentada en la figura 16 en esta no se formaron arbusculos con el hongo nativo.



**Figura 190.** Micrografías en raíces de tomate recolectadas en el tercer muestreo, donde se observa la raíz no colonizada por el hongo arbuscular (*R. irregularis*). Tomadas a microscopio. A) Objetivo 10x.

### VI.1.9.1 Primer muestreo

Se recolectaron las raíces de los diferentes tratamientos y se hizo el conteo de hifas (H), arbusculos (A) y vesículas (V), para la fertilización fraccionada no se encontraron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) (Cuadro 21), para la fertilización encapsulada y no, se encontró que son estadísticamente similares ( $p > 0.05$ ), para la biofertilización micorrícica no se encontraron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) en porcentaje hifal, ni arbuscular ni vesicular.

**Cuadro 21.** Porcentaje de colonización micorrícica de plantas de tomate var. Floradade a los 30 ddt tratadas con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica

Tratamientos	Colonización		
	H(%)	A(%)	V(%)
<b>Fertilización fraccionada</b>			
50% P	4.83 a	2.21 a	0 a
75% P	5.26 a	2.11 a	0 a
100% P	4.96 a	1.91 a	0 a
<b>Tipo de fertilizante</b>			
E	2.67 a	1.08 a	0 a
G	7.36 a	3.07 a	0 a
<b>Biofertilización</b>			
M <sup>+</sup>	6.21 a	2.31 a	0 a
M <sup>-</sup>	3.82 a	1.85 a	0 a

§La descripción de tratamientos representa los porcentajes de fertilización fraccionada con P (50, 75 y 100%) Fuente de MAP, E: Microencapsulado; G: Granel; Biofertilización: M<sup>+</sup>: Inoculado; M<sup>-</sup>: No inoculado y las estructuras del hongo en porcentaje (H: colonización hifal; A: colonización arbuscular; V: colonización vesicular). Medias de cada muestreo seguidas por letras diferentes difieren según la prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

El análisis estadístico realizado a la interacción entre la fertilización fraccionada (50, 75 y 100% de P) con el encapsulado y el fertilizante a granel, no muestra diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) para la estimación de colonización de hifas, arbusculos y vesículas (Cuadro 22). En cuanto a la interacción de fertilizante microencapsulado y no con y sin inóculo, no se muestran diferencias estadísticas ( $p > 0.05$ ). En cuanto a la fertilización fraccionada (50, 75 y 100% de P) con el biofertilizante micorrícico no se encontraron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) en hifas, arbusculos y vesículas.

**Cuadro 22.** Porcentaje de colonización micorrícica de plantas de tomate var. Floradade (30 ddt) interactuando con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica

Tratamientos	Colonización		
	Primer muestreo		
	H(%)	A(%)	V(%)
<b>Fertilización fraccionada con tipo de fertilizante</b>			
50E	2.08 a	1.04 a	0 a
50G	7.59 a	3.39 a	0 a
75E	2.06 a	0.85 a	0 a
75G	8.46 a	3.37 a	0 a
100E	3.89 a	1.35 a	0 a
100G	6.03 a	2.47 a	0 a
<b>Tipo de fertilizante con biofertilizante</b>			
EM <sup>+</sup>	3.14 a	1.23 a	0 a
EM <sup>-</sup>	2.21 a	0.93 a	0 a
GM <sup>+</sup>	9.29 a	3.38 a	0 a
GM <sup>-</sup>	5.43 a	2.77 a	0 a
<b>Fertilización fraccionada con biofertilizante</b>			
50M <sup>+</sup>	8.73 a	3.49 a	0 a
50M <sup>-</sup>	0.94 a	0.94 a	0 a
75M <sup>+</sup>	6.60 a	2.51 a	0 a
75M <sup>-</sup>	3.92 a	1.71 a	0 a
100M <sup>+</sup>	3.31 a	0.92 a	0 a
100M <sup>-</sup>	6.60 a	2.89 a	0 a

<sup>§</sup>La descripción de tratamientos representa los porcentajes de fertilización fraccionada con P (50, 75 y 100%) Fuente de MAP, E: Microencapsulado; G: Granel; Biofertilización: M<sup>+</sup>: Inoculado; M<sup>-</sup>: No inoculado y las estructuras del hongo en porcentaje (H: colonización hifal; A: colonización arbuscular; V: colonización vesicular). Medias de cada muestreo seguidas por letras diferentes difieren según la prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

La interacción de los tres factores de fertilizantes (Cuadro 23) no se encontraron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ), en ningún porcentaje de colonización.

**Cuadro 23.** Porcentaje de colonización micorrícica de plantas de tomate var. Floradade (30 ddt) interactuando con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica

Tratamientos	Colonización		
	Primer muestreo		
	H(%)	A(%)	V(%)
50EM <sup>+</sup>	4.16 a	2.08 a	0 a
50EM <sup>-</sup>	0 a	0 a	0 a
50GM <sup>+</sup>	13.29 a	3.44 a	0 a
50GM <sup>-</sup>	1.88 a	1.88 a	0 a
75EM <sup>+</sup>	1.29 a	0.43 a	0 a
75EM <sup>-</sup>	2.82 a	1.28 a	0 a
75GM <sup>+</sup>	11.90 a	4.59 a	0 a
75GM <sup>-</sup>	5.01 a	2.15 a	0 a
100EM <sup>+</sup>	3.96 a	1.19 a	0 a
100EM <sup>-</sup>	3.81 a	1.52 a	0 a
100GM <sup>+</sup>	2.66 a	0.66 a	0 a
100GM <sup>-</sup>	9.40 a	4.27 a	0 a

§La descripción de tratamientos representa los porcentajes de fertilización fraccionada con P (50, 75 y 100%) Fuente de MAP, E: Microencapsulado; G: Granel; Biofertilización: M<sup>+</sup>: Inoculado; M<sup>-</sup>: No inoculado y las estructuras del hongo en porcentaje (H: colonización hifal; A: colonización arbuscular; V: colonización vesicular). Medias de cada muestreo seguidas por letras diferentes difieren según la prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

### VI.1.9.2 Segundo muestreo

El análisis estadístico realizado a las muestras recolectadas a los 60 ddt, para la fertilización fraccionada de 50, 75 y 100% de P, tanto para porcentaje hifal, arbuscular y vesicular no se muestran diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) (Cuadro 24). Para la fertilización con y sin microencapsulado no se observan diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) en el porcentaje hifal y arbuscular, pero en el porcentaje vesicular se encontró que son estadísticamente diferentes ( $p \leq 0.05$ ). Para biofertilización micorrícica para porcentaje hifal, se observó diferencias estadísticas ( $p \leq 0.05$ ) siendo la de mayor porcentaje las que tenían el inóculo, pero en el porcentaje vesicular y arbuscular no se observan diferencias significativas ( $p > 0.05$ ).

**Cuadro 24.** Porcentaje de colonización micorrícica de plantas de tomate var. Floradade a los 60 ddt tratadas con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica

Tratamientos	Colonización		
	Segundo muestreo		
	H(%)	A(%)	V(%)
<b>Fertilización fraccionada</b>			
50% P	3.76 a	1.09 a	0.10 a
75% P	14.97 a	6.07 a	0.47 a
100% P	14.74 a	5.08 a	0.57 a
<b>Tipo de fertilizante</b>			
	11.67 a	3.99 a	0.77 a
	10.67 a	4.17a	0 b
<b>Biofertilización</b>			
M <sup>+</sup>	14.20 a	5.16 a	0.20 a
M <sup>-</sup>	8.11 b	2.99 a	0.56 a

§La descripción de tratamientos representa los porcentajes de fertilización fraccionada con P (50, 75 y 100%) Fuente de MAP, E: Microencapsulado; G: Granel; Biofertilización: M<sup>+</sup>: Inoculado; M<sup>-</sup>: No inoculado y las estructuras del hongo en porcentaje (H: colonización hifal; A: colonización arbuscular; V: colonización vesicular). Medias de cada muestreo seguidas por letras diferentes difieren según la prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

En cuanto a la interacción de fertilizantes (Cuadro 25), en la interacción entre la fertilización fraccionada y la fertilización con y sin microencapsulado, no se encontraron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ). En la interacción entre el fertilizante con y sin microencapsulado con el biofertilizante, en la colonización de micorrizas, si se encontraron diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) en cuanto al porcentaje hifal y arbuscular, siendo el de mayor porcentaje aquellas que recibieron la fertilización a granel con la inoculación, sin embargo, para el porcentaje vesicular el de mayor porcentaje fue el de encapsulado sin inóculo. En la interacción de la fertilización fraccionada (50, 75 y 100% de P) con la biofertilización con y sin inóculo, se encontraron diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) siendo el de mayor colonización hifal y arbuscular el tratamiento de 75% de P con inóculo sobre el de 50% de P sin inóculo.

