

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
PROGRAMA DOCENTE DE LA CARRERA DE
INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA



Evaluación Comparativa de Niveles de Concentración de Solución Nutritiva en el
Manejo del Tomate Retador F1 en Invernadero.

Por:

AZUCENA FULGENCIO CARBAJAL

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

Saltillo, Coahuila de Zaragoza, México
Junio 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
PROGRAMA DOCENTE DE LA CARRERA DE
INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

Evaluación Comparativa de Niveles de Concentración de Solución Nutritiva en el
Manejo del Tomate Retador F1 en Invernadero.

Por:

AZUCENA FULGENCIO CARBAJAL

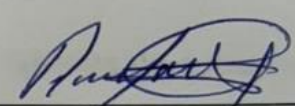
TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

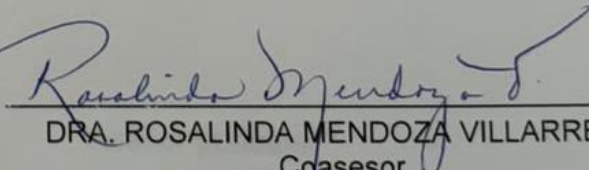
INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

Aprobada por el Comité Asesor:


DR. VALENTIN ROBLEDO TORRES
Asesor Principal


DRA ARELI GONZALEZ CORTES
Asesor Principal Externo


DRA LAURA RAQUEL LUNA GARCIA
Coasesor


DRA ROSALINDA MENDOZA VILLARREAL
Coasesor


DR ALBERTO SANDOVAL RANGEL
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila de Zaragoza, México
Junio 2026

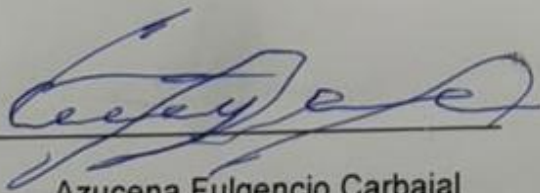
DERECHOS DE AUTOR Y DECLARACION DE NO PLAGIO

Todo material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor de los Estados Unidos Mexicanos, y pertenece al autor principal quien es el responsable directo y jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, gráficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente. Asimismo, tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Por lo anterior nos responsabilizamos de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaramos que este trabajo no ha sido previamente presentado en ninguna otra institución educativa, organización, medio público o privado.

Autor principal



Azucena Fulgencio Carbajal

Asesor principal



Dr. Valentín Robledo Torres

DEDICATORIA

A Dios, por darme la vida, la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesaria para superar cada desafío y permitirme alcanzar esta importante meta profesional.

A mis padres, **Nahúm Fulgencio Narváez** y **Lizeth Carbajal Rodríguez**, por su amor incondicional, sus sacrificios, su apoyo constante y por brindarme las herramientas necesarias para construir mi futuro. Gracias por creer en mí incluso en los momentos más difíciles y por darme valores. Este trabajo representa el fuerza de muchos años y está dedicado con amor y gratitud a cada uno de ustedes.

A mis hermanos, **Nahúm Fulgencio Carbajal** y la pequeña **Lizeth Fulgencio Carbajal**, con todo mi cariño. Espero que este logro les sirva como ejemplo y motivación para perseguir sus propios sueños, recordarles que la constancia, la disciplina y la fe en uno mismo son fundamentales para alcanzar cualquier meta. Ustedes no tienen que ser como yo, mejores que yo.

A mis abuelos maternos, **Bonifacio Vázquez** y **Juana Ortiz**, por su amor, apoyo, consejos y por siempre confiar en mis capacidades. Su presencia y palabras de aliento han sido una fuente de inspiración durante toda mi formación.

A mi abuela paterna, **María Narváez Carbajal**, por ser una mujer ejemplar, una madre admirable y por los valores y las enseñanzas que me ha brindado a lo largo de mi vida.

A mi madrina, **María teresa Monter Ponce**, por su cariño apoyo incondicional, palabras de aliento y valiosos consejos que me han acompañado en este camino. Gracias por motivarme a seguir adelante y por confiar siempre en mí.

Asimismo, dedico este trabajo a **Margarita**, por su afecto, apoyo y por formar parte de mi vida.

A mis tíos de la familia Fulgencio Narváez, por su apoyo, afecto y por acompañarme de una u otra manera en este camino.

De manera especial, dedico este trabajo a la memoria de mi querido **tío Catarino**, quien hoy descansa en paz. Aunque ya no se encuentra físicamente entre nosotros, su recuerdo, enseñanzas y cariño permanecerán siempre en mi corazón. Este logro también es para él.

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más sincero agradecimiento a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, institución que me brindó la oportunidad de forma parte de su comunidad estudiantil y profesional. Asimismo, manifiesto mi profunda gratitud al fundador de esta gran universidad, cuya visión y compromiso con la educación han permitido que miles de estudiantes, incluido yo, recibamos una formación académica de calidad y el apoyo necesario para alcanzar nuestras metas.

Agradezco de manera especial a mi asesor de tesis, el Dr. Valentín Robledo Torres, por su valiosa orientación, conocimientos, dedicación y apoyo durante el desarrollo de esta investigación. Su experiencia y confianza fueron fundamentales para la culminación exitosa de este proyecto.

De igual manera, expreso mi reconocimiento al M.C. José Pablo Collazo Gámez, por su disposición permanente para resolver dudas, su paciencia, sus consejos y el acompañamiento brindado a lo largo de este trabajo.

Mi agradecimiento también a la Dra. Brenda, por su contribución que enriquecieron el desarrollo de esta investigación.

A mis maestros y amigos, gracias por su amistad, apoyo, motivación y por acompañarme durante este proceso. Los momentos compartidos, el trabajo en equipo y su ayuda fueron parte importante de este logro.

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que, de una u otra manera, contribuyeron a mi formación y de brindaron su apoyo durante esta etapa de mi vida. Este logro es también reflejo de mi confianza y aliento.