**Cuadro 25.** Porcentaje de colonización micorrícica de plantas de tomate var. Floradade (60 ddt) interactuando con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica

Tratamientos	Colonización		
	Segundo muestreo		
	H(%)	A(%)	V(%)
<b>Fertilizacion fraccionada con tipo de fertilizante</b>			
50E	1.65 a	0.32 a	0.21 a
50G	5.87 a	1.86 a	0 a
75E	16.80 a	6.25 a	0.95 a
75G	13.13 a	5.88 a	0 a
100E	16.55 a	5.39 a	1.14 a
100G	12.92 a	4.77 a	0 a
<b>Tipo de fertilizante con biofertilizante</b>			
EM <sup>+</sup>	9.95 ab	3.11 ab	0.41 ab
EM <sup>-</sup>	13.39 ab	4.86 ab	1.12 a
GM <sup>+</sup>	18.45 a	7.22 a	0 ab
GM <sup>-</sup>	2.84 b	1.12 b	0 b
<b>Fertilizacion fraccionada con biofertilizante</b>			
50M <sup>+</sup>	7.25 ab	2.18 ab	0.21 a
50M <sup>-</sup>	0.27 b	0 a	0 a
75M <sup>+</sup>	21.65 a	9.29 a	0.30 a
75M <sup>-</sup>	8.28 ab	2.84 ab	0.64 a
100M <sup>+</sup>	13.68 ab	4.03 ab	0.10 a
100M <sup>-</sup>	15.79 ab	6.13 ab	1.03 a

§La descripción de tratamientos representa los porcentajes de fertilización fraccionada con P (50, 75 y 100%) Fuente de MAP, E: Microencapsulado; G: Granel; Biofertilización: M<sup>+</sup>: Inoculado; M<sup>-</sup>: No inoculado y las estructuras del hongo en porcentaje (H: colonización hifal; A: colonización arbuscular; V: colonización vesicular). Medias de cada muestreo seguidas por letras diferentes difieren según la prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

Para la interacción de los tres factores de fertilización (Cuadro 26), para la colonización de hifas, arbusculos y vesículas, no se encontraron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ).

**Cuadro 26.** Porcentaje de colonización micorrícica de plantas de tomate var. Floradade (60 ddt) interactuando con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica

Tratamientos	Colonización		
	Segundo muestreo		
	H(%)	A(%)	V(%)
50EM <sup>+</sup>	2.76 a	0.638 a	0.42 a
50EM <sup>-</sup>	0.54 a	0 a	0 a
50GM <sup>+</sup>	11.75 a	3.72 a	0 a
50GM <sup>-</sup>	0 a	0 a	0 a
75EM <sup>+</sup>	17.04 a	6.82 a	0.61 a
75EM <sup>-</sup>	16.56 a	5.69 a	1.29 a
75GM <sup>+</sup>	26.27 a	11.76 a	0 a
75GM <sup>-</sup>	0 a	0 a	0 a
100EM <sup>+</sup>	10.05 a	1.87 a	0.21 a
100EM <sup>-</sup>	23.05 a	8.90 a	2.08 a
100GM <sup>+</sup>	17.32 a	6.18 a	0 a
100GM <sup>-</sup>	8.52 a	3.36 a	0 a

§La descripción de tratamientos representa los porcentajes de fertilización fraccionada con P (50, 75 y 100%) Fuente de MAP, E: Microencapsulado; G: Granel; Biofertilización: M<sup>+</sup>: Inoculado; M<sup>-</sup>: No inoculado y las estructuras del hongo en porcentaje (H: colonización hifal; A: colonización arbuscular; V: colonización vesicular). Medias de cada muestreo seguidas por letras diferentes difieren según la prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

### VI.1.9.3 Tercer muestreo

A los 90 ddt se realizó el 3er muestreo, a cuyas muestras también se les realizó el análisis estadístico, teniendo que para la fertilización fraccionada (50, 75 y 100% de P) (Cuadro 27), no se encontraron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) para ninguno de los porcentajes de colonización, para la fertilización con y sin microencapsulado el análisis estadístico realizado a hifas, arbusculos y vesículas no se encontró diferencias estadísticas ( $p > 0.05$ ). Para la biofertilización con y sin inóculo, se encontró que son estadísticamente iguales ( $p > 0.05$ ).

**Cuadro 27.** Porcentaje de colonización micorrícica de plantas de tomate var. Floradade (90 ddt) tratadas con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica

Tratamientos	Colonización		
	Tercer muestreo		
	H(%)	A(%)	V(%)
<b>Fertilización fraccionada</b>			
50% P	4.72 a	1.70 a	0.31 a
75% P	9.52 a	3.80 a	0.34 a
100% P	6.43 a	3.13 a	0.43 a
<b>Tipo de fertilizante</b>			
E	9.93 a	3.98	0.39 a
G	3.85 a	1.77 a	0.33 a
<b>Biofertilización</b>			
M <sup>+</sup>	7.75 a	2.96 a	0.52 a
M <sup>-</sup>	6.02 a	2.80 a	0.20 a

§La descripción de tratamientos representa los porcentajes de fertilización fraccionada con P (50, 75 y 100%) Fuente de MAP, E: Microencapsulado; G: Granel; Biofertilización: M<sup>+</sup>: Inoculado; M<sup>-</sup>: No inoculado y las estructuras del hongo en porcentaje (H: colonización hifal; A: colonización arbuscular; V: colonización vesicular). Medias de cada muestreo seguidas por letras diferentes difieren según la prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

El análisis estadístico realizado a la interacción de los tratamientos nos muestra que, para la fertilización fraccionada con y sin microencapsulado no hay diferencias estadísticas ( $p > 0.05$ ) (Cuadro 28) para colonización hifal, y arbuscular, sin embargo, para colonización vesicular se encontró que son estadísticamente diferentes ( $p \leq 0.05$ ) siendo el de mayor colonización el de 100% de P con fertilizante a granel sobre el de 75% de P con fertilizante a granel. Para la fertilización con y sin microencapsulado con la biofertilización, no se encontraron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) para hifas, arbusculos y vesículas. Para la fertilización fraccionada (50, 75 y 100% de P) con y sin inóculo no se encuentran diferencias significativas ( $p > 0.05$ )

**Cuadro 28.** Porcentaje de colonización micorrícica de plantas de tomate var. Floradade (90 ddt) interactuando con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica

Tratamientos	Colonización		
	H(%)	A(%)	V(%)
<b>Fertilizacion fraccionada con tipo de fertilizante</b>			
50E	6.34 a	2.49 a	0.24 c
50G	3.10 a	0.919 a	0.38 bc
75E	15.54 a	6.39 a	0.69 ab
75G	3.49 a	1.21 a	0 d
100E	7.90 a	3.06 a	0.25 cd
100G	4.98 a	3.20 a	0.61 a
<b>Tipo de fertilizante con biofertilizante</b>			
EM <sup>+</sup>	10.86 a	4.19 a	0.62 a
EM <sup>-</sup>	9.00 a	3.77 a	0.17 a
GM <sup>+</sup>	4.65 a	1.73 a	0.42 a
GM <sup>-</sup>	3.06 a	1.82 a	0.24 a
<b>Fertilizacion fraccionada con biofertilizante</b>			
50M <sup>+</sup>	4.41 a	1.51 a	0.38 a
50M <sup>-</sup>	5.03 a	1.90 a	0.24 a
75M <sup>+</sup>	13.60 a	5.14 a	0.56 a
75M <sup>-</sup>	5.44 a	2.46 a	0.12 a
100M <sup>+</sup>	5.26 a	2.23 a	0.61 a
100M <sup>-</sup>	7.60 a	4.03 a	0.24 a

§La descripción de tratamientos representa los porcentajes de fertilización fraccionada con P (50, 75 y 100%) Fuente de MAP, E: Microencapsulado; G: Granel; Biofertilización: M<sup>+</sup>: Inoculado; M<sup>-</sup>: No inoculado y las estructuras del hongo en porcentaje (H: colonización hifal; A: colonización arbuscular; V: colonización vesicular). Medias de cada muestreo seguidas por letras diferentes difieren según la prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

En cuanto a la interacción de los tres factores de fertilización no se encontraron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) en hifas, arbusculos y vesículas (Cuadro 29).