RESUMEN

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es uno de los cultivos hortícolas de mayor importancia económica y alimentaria a nivel mundial. La nutrición mineral desempeña un papel fundamental en el crecimiento, rendimiento y calidad de los frutos, especialmente el fósforo y el potasio, nutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas. El objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto de diferentes concentraciones de fósforo y potasio sobre el desarrollo, rendimiento y calidad del tomate híbrido Retador F1 cultivado bajo condiciones de invernadero.

El experimento se estableció bajo un diseño complejo al azar con cuatro tratamientos y tres repeticiones. Los tratamientos consistieron en tres soluciones nutritivas experimentales; T1 (40P-200K), T2 (60P-250K) y T3 (80P-300K), así como un tratamiento convencional basado en la solución Steiner (T4). Se evaluaron variables agronómicas y de calidad del fruto, incluyendo número de fruto por racimo, peso promedio de fruto, rendimiento total, firmeza, pH, diámetro polar, diámetro ecuatorial, sólidos solubles totales y contenido de vitamina C. Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA) y comparación de medias mediante la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Encontrando diferencias significativas en el número de fruto por racimo, peso promedio de fruto y sólidos solubles totales. Los tratamientos T3 y T4 presentaron los mayores valores de número de frutos por racimo (4.54 y 4.56). El T3 registró el mayor contenido de sólidos solubles totales (4.72 °Brix), mientras que el T2 registró el mayor peso promedio de fruto (163.40 g). No se observaron diferencias significativas en rendimiento total, firmeza, pH, diámetro polar, ni en el contenido de vitamina C.

Se concluye que las diferentes concentraciones de fósforo y potasio influyen en algunas características productivas y de calidad del tomate Retador F1. Los tratamientos T3 y T4 favorecieron un mayor número de frutos por racimo, mientras que el T3 presentó el mayor contenido de sólidos solubles, mientras que el T2 promovió un mayor peso individual de fruto. Estos resultados indican que el manejo de la nutrición mineral puede contribuir a mejorar atributos específicos de producción y calidad en tomate cultivado bajo condiciones de invernadero.

Palabras clave: tomate híbrido, nutrición mineral, fósforo, potasio, calidad de fruto, rendimiento, agricultura protegida.

ABSTRACT

Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) is one of the most economically and nutritionally important horticultural crops worldwide. Mineral nutrition plays a fundamental role in plant growth, yield, and fruit quality, particularly phosphorus and potassium, which are essential nutrients for plant development. The objective of this study was to evaluate the effect of different phosphorus and potassium concentrations on the growth, yield, and fruit quality of the Retador F1 tomato hybrid grown under greenhouse conditions.

The experiment was established using a completely randomized design with four treatments and three replications. The treatments consisted of three experimental nutrient solutions: T1 (40P–200K), T2 (60P–250K), and T3 (80P–300K), as well as a conventional treatment based on the Steiner nutrient solution (T4). Agronomic and fruit quality variables were evaluated, including number of fruits per cluster, average fruit weight, total yield, fruit firmness, pH, polar diameter, equatorial diameter, total soluble solids, and vitamin C content. Data were subjected to analysis of variance (ANOVA), and treatment means were compared using Tukey's test at a significance level of $p \leq 0.05$.

The results showed significant differences in the number of fruits per cluster, average fruit weight, and total soluble solids content. Treatments T3 and T4 presented the highest values for number of fruits per cluster, with 4.54 and 4.56 fruits, respectively. Treatment T3 recorded the highest total soluble solids content (4.72 °Brix), whereas T2 achieved the highest average fruit weight (163.40 g). No significant differences were observed in total yield, fruit firmness, pH, polar diameter, equatorial diameter, or vitamin C content.

It is concluded that different phosphorus and potassium concentrations influenced certain productive and quality characteristics of the Retador F1 tomato hybrid. Treatments T3 and T4 promoted a higher number of fruits per cluster, whereas T3 showed the highest total soluble solids content and T2 produced the highest average fruit weight. These results indicate that mineral nutrition management can contribute to improving specific yield and fruit quality attributes in greenhouse-grown tomatoes.

Keywords: tomato hybrid, mineral nutrition, phosphorus, potassium, fruit quality, yield, protected cultivation.

INDICE DE CONTENIDO

INDICE DE CONTENIDO.....	i
INDICE DE TABLAS.....	ii
INDICE DE LUSTRACIONES.....	iii
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo general	3
1.2. Objetivos específicos.....	3
1.3. Hipótesis.....	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1 Generalidades del cultivo de tomate	4
2.1.1 Origen y domesticación.....	4
2.1.2 Clasificación taxonómica.....	5
2.1.3 Descripción botánica.....	5
2.1.4 Fenología del cultivo.....	6
2.2 Condiciones ambientales necesarias para la producción, en invernadero	7
2.2.1 Requerimientos del suelo	8
2.2.2 Requerimientos hídricos.....	8
2.2.3 Requerimientos climáticos.....	8
2.2.4 Radiación.....	8
2.2.5 Temperatura	8
2.2.6 Humedad relativa	9
2.3 Principales plagas y enfermedades del cultivo.....	9
2.4 Principales labores de manejo	12
2.5 Importancia económica y alimentaria del tomate.....	13