**Cuadro 29.** Porcentaje de colonización micorrícica de plantas de tomate var. Floradade (90 ddt) interactuando con diferentes dosis de fertilización de P, diferente fuente de P y diferente biofertilización micorrícica

Tratamientos	Colonización		
	Tercer muestreo		
	H(%)	A(%)	V(%)
50EM <sup>+</sup>	4.28 a	1.42 a	0.23 a
50EM <sup>-</sup>	8.39 a	3.56 a	0.25 a
50GM <sup>+</sup>	4.53 a	1.60 a	0.53 a
50GM <sup>-</sup>	1.67 a	0.241 a	0.24 a
75EM <sup>+</sup>	21.01 a	8.13 a	1.12 a
75EM <sup>-</sup>	7.53 a	2.96 a	0 a
75GM <sup>+</sup>	6.18 a	2.15 a	0 a
75GM <sup>-</sup>	0.814 a	0.272 a	0 a
100EM <sup>+</sup>	7.28 a	3.03 a	0.49 a
100EM <sup>-</sup>	8.52 a	3.10 a	0 a
100GM <sup>+</sup>	3.24 a	1.44 a	0.72 a
100GM <sup>-</sup>	6.68 a	4.96 a	0.49 a

<sup>§</sup>La descripción de tratamientos representa los porcentajes de fertilización fraccionada con P (50, 75 y 100%) Fuente de MAP, E: Microencapsulado; G: Granel; Biofertilización: M<sup>+</sup>: Inoculado; M<sup>-</sup>: No inoculado y las estructuras del hongo en porcentaje (H: colonización hifal; A: colonización arbuscular; V: colonización vesicular). Medias de cada muestreo seguidas por letras diferentes difieren según la prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

## VII. DISCUSIÓN

### VII.1 Temperatura.

Los registros de temperatura a lo largo del cultivo se mantuvieron por encima de las temperaturas óptimas para el cultivo de tomate, las cuales como menciona Delgado-Vargas *et al.*, (2022) oscilan alrededor de los 25 °C en el día y 15 °C por la noche, a diferencia de los registros obtenidos en esta investigación, donde la temperatura media alta fue de 34°C y la temperatura media baja fue de 16.9°C, aunque se eligió variedad floradade para este experimento por su resistencia a altas temperaturas de 37 a 38°C, en el mes de junio se registró una temperatura máxima de 46°C y una temperatura mínima de 16.9°C, dichas condiciones no fueron favorables para la investigación, ya que el estrés de calor es uno de los factores que limitan el crecimiento en el cultivo, afecta en procesos fisiológicos, como la fotosíntesis, la respiración y la transpiración, las cuales son de vital importancia para el desarrollo de las plantas (Morales *et al.*, 2006)

### VII.2 Variables de crecimiento

Por otra parte, el fraccionamiento de la fertilización de 100% de P mostró diferencias a los 60ddt para la variable de longitud de tallo obteniendo valores de 148 cm, valores más altos a los reportados por Lozano-Sacoto *et al.* (2023) donde reportan valores que oscilan entre 63.86 y 63.29 cm para el cultivo de tomate a los 50 ddt y valores alrededor de 96 cm a los 70 ddt, en cuanto a los valores obtenidos de área foliar y biomasa seca los resultados obtenidos no permitieron encontrar diferencias estadísticas lo que significa que se requieren investigaciones adicionales para determinar las dosis y frecuencias de fertilización óptimas para el cultivo de tomate en la región, considerando tanto el crecimiento vegetativo como la producción de frutos. Es importante destacar que la respuesta de las plantas de tomate a la fertilización puede variar en función de factores como la variedad cultivada, las condiciones edafoclimáticas y las prácticas de manejo.

En las variables de longitud de tallo, biomasa seca y área foliar, no se apreciaron diferencias entre los tratamientos evaluados durante los primeros 30 días, esto pudo deberse a que como lo menciona Rodríguez-Cabello, (2020), durante los primeros 40 a 50 días, las plantas no presentan un crecimiento vigoroso, éste crecimiento podría ser

significativo alrededor de los 75 ddt. En cuanto a diferencias en tratamiento, se apreció en el segundo muestreo un mayor incremento de longitud de tallo en el tratamiento del 100% de P de 148 cm, ya que como lo menciona Anwar, (2016) el aumento en el nivel de P aumenta considerablemente la altura de las plantas y según los análisis de fertilidad del suelo (Cuadro 1) teníamos un suelo con abundante fósforo disponible y quizá desde el inicio se aplicó un exceso de P, y que el haber aplicado un 50% de P hubiera sido suficiente para abastecer al cultivo. Nuestros resultados de área foliar, y biomasa corroboran lo reportado por Olivera *et al.*, (2004) quien menciona que las plantas con buen abastecimiento de P se ven beneficiadas y lo expresan en sus parámetros de crecimiento, él manejo diferentes dosis de P, y en la dosis mayor reportó peso seco en plantas de 2.63 g y un área foliar de 534.5 cm<sup>2</sup>, y los reportados en esta investigación sobrepasan dichos resultados. Durante el segundo muestreo el cultivo se encontraba en la etapa de llenado de frutos, por lo que pudo haber requerido más suministro de P y por eso hubo diferencias estadísticas, y en el tercer muestreo las plantas pudieron aprovechar los nutrientes que se encontraban disponibles, aún y cuando hubiera dosis menor, ya que la fertilización fraccionada permite reducir la dosis de fertilización hasta un 50%, y ello no afecta ni el rendimiento, ni el crecimiento del cultivo (Alvarado-Camarillo *et al.*, 2021).

En la aplicación de fertilizante MAP microencapsulado y fertilización a granel, se encontró que fueron estadísticamente similares en los 3 muestreos realizados a los 30, 60 y 90 ddt, para longitud de tallo, área foliar y biomasa seca. Tanto el fertilizante encapsulado como a granel, se aplicaron antes del trasplante, y se aplicaron en la misma dosis 30% de P de la dosis total de referencia. El fertilizante aplicado a granel es una forma más fácil absorbible a la planta, pero, por otra parte el fertilizante de MAP microencapsulado pudo haber sido liberado rápidamente de manera que, aunado a una riqueza de P del suelo, no se presentaron signos de insuficiencia en comparación con el MAP a granel aplicado al suelo (Pérez-Torres e Ibarra-Laclete, 2023). Probablemente si se aplicara una tasa diferente de MAP microencapsulado para forzar una mayor dependencia de este P para satisfacer las necesidades de P del cultivo se podría tener alguna diferencia que ayude a comprender el comportamiento del sistema.

En la aplicación de biofertilizante solo en el primer muestreo se obtuvieron diferencias estadísticas para la longitud de tallo, teniendo una longitud para aquellas plantas donde no se aplicó el inóculo de 65.9 cm, mientras que en las que se aplicó el inóculo fue de 63.2 cm esto es porque es común observar una ralentización en el crecimiento, ya que la simbiosis micorrícica requiere tiempo para establecerse, como lo menciona Gómez y Villate (2010). En el tercer muestreo se encontraron diferencias significativas se observó un aumento de biomasa seca para aquellas plantas que no tenían el inóculo con un valor de 274 g y 224 g para aquellas plantas que si tenían el inóculo teniendo mayor biomasa seca en aquellas plantas que no estaban inoculadas, ya que es posible que, como mencionan Toro *et al.* (2023) el alto contenido de P en el suelo haya incidido en la disminución de la simbiosis en las raíces de las plantas lo que provocó que las plantas que no estaban inoculadas aprovecharan mejor los nutrientes disponibles sin la interferencia de las micorrizas.