2.6	Producción mundial de tomate	13
2.7	Producción de tomate en México	14
2.8	Superficie establecida en México	15
2.9	Principales mercados	15
2.10	Producción de tomate bajo condiciones protegidas	16
2.10.1	Agricultura protegida	16
2.10.2	Producción en invernadero.....	16
2.10.3	Ventajas y limitaciones del cultivo protegido	17
2.10.4	Manejo agronómico del tomate en invernadero.....	17
2.11	Nutrición vegetal en tomate	17
2.11.1	Importancia de la nutrición mineral	17
2.11.2	Absorción y transporte de nutrientes	18
2.11.3	Macronutrientes esenciales y sus funciones.....	18
2.11.4	Micronutrientes esenciales y sus funciones	19
2.11.5	Deficiencias y toxicidades nutricionales	19
2.12	Soluciones nutritivas	20
2.12.1	Componentes de una solución nutritiva	20
2.12.2	Preparación y manejo de soluciones nutritivas	20
2.12.3	Conductividad eléctrica y pH.....	21
2.12.4	Factores que afectan la absorción de nutrientes	21
2.13	Efecto de la concentración de la solución nutritiva	22
2.13.1	Concentración de nutrientes y crecimiento vegetal	22
2.13.2	Respuesta fisiológica del tomate a diferentes concentraciones.....	22
2.13.3	Efecto sobre el rendimiento	23
2.13.4	Efecto sobre la calidad de fruto.....	23

2.13.5	Estudios previos sobre concentraciones de solución nutritiva en tomate ..	24
2.14	El híbrido de tomate Retador F1	24
2.14.1	Características agronómicas.....	24
2.14.2	Potencial productivo.....	25
2.14.3	Adaptación a condiciones de invernadero.....	25
2.14.4	Requerimientos nutricionales.....	26
2.15	Soluciones empleadas en la producción de tomate.....	26
2.16	Efecto del fosforo y potasio en soluciones nutritivas	27
III.	Materiales y métodos	29
3.1	Material genético utilizado	29
3.2	Ubicación y características del sitio experimental:	29
3.3	Producción de plántula y establecimiento del cultivo	29
3.4	Manejo del cultivo.....	31
3.5	Manejo nutricional y riego	31
3.6	Aplicaciones complementarias de bioestimulantes, fertilizantes foliares y microorganismos benéficos.....	33
3.7	Manejo de plagas y enfermedades	35
3.8	Eliminación de brotes axilares:	36
3.9	Poda de hojas.....	36
3.10	Variables evaluadas	36
3.11	Diseño experimental:	38
IV.	Resultados y discusión	39
4.1	Número de frutos por racimo (NFPR).....	39
4.2	Peso promedio de fruto (PPF).	40
4.3	Sólidos solubles totales (°Brix).	41

4.4	Diámetro ecuatorial del fruto (DEF).	43
4.5	Variables sin diferencias significativas	44
V.	Conclusiones	47
VI.	Referencias.....	49

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Principales plagas que atacan al cultivo de tomate y algunos productos para su control biológico, biorracional y químico, (INTAGRI, 2018).....	10
Tabla 2: Principales enfermedades del tomate y algunos métodos para su control biológico, biorracional y químico, (INTAGRI, 2018).	11
Tabla 3. Composición de las soluciones nutritivas utilizadas en los tratamientos T1, T2 y T3 durante las etapas 1 y 2.....	32
Tabla 4: Modificación de la solución nutritiva durante la etapa 3 (11° al 20° cuajado), mediante la edición 0.5 g L^{-1}	33
Tabla 5: Aplicaciones complementarias de bioestimulantes, fertilizantes foliares y microorganismos benéficos.....	34
Tabla 6: Composición de las soluciones nutritivas utilizadas en los tratamientos T1, T2 y T3 durante las etapas 1 y 2.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 7: Análisis de varianza entre los tratamientos evaluados sin diferencias significativas.	44

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Efecto de diferentes soluciones nutritivas sobre el NFPR del tomate híbrido Retador F1. Barras con letras iguales no presentan diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).	40
Figura 2: Efecto de diferentes soluciones nutritivas sobre PPF del tomate híbrido Retador F1. Barras con letras iguales no presentan diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).	41
Figura 3: efecto de diferentes soluciones nutritivas sobre el contenido de sólidos solubles totales (°Brix) del tomate híbrido Retador F1. Barras con letras iguales no presentan diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).	42
Figura 4: efecto de diferentes soluciones nutritivas sobre el contenido de DEF del tomate híbrido Retador F1. Barras con letras iguales no presentan diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).	43

I. INTRODUCCIÓN

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.), es una de las hortalizas más importante a nivel mundial, tanto por su consumo como por su valor económico. A nivel global se producen más de 120 millones de toneladas anuales, destacándose por su amplia distribución, superficie cultivada y volumen de exportación, (FAO, 2012).

Esta relevancia ha convertido al tomate en un cultivo estratégico dentro de los sistemas agrícolas modernos, especialmente en condiciones de agricultura protegida en México. El manejo adecuado de la nutrición vegetal se posiciona como un elemento clave para alcanzar altos rendimientos y estándares de calidad en el cultivo, (SADER, 2025).

El origen del tomate se sitúa en la región andina de América del sur, específicamente en países como Perú, Ecuador, Bolivia y Chile; sin embargo, su domesticación ocurrió en Mesoamérica, particularmente en México, donde se desarrollaron diversas variedades adaptadas a diferentes condiciones ambientales, (PROFECO, 2020).

En el ámbito internacional China es el mayor productor con 70.1 millones de toneladas, que representan el 26.7% del total global, mientras que India y Turquía siguen con 7.8% y 5.1%, por lo tanto, la producción de esta hortaliza supera 262 millones de toneladas en el mundo. México ocupa el 7° lugar con 1.75 % de la producción y un rendimiento de 49 toneladas por hectárea, (SIAP, 2025).

Su demanda se ha incrementado debido a los cambios en los hábitos alimenticios y al interés por productos saludables, lo que ha impulsado su producción en sistemas tecnificados que garantizan calidad, inocuidad, y disponibilidad constante durante todo el año (FAO, 2012).

En México, el cultivo de jitomate tiene una gran importancia económica, ya que representa una de las principales hortalizas de exportación y una fuente importante de empleo e ingresos para el sector agrícola, con una participación nacional en la producción de hortalizas 23.2%, (SADER, 2025).

La producción nacional supera los 3.3 millones de toneladas anuales, consolidando al país como uno de los principales productores y exportadores a nivel mundial, (SADER, 2021). Además, el uso de tecnologías como la agricultura protegida, incluyendo invernaderos, ha

permitido incrementar la productividad y mejorar la calidad del fruto, posicionado a México como líder exportaciones de tomate fresco, (SADER, 2022).

El híbrido de tomate Retador F1 ha sido evaluado en estudios agronómicos por su rendimiento productivo, destacando sobre otros híbridos F1, es un cultivar híbrido desarrollado específicamente por sus características de rendimiento alto, resistencia a enfermedades y uniformidad, (HM CLAUSE, 2022).

Retador F1 tiene un fruto en forma de pera de calibre grande, con la forma clásica de la pera tradicional, ideal para los mercados más exigentes, la variedad ofrece un elevado rendimiento y frutos de un rojo intenso con mucho brillo (HM CLAUSE, 2022).

A pesar de los avances en la tecnificación del Retador F1, aún existe la necesidad de generar información específica sobre el manejo nutricional adecuado. Para lograr su máxima potencial de crecimiento y producción requiere un programa de fertilización equilibrado, con alta demanda de nutrientes en la etapa de prefloración y desarrollo del fruto (HM. CLAUSE, 2022, 2023).

Por lo anterior, la presente investigación se enfoca en la evaluación de cuatro niveles de solución nutritiva para la producción del híbrido de tomate, Retador F1 bajo condiciones de invernadero, con el objetivo de optimizar la nutrición del cultivo y mejorar la calidad del fruto.

1.1. Objetivo general

Analizar el efecto de diferentes concentraciones de solución nutritiva sobre el crecimiento, desarrollo y productividad del híbrido de tomate Retador F1 (*Capsicum lycopersicum*), cultivado bajo condiciones de invernadero, con el fin de identificar la concentración que optimiza el rendimiento y la calidad del cultivo.

1.2. Objetivos específicos

- Determinar el efecto de las concentraciones de solución nutritiva sobre el crecimiento vegetativo del tomate Retador F1.
- Evaluar la influencia de las soluciones nutritivas en variables fenológicas como floración y fructificación.
- Cuantificar el rendimiento del cultivo mediante el número de frutos, peso promedio y producción por planta.
- Analizar la calidad de los frutos obtenidos bajo cada tratamiento de nutrición.
- Identificar la concentración de solución nutritiva que permita maximizar la productividad del híbrido Retador F1 en condiciones de invernadero.

1.3. Hipótesis

Por lo menos una de las concentraciones de solución nutritiva inducirá favorablemente crecimiento, desarrollo, rendimiento y calidad de fruto del híbrido de tomate Retador F1 cultivado bajo condiciones de invernadero.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Generalidades del cultivo de tomate

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es una de las hortalizas de mayor importancia a nivel mundial debido a su amplia distribución geográfica, versatilidad de uso y alto valor nutricional. Su cultivo se realiza en una gran diversidad de condiciones agroecológicas, tanto a campo abierto como bajo sistemas de agricultura protegida. Además, representa una fuente importante de ingresos para los productores y constituye uno de los cultivos hortícolas más estudiados debido a su relevancia económica, alimentaria y científica (Peralta, Spooner y Knapp, 2008).

2.1.1 Origen y domesticación

El tomate (*Solanum lycopersicum*) constituye una de las hortalizas de mayor importancia económica a nivel mundial debido a su amplia adaptación a diferentes condiciones agroclimáticas y a su elevado valor nutricional. Diversos estudios genéticos indican que las poblaciones silvestres ancestrales se originaron en la región andina de Sudamérica, particularmente en zonas (norte de Perú / sur de Ecuador) y el norte de Chile; la evidencia arqueológica indica que formas silvestres como *S. lycopersicum* var. coraciforme y *S. pimpinellifolium* participaron en la historia evolutiva, mientras que la domesticación y la diversificación hacia el tomate moderno tuvieron un papel importante en Mesoamérica, especialmente en el sureste de México (Delices *et al.*, 2019).

Posteriormente, el proceso de domesticación ocurrió en Mesoamérica, donde los pueblos prehispánicos seleccionaron plantas con frutos de mayor tamaño, mejor sabor y características agronómicas favorables. Desde México, el tomate fue introducido a Europa durante el siglo XVI tras la conquista española, expandiéndose posteriormente hacia Asia, África y el resto del mundo hasta convertirse en uno de los cultivos hortícolas más importantes de la agricultura moderna, (Blanca *et al.*, 2012; Peralta y Spooner, 2007; Delices *et al.*, 2019).

2.1.2 Clasificación taxonómica

Dominio: Eucaria

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Magnoliopsida (Dicotiledóneas)

Orden: Solanaceae

Familia: Solanaceae

Género: *Solanum*

Especie: *lycopersicum* L. (Gonzáles, 2013; Rick, 1978)

2.1.3 Descripción botánica

La mayoría de los tomates se consideran hierbas anuales, ya que no pueden soportar estaciones secas o frías prolongadas (Peralta y Spooner 2000; Wahead *et al.*, 2019). Sin embargo, se pueden encontrar miembros bianuales y perennes en áreas con condiciones ambientales favorables, lo que permite un crecimiento secundario leñoso con nuevos brotes y raíces adventicias con una base lignificada, (Peralta y Spooner, 2000). Presenta un sistema radicular compuesto por un eje principal, así como por raíces secundarias y adventicias. Las raíces adventicias son particularmente vigorosas, aunque su desarrollo suele concentrarse en los primeros 30 cm del perfil del suelo o sustrato (Rodríguez-Huerta, 2024). El tomate es una especie predominantemente autógama, aunque puede presentar cierto grado de polinización cruzada favorecida por insectos y condiciones ambientales específicas. La flor es hermafrodita y está compuesta por cinco sépalos, cinco pétalos amarillos, cinco estambres fusionados formando un cono estaminal y un pistilo central. Esta estructura floral favorece la autofecundación y contribuye a una elevada eficiencia reproductiva bajo condiciones adecuadas de cultivo, (Peralta *et al.*, 2008; Acquah, 2012). La planta presenta un crecimiento vigoroso y una notable capacidad de adaptación a diferentes sistemas de producción, incluyendo cultivo a campo abierto, agricultura protegida e hidroponía. Dependiendo del genotipo, puede presentar hábitos de crecimiento determinado o indeterminado, característica que influye directamente en las prácticas de manejo agronómico, tutorado y poda, (Peralta y Spooner, 2000; Resh, 2013).