En la interacción de los factores de fertilización; fertilización fraccionada de 50, 75 y 100% de P con el fertilizante microencapsulado y no microencapsulado; no se obtuvieron diferencias en el primer y tercer muestreo, si bien, el suelo y su composición afectan la absorción de nutrientes, y si el suelo era rico en P eso pudo influir en no observar diferencias, en cambio durante el segundo muestreo el tratamiento que tenía 100% de P y el microencapsulado obtuvo la mayor longitud en comparación con los demás tratamientos, esto pudo deberse a la etapa en la que se encontraba el cultivo en la etapa de crecimiento de fruto y por ello quedó más abastecido con la dosis de 100% de P. En la tercera medición la combinación de los fertilizantes podría haber proporcionado un equilibrio adecuado de nutrientes, lo cual se reflejó en una respuesta positiva por el cultivo. Sin embargo, para el área foliar y la biomasa seca, se obtuvieron diferencias estadísticas en el primer muestreo siendo la de mayor incremento el tratamiento de 50% de P con fertilizante a granel, es posible que la fertilización fraccionada haya tenido un impacto más significativo en esta etapa inicial del cultivo, incluso el fertilizante a granel sobre el microencapsulado, ya que el fertilizante a granel está disponible inmediatamente al cultivo y en el microencapsulado influye la capacidad de la liberación de los nutrientes, la cual depende de las características de la matriz que lo contenga, como lo menciona Qiao. *et al.*, (2016) que trabajó con diferentes fertilizantes de liberación controlada; uno

con doble capa que utiliza etilcelulosa como recubrimiento interno y un polímero superabsorbente a base de almidón (almidón-SAP) como recubrimiento externo y otros con patata-SAP, los cuales al compararlos mostraron un comportamiento de liberación diferente.

En la interacción del fertilizante encapsulado con la biofertilización micorrícica, el primer muestreo evidencia que el fertilizante a granel sin inóculo presenta medias mayores de longitud de tallo (67.1 g), lo cual pudo deberse a que el establecimiento de la simbiosis requiere procesos armónicos, que dependen de señales específicas, para reconocimiento, colonización e intercambio de nutrientes, lo cual puede estar asociado a mecanismos de regulación de las respuestas de las plantas o debido a la baja capacidad del hongo de inducir respuesta de la planta (García-Garrido y Ocampo, 2002), también al inicio puede ser que la planta absorbiera más rápido el nutriente aplicado a granel, y en las siguientes mediciones se equilibrio

Por lo tanto, la combinación de fertilizantes pudo haber proporcionado un equilibrio adecuado de nutrientes en las mediciones posteriores, al empatarse las diferentes dosis de fertilización fraccionada. Sin embargo, para biomasa seca y área foliar no hubo diferencias entre tratamientos ni en el primer ni en el segundo muestreo, sino hasta el tercer muestreo para biomasa seca, se observó un valor mayor de 291 g, en el tratamiento de fertilizante microencapsulado sin micorrizas, esto pudiera deberse a que el P disponible podía ser abastecido a la planta por sí sola sin necesidad de la micorriza, es posible que hubiera un efecto sinérgico o antagónico (UPTC, 2012).

En la interacción de la fertilización fraccionada al 50, 75 y 100% de P, junto con la biofertilización, en el primer muestreo realizado a los 30 ddt, obtuvimos diferencias para la longitud de tallo siendo el tratamiento de 50% de P sin inóculo el de mayor longitud (68 cm) con una diferencia significativa del tratamiento de 75% de P con inóculo el cual fue el de menor longitud (62.7 cm), lo cual puede deberse a que se pudo haber inhibido la colonización micorrícica, como lo menciona Carrillo-Saucedo *et al.* (2022) los HMA provocan efectos positivos en plantas cultivadas en suelos deficientes en P, es por ello que no hubo una diferencia con los tratamientos al 75 o al 100% de P, ya que la planta pudo absorber nutrientes necesarios sin necesidad del inóculo aplicado y conforme paso

el tiempo hubo un equilibrio nutricional lo cual se observa al no tener diferencias en las mediciones realizadas a los 60 y 90 ddt.

En cuanto a la interacción de los tres factores de estudio, durante la primer y segunda medición no se encontraron diferencias estadísticas, esto puede deberse a que el cultivo, como ya se mencionó, estuvo bajo condiciones poco óptimas de crecimiento. En la tercer medición hubo diferencias significativas teniendo el tratamiento de 50% de P, microencapsulado y con inoculación y el de 100% de P, con microencapsulado sin inoculación con la mayor longitud de tallo, observamos que aun siendo de diferente dosis de fertilización 50% de P y 100% de P, no hay diferencias entre estos, y teniendo los dos por igual fertilizante microencapsulado, lo cual indica que el microencapsulado puede satisfacer las necesidades del cultivo igual que el fertilizante a granel ya que su longitud fue similar, puesto que el P es un nutriente esencial para el crecimiento de las plantas (Fernandez, 2007), uno de los efectos en las plantas por la deficiencia de P es la reducción en el crecimiento de la parte superior (Brown y Hu, 1999) y la altura promedio de las plantas al final del experimento fue alrededor de los 2 m.

### **VII.3 Variables de intercambio gaseoso**

En los parámetros medidos por el LI-6400XT tuvimos las medias más altas durante el muestreo realizado a los 30 ddt siendo éstas alrededor de  $27 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  para la tasa fotosintética,  $0.698 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  para conductancia estomática y  $14.4 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  tasa de transpiración, los cuales es importante señalar que están por encima de los valores reportados por Vazquez, (2005) quien tuvo valores entre 8 y  $10 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  en la medición realizada a los 58 días después de trasplante, en tomate variedad floradade cultivado en invernadero. Lo cual con los valores obtenidos nos indica que no tuvimos deficiencia de P ya que como menciona Bottrill *et al.*, (1970) la deficiencia de P, N y otros nutrientes reduce la tasa de fotosíntesis en las plantas.

En la medición realizada a los 60 ddt, no hubo diferencias para tasa fotosintética, ni para conductancia estomática, pero si para la tasa de transpiración en la fertilización fraccionada, siendo el tratamiento con el 75% de P con  $10.8 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  el de mayor tasa de transpiración sobre los tratamientos de 50 y 100% de P

A los 90 ddt se realizó una tercer medición la cual no arrojo diferencias para la conductancia estomática ni para la tasa de transpiración, sin embargo para la tasa fotosintética se encontró una diferencia a favor de la interacción del fertilizante 100% de P con el fertilizante a granel, siendo de  $19 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2\cdot\text{s}$ , lo cual concuerda con lo observado por Shishido et al. (1990) que la tasa fotosintética mayor por unidad de área foliar se encuentra en las hojas más jóvenes, y además nos indica un buen abastecimiento de P, ya que cuando existe una deficiencia de P hay una reducción en la tasa fotosintética, la conductancia estomática, la tasa de transpiración (Veronica *et al.*, 2017).

Las mediciones se realizaron a los 30, 60 y 90 ddt, y la tasa fotosintética, de transpiración y conductancia estomática tendieron a reducirse conforme avanza el tiempo, lo cual probablemente se debió a las etapas en las que se encontraba el cultivo como de fructificación y posteriormente de cosecha (Cárdenas *et al.*, 2008) cabe señalar que al momento de las mediciones las temperaturas oscilaron alrededor de los  $35^\circ\text{C}$ , y temperaturas superiores a  $30$  o  $40^\circ\text{C}$ , favorecen el cierre estomático (Morales *et al.*, 2006).