Tallos: Es leñoso, veloso y grueso, que primero crece verticalmente y luego se vuelve decumbente debido al peso de las ramas. Generalmente, las plantas de tomate silvestres muestran un crecimiento indeterminado de varios metros, mientras que los tomates domésticos tienen un crecimiento determinado, y la mayoría los híbridos son indeterminados (Peralta y Spooner, 2000).

Hojas: Tienen una disposición imparipinnada que comprende de dos a seis pares de folíolos opuestos y un folíolo terminal, todos cubiertos de tricomas glandulares (Peralta y Spooner, 2000).

Flores: Se disponen en una inflorescencia cima escorpioide con 6 a 12 flores, (Peralta *et al.*, 2008).

Fruto: Son carnosos, globosos u ovoides, y generalmente biloculares en especies silvestres o multiloculares en variedades cultivadas. Los frutos suelen contener de 50 a 200 semillas por lóculo, que están cubiertas por una sustancia gelatinosa para evitar la germinación inmediata (Peralta *et al.*, 2008).

El color típico del fruto es rojo debido a la acumulación del pigmento licopeno durante la maduración del fruto (Howe y Smallwood 1982; Zhong *et al.*, 2013), mientras que algunas variedades y especies silvestre son amarillas, naranjas, verdes o moradas debido a la presencia de carotenoides o antocianinas (Peralta y Spooner 2000; Waheed *et al.*, 2019).

Las semillas presentan dimensiones medias de 5x 4 x 2 mm y se caracterizan por una morfología ovoide y comprimida. Su superficie puede ser lisa o presentar una marcada vellosidad, con coloraciones en la gama de los pardos, encontrándose inmersas en una matriz mucilaginosa densa. Estructuralmente, cada unidad seminal está integrada por el embrión, el endospermo y la testa o cubierta seminal (López Martín, 2017).

2.1.4 Fenología del cultivo

En condiciones de invernadero, el ciclo biológico del tomate puede variar entre 90 y 180 días dependiendo de la variedad, las condiciones ambientales y el manejo agronómico empleado. Durante la fase vegetativa se desarrollan las raíces, tallos y hojas que permiten la acumulación de biomasa y el establecimiento de la capacidad fotosintética necesaria para sostener la producción de frutos, (Acquaah, 2012; Resh, 2013).

La germinación es la etapa inicial en la que la semilla absorbe agua, activa sus procesos metabólicos y emerge la radícula. En condiciones favorables de temperatura y humedad, la germinación suele ocurrir entre 2 y 10 días después de la siembra (Acquaah, 2021).

Posteriormente se inicia la fase reproductiva con la aparición de inflorescencias, floración, polinización y cuajado de frutos. El desarrollo del fruto comprende procesos de división y expansión celular, seguidos por la etapa de maduración, durante la cual ocurren cambios fisiológicos y bioquímicos importantes, incluyendo la acumulación de azúcares, la reducción de la acidez y la síntesis de carotenoides como el licopeno, responsable de la coloración roja características del tomate maduro, (Klee y Giovannomi, 2011; Acquaah, 2012). Crecimiento: Durante esta fase se desarrolla el sistema radicular, el tallo y las hojas, permitiendo a la planta incrementar su capacidad fotosintética y acumular los recursos necesarios para la producción de flores y frutos (Acquaah, 2012).

Floración: Corresponde a la aparición y apertura de las flores. Esta etapa marca el inicio de la fase reproductiva y suele presentarse entre 30 y 60 días después del trasplante, dependiendo de la variedad y de las condiciones ambientales (FAO, 2020).

Fructificación: Inicia después de la polinización y fecundación de las flores. Los frutos comienzan a formarse y crecer mediante la acumulación de agua, carbohidratos y otros nutrientes esenciales para su desarrollo (FAO, 2020).

Maduración: Es la etapa final del desarrollo del fruto, caracterizada por cambios fisiológicos y bioquímicos que incluyen la degradación de la clorofila, la síntesis de pigmentos como el licopeno y el desarrollo de características de sabor y aroma propias del tomate maduro, (Acquaah, 2012).

2.2 Condiciones ambientales necesarias para la producción, en invernadero

La producción de tomate bajo condiciones de invernadero permite ejercer un mayor control sobre los factores ambientales que influyen en el crecimiento, desarrollo y productividad del cultivo. El manejo adecuado de variables como temperatura, humedad relativa, radiación solar, nutrición mineral y riego favorece una mayor eficiencia en el uso de los recursos, incrementa el rendimiento y mejora la calidad comercial de los frutos. Asimismo, la agricultura protegida reduce los efectos negativos ocasionados por factores

climáticos adversos y facilita la producción durante gran parte del año (Resh, 2013; FAO, 2020).

2.2.1 Requerimientos del suelo

El tomate requiere suelos profundos, bien drenados, con buena aireación y ricos en materia orgánica. Se desarrolla adecuadamente en suelos francos o francos-arenosos con un pH entre 6.0 y 7.0, lo que favorece la disponibilidad de nutrientes y el crecimiento radicular (FAO, 2020).

2.2.2 Requerimientos hídricos

El cultivo demanda un suministro constante de agua para mantener un crecimiento y producción adecuados. Las necesidades hídricas varían según la etapa fenológica, siendo mayores durante la floración y el desarrollo de frutos. El riego debe evitar tanto el déficit como el exceso de humedad para prevenir problemas fisiológicos y enfermedades, (Acquaah, 2012).

2.2.3 Requerimientos climáticos

El tomate es una especie de clima cálido que se desarrolla mejor bajo condiciones ambientales estables. En invernadero es posible controlar los factores climáticos para optimizar el crecimiento, la floración y fructificación, (Resh, 2013).

2.2.4 Radiación

La radiación solar es esencial para la fotosíntesis y la producción de biomasa. El tomate requiere una alta intensidad lumínica para lograr un adecuado crecimiento vegetativo y una alta calidad de frutos. En invernadero se recomienda aprovechar al máximo la luz natural evitando sombras excesivas (Resh, 2013).

2.2.5 Temperatura

La temperatura óptima para el crecimiento del tomate oscila entre 20 y 25°C durante el día y entre 15 y 18°C durante la noche. Temperaturas inferiores a 10°C o superiores a 35°C pueden afectar la floración, el cuajado de frutos y el rendimiento del cultivo (FAO, 2020).

2.2.6 Humedad relativa

La humedad relativa ideal para el cultivo se encuentra entre 60% y 80%. Valores muy altos favorecen el desarrollo de enfermedades fúngicas y dificultan la polinización, mientras que valores muy bajos incrementan la transpiración y el estrés hídrico de las plantas (Resh, 2013).

2.3 Principales plagas y enfermedades del cultivo

Este esquema (Tabla 1) de gestión integral debe articular tácticas de control cultural, legal, biológico, mecánico y químico, priorizando siempre la prevención. El diseño de programas fitosanitarios para el control de enfermedades debe fundamentarse en una ética ecológica y de sostenibilidad ambiental. En este contexto, la vigilancia epidemiológica y el monitoreo sistemático resultan determinantes; asimismo, es imperativo identificar los parámetros meteorológicos que predisponen al cultivo a infecciones, implementando estrategia de modificación del microclima y manejo preventivo que inhiban el establecimiento y la dispersión de patógenos, (Agrios, 2024). Las plagas que afectan el cultivo de tomate son: Mosca blanca (*Bemisia tabaci*), los adultos y ninfas succionan la savia de las plantas, debilitándolas y transmitiendo virus que pueden causar pérdidas significativas en el rendimiento (AGRIOS, 2005).

Pulgón (*Aphis gossypii* y *Myzus persicae*), se alimenta de la savia de hojas y brotes tiernos, provocando deformaciones y retraso en el crecimiento. Además, son vectores de diversas enfermedades virales (AGRIOS, 2005).

Minador de la hoja (*Liriomyza spp.*), las larvas forman galerías en las hojas al alimentarse del tejido vegetal, reduciendo la capacidad fotosintética de la planta (FAO, 2020).

Polilla del tomate (*Tuta absoluta*), sus larvas atacan hojas, tallos y frutos, causando daño severo y pérdidas económicas importantes en el cultivo (AGRIOS, 2005).

Tabla 1: Principales plagas que atacan al cultivo de tomate y algunos productos para su control biológico, biorracional y químico (INTAGRI, 2018).

(INTAGRI, 2018).

Plaga	Control biológico	Productos biorracionales	Productos químicos
Mosca blanca	<i>Encarsi formosa</i> , <i>Eretmocerus eremicus</i> y <i>Mundus</i> , <i>Chrysoperla</i> .	Extracto de ajo, aceite de neem, piretrinas naturales.	Abamectina, Bifentrina, Spiromesifen, Oxamil, Thiametoxam.
Paratrioza	<i>Tamarixia triozae</i> , <i>Chrysoperla</i> .	Extracto de ajo, aceite de neem, piretrinas naturales.	Abamectina, Bifentrina, Spiromesifen, Oxamil, Thiametoxam.
Trips	<i>Amblyseius cucumeris</i> y <i>Degenerans</i> , <i>Orius spp.</i>	Sales potásicas, aceite de soya, piretrinas naturales.	Spinosad, Dimetoato, Imidacloprid.
Pulgones	<i>Chrysoperla carnea</i> , <i>Aphidoletes aphidimyza</i> , <i>Aphidius colemani</i> .	Aceites minerales jabón agrícola al 2%.	Bifentrina, Imidacloprid, Thiametoxam.
Araña roja	<i>Phytoseiulus persimilis</i> , <i>Stethorus punctum</i> , <i>Amblyseius californicus</i> .	Azufre humectables.	Abamectina, Bifentrina, Dimetoato.

Las principales enfermedades (Tabla 2) que afecta el cultivo son: Tizón temprano (*Alternaria solani*), enfermedad fúngica que produce manchas oscuras con anillos concéntricos en hojas, tallos y frutos. Puede provocar defoliación y reducción del rendimiento (AGRIOS, 2005).

Tizón tardío (*Phytophthora infestans*), causa lesiones oscuras en hojas, tallos y frutos, especialmente en condiciones de alta humedad. Es considerada una de las enfermedades más destructivas del tomate (AGRIOS, 2005).

Marchitez por *Fusarium* (*Fusarium oxysporum* f. sp. *Lycopersici*), provoca amarillamiento, marchitez y muerte progresiva de las plantas debido a la obstrucción de los vasos conductores (FAO,2020).

Virus del rizado amarillo del tomate (TYLCV), es transmitido principalmente por la mosca blanca y ocasiona enrollamiento de hojas, reducción del crecimiento y disminución significativa de la producción (Jones, 2003).

Marchitez bacteriana (*Ralstonia solanacearum*): provoca marchitamiento rápido de la planta debido a la obstrucción de los vasos conductores. Esta enfermedad es favorecida por temperaturas elevadas y alta humedad del suelo (Jones et al., 2014).

Oídio (*Leveillula taurica*): enfermedad fúngica que produce manchas cloróticas en el haz de las hojas y crecimiento pulverulento blanquecino en el envés, reduciendo la actividad fotosintética y el rendimiento del cultivo (AGRIOS, 2005).

Tabla 2: Principales enfermedades del tomate y algunos métodos para su control biológico, biorracional y químico (INTAGRI, 2018).