#### **VII.4 Rendimiento**

En el rendimiento del cultivo en general en el segundo corte fue en el que se obtuvo mayor rendimiento; si bien para la fertilización fraccionada de 50, 75 y 100% de P se presentó diferencia a favor del tratamiento de 50% de P donde se obtuvo un rendimiento de 26.7 t/ha, sobre los tratamientos de 75 y 100% de P, en la fertilización con y sin microencapsulado no se obtuvieron diferencias, pero se obtuvo un rendimiento durante la segunda semana de 21.4 y 21.6 t/ha respectivamente, lo cual puede deberse a que ambos fertilizantes se aplicaron antes del trasplante y desconocemos el tiempo que duraron en el suelo; de igual forma en la biofertilización con y sin inóculo durante la segunda semana se mostraron diferencias a favor del tratamiento en el que se aplicó el inóculo, teniendo un rendimiento de 23.3 t/ha sobre el que no tenía inóculo que obtuvo 19.7 t/ha, quizá las plantas con inóculo pudieron haber tenido acceso a más nutrientes lo cual mejoró su crecimiento y producción, ya que la deficiencia de nutrientes, se refleja principalmente en frutos y desordenes fisiológicos los cuales se traducen en bajos

rendimientos y tamaños (Márquez-Quiroz *et al.*, 2014), y podemos observar el rendimiento obtenido en esta investigación permitió alcanzar el rendimiento potencial de esta variedad como lo reportado por Terry Alfonso *et al.*,(2018) quién obtuvo rendimientos entre 20 a 25 t/ha. Quizá la aplicación fraccionada en esta segunda fase favoreció la disponibilidad de P en el momento crítico para el crecimiento de los frutos, y es posible que las necesidades de P estaban satisfechas para el cultivo.

En la interacción de los factores de fertilización fraccionada 50, 75 y 100% de P con el fertilizante microencapsulado y a granel, se obtuvo un mayor rendimiento en el tratamiento de 50% de P con el microencapsulado de 28.9 t/ha sobre los demás tratamientos.

En la interacción de fertilizante microencapsulado y a granel con la biofertilización con y sin inóculo, no obtuvimos diferencias, solo se registra que durante la segunda cosecha se obtuvo el mayor rendimiento de 23.8 t/ha para el microencapsulado con el inóculo, pero todos los tratamientos son estadísticamente similares.

La interacción de la fertilización fraccionada al 50, 75 y 100% de P con la inoculación del hongo y sin ésta, mostró un rendimiento significativo de 27.7 t/ha en el tratamiento de 50% de P con la inoculación, esto nos indica que hubo una buena compatibilidad entre la fertilización fraccionada del 50% con la inoculación y las plantas pudieron abastecerse favorablemente con esta dosis de fertilizante y absorber los nutrientes necesarios para obtener una buena cantidad de fruto, siendo que probablemente las dosis de 75 y 100% pudieron ser dosis relativamente altas y por ello no hubo diferencias marcadas, también la colonización micorrícica permite incrementos en la absorción de nutrientes y agua por las plantas micorrizadas, lo cual influye en un mayor rendimiento de los cultivos (Noda, 2009)

En cuanto a la interacción de los tres factores de fertilización, al igual que los anteriores el rendimiento más significativo se obtuvo en la segunda cosecha, obteniendo un mayor rendimiento de 30.1 t/ha en el tratamiento de 50% de P con el microencapsulado con la inoculación, reafirmando lo ya mencionado que la dosis del 50% de P es suficiente para abastecer de nutrientes a la planta, y lo cual nos indica que hubo una compatibilidad de los tres fertilizantes utilizados, y la inoculación del hongo pudo proveer del P necesario a

la planta, quedando en un equilibrio nutricional con las diferentes dosis administradas. Es importante destacar que, aun habiendo una alta fertilización de P, la simbiosis micorrícica apporto beneficios mostrados en una nutrición de la planta, obteniendo una mayor productividad de tomate (Alvarado-Carrillo et al., 2014).

### **VII.5 Establecimiento de la simbiosis micorrícica arbuscular**

El análisis microscópico realizado a las raíces recolectadas a los 30, 60 y 90 ddt muestra que las plantas no inoculadas también presentaron alguna estructura fúngica lo cual puede deberse a los hongos nativos del suelo.

#### **VII.5.1 Primer muestreo**

Para la colonización micorrícica en los tratamientos de fertilización fraccionada no hubo efecto en los tratamientos en el muestreo realizado a los 30 ddt, ni en porcentaje hifal, arbuscular ni vesicular, esto puede deberse a que nos encontramos en la etapa inicial de colonización y 30 ddt puede no ser suficiente tiempo para observar colonización o alguna diferencia significativa, los efectos de los HMA pueden tardar entre 8 a 10 semanas como lo menciona Islas y Eyherabide, (2014). Además una simbiosis micorrícica se establece más favorablemente en suelos deficientes de P (Olivera *et al.*, 2004), y aunque teníamos una fertilización en diferentes dosis de P, no hubo una diferencia ya que probablemente las plantas estaban recibiendo la cantidad adecuada de nutrientes esenciales para su crecimiento y desarrollo. En los tratamientos en los cuales se aplicó el fertilizante microencapsulado y a granel los tratamientos fueron estadísticamente similares, ya que se conoce que uno de los principales beneficios que reciben las plantas al hacer simbiosis micorrícica es mejorar la captación de P (Chávez-Hernández *et al.*, 2021), y nuestro suelo era rico en P (Cuadro 1).

#### **VII.5.2 Segundo muestreo**

En las muestras recolectadas a los 60 ddt, para la fertilización fraccionada de 50, 75 y 100% de P no se mostraron diferencias en la estimación del porcentaje de colonización micorrícica, ya que es posible que el suelo contuviera una cantidad suficiente de P disponible para las plantas, por lo que al aplicar diferentes dosis no hubo un impacto significativo. Mas no así para el fertilizante microencapsulado y a granel donde sí se encontró una diferencia en la colonización vesicular para aquellos en las que se

aplicó el fertilizante encapsulado, al parecer la inoculación benefició el avance de la simbiosis micorrícica en etapas intermedias. Para la biofertilización se obtuvo una mayor colonización hifal para aquellos en los que se aplicó el inóculo

En la interacción del factor de fertilización del microencapsulado con y sin inóculo se observó que en el fertilizante a granel con el inóculo se obtuvo un porcentaje hifal y arbuscular de 18.45% y 7.22%, respectivamente, el cual está por encima del fertilizante a granel sin inóculo el cual obtuvo un porcentaje de 2.84%, y 1.12%, respectivamente, esto puede deberse a que el fertilizante a granel estuvo más rápidamente disponible para las plantas y pudieron absorber los nutrientes, favoreciendo la colonización del hongo para la colonización vesicular de 1.12% para el encapsulado sin inóculo sobre el fertilizante a granel con y sin inóculo, puede ser que el fertilizante encapsulado pudo liberar de manera más controlada los nutrientes creando un ambiente más favorable para la colonización vesicular. Además, en la fertilización fraccionada de 50, 75 y 100% de P con y sin inóculo para el porcentaje hifal y arbuscular obtuvimos 21.65% y 9.29% para el tratamiento de 75% de P con el inóculo sobre 0.27% y 0% obtenido para el de 50% de P sin inóculo, puede deberse a que el tratamiento de 75% de P pudo haber estado proporcionando un nivel óptimo de nutrientes lo que favorece la colonización y la presencia de *R. irregularis* puede estar mejorando la absorción de P y otros nutrientes, pero en porcentaje vesicular no se encontraron diferencias.