Enfermedad	Control cultural	Control biológico	Control químico
Marchitez del tomate y pudrición de la corona y raíz.	Evitar riegos pesados, desinfectar material, plantas injertadas.	<i>Trichoderma harzianum</i> , <i>T. lignorum</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Gliocladium</i> sp.	Clorotalonil, Mancozeb, Zineb, Captan, Clorotalonil +Cimoxanil.
Verticilosis del tomate.	Biosolarización, evitar daños en la raíz.	<i>Trichoderma harzianum</i> , <i>Gliocladium virens</i> .	Tiabendazol, Benomilo, Carbendazim.
Cenicilla del tomate	Quitar hojas enfermas, desinfectar materiales, variedades resistentes.	<i>Bacillus subtilis</i> .	Clorotalonil, Captan, Azufre, Azoxystrobin, Oxicloruro de cobre.
Tizón tardío	Evitar fugas de agua, desinfectar heridas o plantas enfermas.	<i>Bacillus subtilis</i> , aceite de neem.	Clorotalonil, Captan, Mancozeb Fosetil aluminio, Famoxadona.
Tizón temprano	Evitar partes afectadas o plantas enfermas.	<i>Bacillus subtilis</i> .	Mancozeb, Bocelad, Azoxystrobin.
Cáncer Bacteriano del tomate	Cambiar desinfectante diario, desinfectar materiales y evitar	----- ----- ----- -----	Oxicloruro de cobre, Mancozeb, Bocelad, Azoxystrobin.

	excesos de humedad.		
Manchas bacterianas	Eliminar hospederos, tratamientos térmicos a la semilla, eliminar plantas enfermas.	<i>Bacillus subtilis</i> , <i>glutatio</i> n. <i>Oligosacarinas</i> .	Hidróxido cúprico, Acibenzolar-s-metil, Sulfato de estreptomicina.
Marchitez bacteriana	Buena ventilación, eliminar partes o plantas enfermas.	----- -----	Mancozeb, Oxicloruro de cobre, Sulfato de estreptomicina.
Nematodos	Rotación de cultivo, eliminar plantas enfermas, biofumigación.	<i>Bacillus subtilis</i> , <i>B. penetrans</i> , <i>Paecilomyces lilacinus</i> .	Metam sódico, Oxamil, Forato, Disulfoton.

(INTAGRI, 2018).

2.4 Principales labores de manejo

Trasplante: El trasplante se realiza cuando las plántulas presentan entre 4 y 6 hojas verdaderas y un sistema radicular bien desarrollado. Esta práctica permite establecer las plantas en su lugar definitivo, favoreciendo un crecimiento uniforme y un mejor aprovechamiento de los recursos disponibles (Acquaah, 2012).

Tutoreo: Consiste en sostener las plantas mediante estacas, hilos o estructuras de soporte para mantener los tallos erguidos. Esta práctica mejora la ventilación, facilita las labores culturales y reduce el contacto de los frutos con el suelo, disminuyendo la incidencia de enfermedades (FAO, 2020).

Polinización: Ocurre principalmente por la vibración de las flores, que facilita la liberación y transferencia del polen. En invernadero puede realizarse de manera natural mediante insectos polinizadores o mediante vibraciones mecánicas para asegurar un adecuado cuajado de frutos (Resh, 2013).

Poda: Consiste en eliminar brotes laterales, hojas viejas o dañadas y partes improductivas de la planta. Esta labor mejora la distribución de nutrientes, favorece la aireación y contribuye a obtener frutos de mejor calidad y tamaño (Acquaah, 2012).

Cosecha: Se realiza cuando los frutos alcanzan el grado de madurez deseado según su destino comercial. Los tomates pueden recolectarse en diferentes estados de madurez,

desde pinto hasta rojo completo, dependiendo de las condiciones de transporte y mercado (FAO, 2020).

2.5 Importancia económica y alimentaria del tomate

El tomate es una de las hortalizas más consumidas y comercializadas en el mundo, formando parte esencial de la alimentación humana debido a su contenido de vitaminas, minerales, fibras dietéticas y compuestos antioxidantes como licopeno. Además de su importancia nutricional, este cultivo genera una significativa derrama económica a nivel mundial, siendo una fuente de empleo e ingresos para miles de productores, comercializadores e industrias agroalimentarias. Su creciente demanda en mercados nacionales e internacionales ha impulsado el desarrollo de tecnologías de producción orientadas a incrementar el rendimiento y la calidad de los frutos (FAO, 2020).

2.6 Producción mundial de tomate

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) se encuentra entre las hortalizas más importantes y valiosas del mundo, tanto por su volumen de producción como por su relevancia económica y alimentaria. A nivel global, la producción anual supera los 190 millones de toneladas, cultivadas en una superficie aproximada de más de cinco millones de hectáreas (FAO 2020, 2021; Klee y Resende, 2020).

La importancia del tomate radica en su amplia aceptación para consumo en fresco y procesamiento industrial, siendo una fuente importante de vitamina, minerales, compuestos antioxidante y licopeno, sustancias asociadas con diversos beneficios para la salud humana (Klee y Resende, 2020).

Asia es el continente con la mayor participación en la producción mundial de tomate, aportando más del 60% del volumen total producido. Le siguen América con 13.1 %, Europa con 12.2 %, África con 11.9 % y Oceanía con 0.2 %, (FAO, 2020). Este predominio se debe principalmente a la elevada producción de países como China, India y Turquía, que figuran entre los principales productores mundiales.

China ocupa el primer lugar en producción mundial de tomate, contribuyendo con aproximadamente una tercera parte de la producción global. Otros países destacados son India, Turquía, Estados Unidos, Egipto, Italia, España, México y Brasil, los cuales

desempeñan un papel fundamental tanto en la producción como en el comercio internacional de esta hortaliza (FAOSTAT, 2023).