Sin embargo nuestros porcentajes de colonización encontrados son similares a los reportados por Oseni *et al.*(2010) quien obtuvo un 23.3% de colonización micorrícica en plantas de tomate pero en un medio con vermiculita y utilizando como inoculante una combinación de *Glomus eunicatum* y *R. intraradices*

### **VII.5.3 Tercer muestreo**

En las diferentes etapas de crecimiento de la planta, las necesidades de nutrientes pueden variar, lo cual favorece la formación de vesículas como estructuras de almacenamiento del HMA (Barrer, 2009), sin embargo, no se encontraron diferencias en el porcentaje de colonización en los factores de fertilización principales

En la interacción de la fertilización fraccionada con el microencapsulado y a granel, se obtuvo una mayor colonización vesicular para el tratamiento de 100% de P con el fertilizante a granel sobre el de 75% de P con el fertilizante a granel

En las interacciones entre éstos, se encontró que son relativamente similares sin importar si tenían inóculo o no, todos los tratamientos tuvieron un porcentaje de inoculación, para la interacción del 100% de P con el fertilizante a granel con el inóculo tuvimos cifras de 29.61% para colonización hifal, 53.01% para colonización arbuscular y 26.77% para colonización vesicular, los cuales no obtuvieron diferencias estadísticas respecto a los demás tratamientos pero si fueron las cifras más altas en cuanto a porcentaje hifal y arbuscular en comparación con todos los tratamientos, por lo que el microencapsulado generó una menor colonización en las raíces del cultivo en comparación con aquellos en los que se aplicó fertilizante a granel

## VIII. CONCLUSIONES

En esta investigación se propuso evaluar la eficacia del fertilizante microencapsulado MAP con una matriz de goma de mezquite en satisfacer las necesidades de fertilización de P del cultivo de tomate en condiciones de malla sombra, así como su compatibilidad con el uso de hongos micorrízico arbusculares.

Los resultados indican que el fertilizante microencapsulado es efectivo en proporcionar P para el crecimiento óptimo del tomate, sin embargo, al parecer es comparable con el fertilizante convencional, no encapsulado, en la rápida disponibilidad. Las plantas tratadas con el fertilizante microencapsulado mostraron un buen crecimiento en términos de longitud de tallo, biomasa seca y área foliar, sin diferencias significativas en comparación con los tratamientos de fertilización convencional. No obstante, las condiciones del desarrollo experimental y los resultados de la investigación no permitieron discernir si es posible reducir la dosis de fertilización de P empleando el fertilizante encapsulado.

En adición a lo anterior, la tecnología de encapsulación demostró ser compatible con la inoculación de HMA, lo que sugiere una actividad conjunta compatible entre ambos métodos de fertilización. Esta compatibilidad es esencial. Ya que los hongos micorrízicos pueden mejorar la absorción de nutrientes y la resistencia a enfermedades, contribuyendo a un sistema de cultivo más sostenible y eficiente.

Por lo tanto, el uso de fertilizante encapsulado de MAP con una matriz de goma de mezquite representa una alternativa viable y sostenible para la fertilización de P en el cultivo de tomate bajo malla sombra. Esta tecnología no solo satisface las necesidades nutricionales del cultivo, sino que también es compatible con prácticas agrícolas que promueven la salud del suelo y la eficiencia de uso de recursos

## **IX. PERSPECTIVAS**

Considerando los resultados obtenidos durante esta investigación, se pueden observar algunas áreas de oportunidad para obtener unos mejores resultados en otras investigaciones.

Es importante determinar el perfil de liberación del fertilizante de este (y cualquier otro microencapsulado) en diferentes tipos de suelo con diferentes condiciones de humedad y temperatura. También es conveniente evaluar el prototipo del microencapsulado en el suelo en condiciones de invernadero, malla sombra y campo abierto.

De igual manera para conocer los niveles de P absorbidos realiza análisis de P en suelo después del experimento y en biomasa seca, para así llegar a determinar la dosis adecuada de P para aplicarse por fertirriego de acuerdo a la demanda de P por etapa fenológica.

## X. REFERENCIAS

- Aghighi Shahverdi, M., Amini Dahaghi, M., Ataei Somagh, H., y Mamivand, B. (2019). The effect of different nutritional systems with nitrogen and phosphorous fertilizers on quantitative and qualitative traits of basil (*Ocimum basilicum* L.). *Plant Productions*, 41(4), 1-14.
- Al., L.-S. et. (2023). Application of fertigation on tomato crop yield, Balzar-Guayas area. *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952., 7(Sept), 49-56. Recuperado a partir de <http://scielo.sld.cu/pdf/rus/v15n5/2218-3620-rus-15-05-49.pdf>
- Al., Q. et. (2016). Preparación y caracterización de fertilizante de liberación lenta encapsulado por polímero superabsorbente a base de almidón. *Carbohidrato Polim*, 146-154. <https://doi.org/doi: 10.1016/j.carbpol.2016.04.010>.
- Alvarado-Camarillo, D., Valdez Aguilar, L. A., Cepeda-Dovala, J. M., Rubí-Arriaga, M., y Pineda-Pineda, J. (2021). Aplicación fraccionada de fertilizantes vía fertirriego y la eficiencia del nitrógeno, fósforo y potasio en calabacita. *Acta Agrícola y Pecuaria*, 7(1). <https://doi.org/10.30973/aap/2021.7.0071001>
- Alvarado-Carrillo et al. (2014). Productividad de tomate mediante micorriza arbuscular en agricultura protegida\*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(3), 513-518. Recuperado a partir de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-09342014000300014&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342014000300014&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
- Anwar, S. (2016). Nitrogen and phosphorus fertilization of improved varieties for enhancing yield and yield components of wheat. *Pure and Applied Biology*, 5(4), 511-519. <https://doi.org/10.19045/bspab.2016.50091>
- Armenta-Bojórquez et al., 2010. (2010). Biofertilizantes en el desarrollo agrícola de México. *Ra Ximhai*, 6(1), 57-62.
- Arvidsson, J. (1999). Nutrient uptake and growth of barley as affected by soil compaction.

Plant and Soil, 208(1), 9-19. <https://doi.org/10.1023/A:1004484518652>

Ávila-Peralta et al. (2018). Crecimiento y estado nutrimental de tomate en respuesta a sustratos orgánicos y hongos micorrízicos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12, 2409-2422.

Barragán Ocaña, A. (2021). Endogenous Technologies and Capabilities as Development Elements for the Mexican Countryside: the Role of Biofertilizers in Localized Agri-food Systems (lafs). *Economía teoría y práctica*, 29(55), 59-86. <https://doi.org/10.24275/etypuam/ne/552021/barragan>

Barrer, S. E. (2009). El Uso De Hongos Micorrizicos Arbusculares Como Una Alternativa Para La Agricultura. *Facultad de ciencias Agropecuarias*, 7(1), 124-132.

Beltrano, J., Ruscitti, M., Arango, M. C., y Ronco, M. (2013). Effects of arbuscular mycorrhiza inoculation on plant growth, biological and physiological parameters and mineral nutrition in pepper grown under different salinity and p levels. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 13(1), 123-141. <https://doi.org/10.4067/s0718-95162013005000012>

Bhardwaj, D., Ansari, M. W., Sahoo, R. K., y Tuteja, N. (2014). Biofertilizers function as key player in sustainable agriculture by improving soil fertility, plant tolerance and crop productivity. *Microbial Cell Factories*, 13(1), 1-10. <https://doi.org/10.1186/1475-2859-13-66>

Bindraban, P. S., Dimkpa, C. o., y Pandey, R. (2020). Exploring phosphorus fertilizers and fertilization strategies for improved human environmental health. *Biology and Fertility of Soils*, 56(3), 299-317.

Bottrill, D. E., Possingham, J. V., y Kriedemann, P. E. (1970). The effect of nutrient deficiencies on photosynthesis and respiration in spinach. *Plant and Soil*, 32(1), 424-438. <https://doi.org/10.1007/BF01372881>

Brown, P., y Hu, H. (1999). Funciones del fosforo en las plantas \*. *Informaciones Agronómicas*, 83(36), 9-10.

Campos, C., Cardoso, H., Nogales, A., Svensson, J., Lopez-Ráez, J. A., Pozo, M. J.,

- Nobre, T., Schneider, C., y Arnholdt-Schmitt, B. (2015). Intra and inter-spore variability in rhizophagus irregularis AOX gene. PLoS ONE, 10(11), 1-24. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0142339>
- Cárdenas, L. E., Trejo Calzada, R., Esquivel Arriaga, O., Arreola Avila, J. G., y Flores Hernández, A. (2008). Comparación De Tasas Fotosintéticas En Algunas Plantas Cultivadas Y Malezas Photosynthetic Rate Comparisions in Some Crops and Shrubs. Revista Chapingo Serie Zonas Aridas, 7, 165-172.
- Carreón, Y., Aguirre, S., Gavito, M., Mendoza, D., Chávez, R., Martínez, M., y Trejo, D. (2014). Inoculación micorrízico arbuscular en portainjertos de plantas de aguacate cv 'Hass' en viveros de Michoacán, México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 5(5), 847-857.
- Carrillo-Saucedo, S. M., Puente-Rivera, J., Montes-Recinas, S., y Cruz-Ortega, R. (2022). Mycorrhizas as a tool for ecological restoration. Acta Botanica Mexicana, 129. <https://doi.org/10.21829/ABM129.2022.1932>
- Chávez-Hernández, C. G., Barrera Aguilar, C. C., Téllez Espinosa, G. J., Chimal-Sánchez, E., y García-Sánchez, R. (2021). Colonización micorrízica y comunidades de hongos micorrizógenos arbusculares en plantas medicinales del bosque templado "Agua Escondida", Taxco, Guerrero, México. Scientia Fungorum, 51(July 2020), e1325. <https://doi.org/10.33885/sf.2021.51.1325>
- Cordell, D., Jan-Olof, D., y White, S. (2009). The story of phosphorus: Global food security and food for thought. Global Environmental Change, 19, 292-305. Recuperado a partir de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095937800800099X>
- Costales, B., Enrique, A., Jinde, G., y Alberto, P. (2018). Efecto del nitrógeno como fertilizante de liberación lenta e inoculación de micorrizas en producción de pimiento (*Capsicum annum* L.) en sustrato compost.
- Dall'Agnol, P., Libardi, N., da Silva, E. C., y da Costa, R. H. R. (2022). Biosorption of Phosphorus Using Alginate-Like Exopolymers: Investigation of Removal Mechanism, Kinetic and Thermodynamic Properties. Journal of Polymers and the Environment, 1-12.

- Delgado-Vargas, V. A., Magdaleno-Villar, J. J., Silva-Rojas, H. V., los Santos, G. G. de, y Ayala-Garay, Ó. J. (2022). Quality of Tomato Seeds Produced At High Temperature During Different Stages of Development. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 45(4), 445-452. <https://doi.org/10.35196/RFM.2022.4.445>
- Fan, Y., Lin, F., Yang, L. M., y Zhong, X. J. (2018). Decreased soil organic P fraction associated with ectomycorrhizal fungal activity to meet increased P demand under N application in a subtropical forest ecosystem. *Biol Fertil Soils*, 54, 149-161.
- Fernandez, M. (2007). Fósforo: amigo o enemigo. *Icidca*, 41(2), 51-57. Recuperado a partir de <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223114970009.pdf>
- Fertahi, S., Pistocchi, C., Daudin, G., Oukarroum, A., Zeroual, Y., Barakat, A., y Bertrand, I. (2022). Experimental dissolution of biopolymer-coated phosphorus fertilizers applied to a soil surface: Impact on soil pH and P dynamics. *Annals of Agricultural Sciences*, 67(2), 189-195.
- Garc, C., y Alberto, J. (2014). Técnicas de caracterización de suelos y abonos orgánicos.
- García-Garrido, J. M., y Ocampo, J. A. (2002). Regulation of the plant defence response in arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Journal of Experimental Botany*, 53(373), 1377-1386. <https://doi.org/10.1093/jxb/53.373.1377>
- García-Pérez, C. A. (2016). Nutrición con fósforo: crecimiento de las plantas en respuesta a la deficiencia y el exceso. *Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*, 16, 129-145. [https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-10-9044-8\\_7](https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-10-9044-8_7)
- García, R., y María, I. (2005). Obtención De Un Fertilizante De Liberación Lenta Y Controlada Enriquecido Con Diferentes Plantas Marinas. *Revista Cubana de Química*, XVII(3), 25-31.
- Gómez, M. R., y Villate, A. R. (2010). Señales de reconocimiento entre plantas y hongos formadores de micorrizas arbusculares. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 11(1), 53-60. [https://doi.org/10.21930/rcta.vol11\\_num1\\_art:195](https://doi.org/10.21930/rcta.vol11_num1_art:195)
- González Fernández, P. (2003). La fertilización en el laboreo de conservación. *Agricultura en conservación*, 518-524.

- Grant, C. A., Flaten, D. N., Tomasiewicz, D. J., y Sheppard, S. C. (2001). The importance of early season phosphorus nutrition, 211-224.
- Harrison, M. J., Dewbre, G. R., y Liu, J. (2002). A phosphate transporter from *Medicago truncatula* involved in the acquisition of phosphate released by arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Cell*, 14(10), 2413-2429. <https://doi.org/10.1105/tpc.004861>
- Hasanuzzaman, M., Fujita, M., Oku, H., Nahar, K., y Hawrylak-Nowak, B. (2018). Plant nutrients and abiotic stress tolerance. *Plant Nutrients and Abiotic Stress Tolerance*, (June), 1-590. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-9044-8>
- Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Skrumsager, I., y White, P. (2012). Functions of Macronutrients. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00006-6>
- Hernandez-Hernandez, F. S., Mendoza-Villarreal, R., Robledo-Torres, V., Gallou, A., Cárdenas-Flores, A., y Valdez-Aguilar, L. A. (2023). Evaluación y caracterización morfológica de aislados de micorrizas nativas asociadas a tomatillo. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 6, 2277-2289. Recuperado a partir de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-09342015001002277&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342015001002277&lng=es&tlng=es).
- Herrera, L. (1999). Nutrient Solution Management in the Hydroponic Production of Tomato.
- Hidalgo, J. E. M., y Ramos, C. C. (2019). Coinoculation of *Rhizophagus irregularis* and *Rhizobium* sp. in *Phaseolus vulgaris* L. var. canary (Fabaceae) "canary bean", 26(3), 991-1006.
- Islas, A. J. T., y Eyherabide, M. (2014). Capacidad micotrófica y eficiencia de consorcios con hongos micorrícicos nativos de suelos de la provincia de Buenos Aires con manejo contrastante. *Revista Argentina de Microbiología*, 46(2), 133-143.
- Juárez. (2018). El fósforo en la fertilización del arroz y otras consideraciones para optimizar su rendimiento.
- Kobae, Y., y Hata, S. (2010). Dynamics of periarbuscular membranes visualized with a

fluorescent phosphate transporter in arbuscular mycorrhizal roots of rice. *Plant and Cell Physiology*, 51(3), 341-353. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcq013>

Lennon, C. (2024). Frenar la contaminación por fósforo sin comprometer los esfuerzos para acabar con el hambre. Recuperado a partir de <https://news.un.org/es/story/2024/01/1527297#:~:text=En todo el mundo%2C alrededor del 80%25 de,y el 96%25 de ese fósforo podría recuperarse.>

Lgbal, M. . (2019). Nano-fertilizers for sustainable crop production under changing climate: a global perspective. *Sustainable crop production*, 8, 1-13.

Márquez-Quiroz, C., Cano-Ríos, P., Moreno-Reséndez, A., Figueroa-Viramontes, U., Sánchez-Chávez, E., De la cruz-Lázaro, E., y Robledo-Torres, V. (2014). Efecto de la fertilización orgánica sobre el rendimiento y contenido nutricional de tomate saladette en invernadero. *ITEA Informacion Tecnica Economica Agraria*, 110(1), 3-17. <https://doi.org/10.12706/itea.2014.001>

Mathimaran, N., Ruh, R., Vullioud, P., Frossard, E., y Jansa, J. (2005). *Glomus intraradices* dominates arbuscular mycorrhizal communities in a heavy textured agricultural soil. *Mycorrhiza*, 16(1), 61-66. <https://doi.org/10.1007/s00572-005-0014-9>

McGONIGLE, T. P., MILLER, M. H., EVANS, D. G., FAIRCHILD, G. L., y SWAN, J. A. (1990). A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular—arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytologist*, 115(3), 495-501. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1990.tb00476.x>

Morales, D., Rodríguez, P., Dell 'amico, J. A., Torrecillas, A., De, M., Sánchez-Blanco, J., Morales, C. D., Rodríguez, C. P., y Dell, C. J. A. (2006). EFECTO DE ALTAS TEMPERATURAS EN ALGUNAS VARIABLES DEL CRECIMIENTO Y EL INTERCAMBIO GASEOSO EN PLANTAS DE TOMATE (*Lycopersicon esculentum* Mill. CV. AMALIA). *Cultivos Tropicales*, 27(1), 45-48.

Noda, Y. (2009). Las micorrizas: Una alternativa de fertilización ecológica en los pastos. *Pastos y forrajes*, 32(2), 1-10. Recuperado a partir de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=269119695001>

- Olivera, M., Tejera, N., Iribarne, C., Ocaña, A., y Lluch, C. (2004). Growth, nitrogen fixation and ammonium assimilation in common bean (*Phaseolus vulgaris*): Effect of phosphorus. *Physiologia Plantarum*, 121(3), 498-505. <https://doi.org/10.1111/j.0031-9317.2004.00355.x>
- Oseni, T. O., Shongwe, N. S., y Masarirambi, M. T. (2010). Effect of arbuscular mycorrhiza (AM) inoculation on the performance of tomato nursery seedlings in vermiculite. *International Journal of Agriculture and Biology*, 12(5), 789-792.
- Osorio, N. W. (2012). pH del suelo y disponibilidad de nutrientes. *Manejo Integral del Suelo y Nutrición Vegetal*, 1(4), 1-4.
- Pérez-Torres, C.A., Ibarra-Laclete, E. (2023). Estandarización de condiciones para el desarrollo de protocolos de medición de perfiles de liberación en suelo para fertilizantes encapsulados. Xalapa, Veracruz.
- Ramos, C., Hidalgo, J., Vera, M., Huaman, J., Rodríguez, C., y Chaman, M. (2021). Efecto del NaCl y micorrizas (*Rhizophagus irregularis*) en el crecimiento de “tomate” *Solanum lycopersicum* L. (*Solanaceae*). *Arnaldoa*, 28(3), 675-692.
- Roberts, T. (1997). Papel del fósforo y del potasio en el establecimiento de los cultivos. *Informaciones Agronómicas*, 26. Recuperado a partir de [http://www.ipni.net/publication/ia-la hp.nsf/0/2473CABE355B4BBE85258012005ECC69/\\$FILE/Art 1.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-la hp.nsf/0/2473CABE355B4BBE85258012005ECC69/$FILE/Art 1.pdf)
- Rodríguez-cabello, J. (2020). Hydrosustainable study in tomato cultivation , its effect on fruit yield and quality, 41(2).
- Romero-Salazar. (2022). Hongos formadores de micorrizas aislados a partir de raíces de la orquídea *Rodriguezia granadensis* (LINDL.) RCHB. F. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 25(1), 1-10. <https://doi.org/10.31910/rudca.v25.n1.2022.2086>
- Romero-Salazar, N. C., Galvis-Gratz, J. M., y Moreno-López, J. P. (2022). Mycorrhizal forming fungi isolated from roots of the orchid *Rodriguezia granadensis* (LINDL.) RCHB. F. | Hongos formadores de micorrizas aislados a partir de raíces de la

- orquídea *Rodriguezia granadensis* (LINDL.) RCHB. F. Revista U.D.C.A Actualidad and Divulgacion Cientifica, 25(1). <https://doi.org/10.31910/rudca.v25.n1.2022.2086>
- Rosas-Patiño, G., Puentes-Páramo, Y. J., y Menjivar-Flores, J. C. (2021). Efecto del pH sobre la concentración de nutrientes en cacao (*Theobroma cacao* L.) en la Amazonia Colombiana. Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, 24(1), 1-10. <https://doi.org/10.31910/rudca.v24.n1.2021.1643>
- Santillán, M. L. (2016). Así funcionan los biofertilizantes. Recuperado a partir de [https://ciencia.unam.mx/leer/570/Asi\\_funcionan\\_los\\_biofertilizantes](https://ciencia.unam.mx/leer/570/Asi_funcionan_los_biofertilizantes)
- Sawers, R. J. H., Yang, Y. I., Gutjahr, C., y Biophore, E. (2008). Los componentes moleculares de intercambio de nutrientes en arbuscular interacciones de micorrizas. Springer Science + Business Media.
- Sharma, N., y Singhvi, R. (2017). Efectos de los fertilizantes químicos y pesticidas en la salud humana y el medio ambiente: una revisión. Revista Internacional de Agricultura, Medio Ambiente y Biotecnología, 10, 675-680.
- Shaviv, A. (2001). Advances in Controlled Release of Fertilizers 71, before printing. Advances in Agronomy, 71, 1-49. Recuperado a partir de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0065211301710115>
- Shishido, Y. (1990). Effects of developmental stages and topping on photosynthesis, translocation and distribution of <sup>14</sup>C-assimilates in tomato. Boletín del Instituto Nacional de Investigación de Hortalizas, Plantas Ornamentales y Té, 1, 63-73. Recuperado a partir de <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19940303255>
- Siddiqui, Z. A., y Pichtel, J. (2008). Mycorrhizae: An overview. Mycorrhizae: Sustainable Agriculture and Forestry, 1-35. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8770-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8770-7_1)
- Sohrt, J., Lang, F., y Weiler, M. (2017). Quantifying components of the phosphorus cycle in temperate forests. Wiley Interdiscip Rev Water, 4.
- Stockinger, H., Walker, C., y Schüßler, A. (2009). «*Glomus intraradices* DAOM197198», a model fungus in arbuscular mycorrhiza research, is not *Glomus intraradices*. New

- Phytologist, 183(4), 1176-1187. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.02874.x>
- Terry Alfonso, E., Ruiz Padrón, J., y Carillo Soso, Y. (2018). Efecto de diferentes manejos nutricionales sobre el rendimiento y calidad de frutos de tomate. *Agronomía Mesoamericana*, 29(2), 389. <https://doi.org/10.15517/ma.v29i2.28889>
- Toro, M., Bazó, I., y López, M. (2023). Micorrizas arbusculares y bacterias promotoras de crecimiento vegetal, biofertilizantes nativos de sistemas agrícolas bajo manejo conservacionista. *Agronomía Tropical*, 58, 215-221. Recuperado a partir de [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0002-192X2008000300002&lng=es&tlng=es](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2008000300002&lng=es&tlng=es).
- UPTC. (2012). Dinámica de las relaciones nutricionales: antagonismos y sinergismos, 111-149.
- Vance, C., Uhde-Stone, C., y Allan, D. (2003). Adquisición y uso de fósforo: adaptaciones críticas por parte de las plantas para asegurar un recurso no renovable. *Nuevo Phytol*, 157, 423-447. Recuperado a partir de <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00695.x>
- Vazquez, J. . (2005). Efectos térmicos y fotométricos de 7 películas fotoselectivas sobre el crecimiento y rendimiento del tomate.
- Veronica, N., Subrahmanyam, D., Vishnu Kiran, T., Yugandhar, P., Bhadana, V. P., Padma, V., Jayasree, G., y Voleti, S. R. (2017). Influence of low phosphorus concentration on leaf photosynthetic characteristics and antioxidant response of rice genotypes. *Photosynthetica*, 55(2), 285-293. <https://doi.org/10.1007/s11099-016-0640-4>
- Villafañe, R., De Leon, N., Camacho, F., Ramírez, R., y Sánchez, L. (2004). Acumulación y lavado de sales en columnas de suelo regadas con agua salina procedente de un pozo petrolero. *Agronomía Tropical*, 54(1), 93-120. Recuperado a partir de [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0002-192X2004000100007&lng=es&tlng=es](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2004000100007&lng=es&tlng=es).

## XI. ANEXOS

**Cuadro 30.** Solución Hoagland modificada

Componentes	Solución de reserva	ml solución /1 L
<b>Macronutrientes</b>		
1M KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	136 g/L	1
1M KNO <sub>3</sub>	101 g/L	5
1M Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	236 g/L	5
1M MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	246.5 g/L	2
<b>Micronutrientes</b>		
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	2.86 g/L	1
MnCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	1.81 g/L	
ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0.22 g/L	
CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O	0.08 g/L	
Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	0.12 g/L	
<b>Hierro</b>		
Reserva hierro		0.25