Durante las últimas décadas, la producción mundial de tomate ha mostrado una tendencia creciente debido al aumento de la demanda alimentaria, la expansión de los sistemas de agricultura protegida y la adopción de tecnologías que han permitido incrementar los rendimientos por unidad de superficie. Entre estas tecnologías destacan el uso de invernaderos, sistemas de fertirrigación, mejoramiento genético y manejo integrado de plagas y enfermedades (FAO, 2021).

Asimismo, el tomate representa uno de los cultivos hortícolas de mayor importancia en el comercio internacional. Su producción genera millones de empleos directos e indirectos en actividades relacionadas con el cultivo, la cosecha, el empaque, el transporte y la comercialización, contribuyendo significativamente al desarrollo económico de números países productores (FAO, 2021).

2.7 Producción de tomate en México

Durante las últimas décadas, México se ha consolidado como uno de los principales productores y exportadores de jitomate (*Solanum lycopersicum L.*) a nivel mundial, debido a sus condiciones agroclimáticas favorables y al desarrollo de sistemas de producción tecnificados. Este cultivo constituye una de las hortalizas de mayor importancia económica para el país dentro del sector agrícola, tanto por su valor comercial como por su contribución a las exportaciones agroalimentarias y su participación en el mercado internacional (SIAP, 2024).

El jitomate continúa siendo uno de los cultivos hortícolas más importantes de México por su alta demanda en los mercados nacional e internacional (SIAP, 2024). Asimismo, para el año 2024 se estimó una producción nacional total de 3.6 millones de toneladas de tomate rojo, lo que refleja la importancia estratégica de este cultivo en la agricultura mexicana (SIAP, 2024).

Los principales estados productores son Sinaloa, San Luis Potosí, Michoacán, Jalisco, Baja California y Zacatecas, los cuales concentran una gran proporción de la producción nacional gracias a sus altos rendimientos y a la implementación de tecnología de producción protegida. Además, una parte significativa de la producción nacional se

destina a la exportación, siendo Estados Unidos el principal mercado de destino, lo que genera importantes ingresos para el sector agroalimentario mexicano (SIAP, 2024).

2.8 Superficie establecida en México

Durante el ciclo agrícola otoño-invierno (OI) 2024, la superficie destinada al cultivo de jitomate experimentó una contracción de 0.7 % en comparación con el periodo homólogo del año anterior. Esta reducción representó una disminución de 1,620 hectáreas, al pasar de 23,283 hectáreas sembradas en 2023 a 21,663 hectáreas en 2024. Del total establecido, se cosecharon 21,497 hectáreas, lo que también representó una disminución de 3.1 % respecto al ciclo anterior (SIAP, 2024).

La variación en la superficie sembrada puede estar relacionada con diversos factores, entre ellos las condiciones climáticas, la disponibilidad de agua para riego, los costos de producción, las fluctuaciones en los precios de mercado y las expectativas de rentabilidad por parte de los productores. A pesar de esta reducción, el jitomate continúa siendo uno de los cultivos hortícolas de mayor importancia económica en México, debido a su elevada productividad y demanda comercial (SIAP, 2024).

Asimismo, el desarrollo de sistemas de producción bajo agricultura protegida, como invernaderos y casas sombra, ha permitido incrementar los rendimientos por unidad de superficie, optimizando el uso de recursos y manteniendo la competitividad del cultivo en los mercados nacionales e internacionales. Esta tecnificación ha contribuido a que México se mantenga como uno de los principales productores y exportadores de jitomate a nivel mundial (SIAP, 2024).

2.9 Principales mercados

El sector hortícola mexicano destaca por una balanza comercial superavitaria, sustentada en una capacidad productiva que facilita la exportación de aproximadamente un millón 798 mil toneladas cada año. El máximo histórico en ventas internacionales se registró precisamente en 2025, alcanzando un volumen de un millón 798 mil toneladas, lo que representó un valor de exportación de 2,239 millones de dólares a pesar de los desafíos comerciales del periodo. En cuanto a la distribución geográfica de los envíos durante 2025, el mercado estadounidense se consolidó de manera hegemónica al adsorber el 93%

de las exportaciones, dejando una participación complementaria para naciones como Canadá, Japón y Guatemala (SIAP, 2025).

2.10 Producción de tomate bajo condiciones protegidas

2.10.1 Agricultura protegida

La agricultura protegida consiste en la utilización de estructuras diseñadas para modificar o controlar las condiciones ambientales que rodean a los cultivos, con el propósito de optimizar su crecimiento, desarrollo y productividad. Estas estructuras incluyen invernaderos, casas sombra, túneles altos y otros sistemas que permiten reducir el efecto de factores climáticos adversos como temperaturas extremas, lluvias intensas, vientos fuertes y granizo. Además, la agricultura protegida facilita un manejo más eficiente del agua, los fertilizantes y los productos fitosanitarios contribuyendo a una producción más sustentable y rentable (FAO, 2020; Resh, 2013).

En México, la agricultura protegida ha experimentado un crecimiento significativo durante las últimas décadas debido a la creciente demanda de hortalizas de alta calidad para los mercados nacionales e internacionales. El tomate representa uno de los principales cultivos producidos bajo estas condiciones debido a su alto valor comercial y a su capacidad de respuesta a tecnologías avanzadas de producción, (SIAP, 2025).

2.10.2 Producción en invernadero

El invernadero es una estructura cubierta con materiales transparentes que permite controlar variables ambientales como temperatura, humedad relativa, radiación solar y ventilación. Este sistema ofrece condiciones favorables para el desarrollo del cultivo durante todo el año, independientemente de las condiciones climáticas externas (Resh, 2013).

La producción de tomate en invernadero permite obtener mayores rendimientos por unidad de superficie en comparación con los sistemas tradicionales a campo abierto. Además, favorece una mejor calidad de fruto, uniformidad en la producción y reducción de pérdidas ocasionadas por plagas, enfermedades y fenómenos climáticos adversos (FAO, 2020).

2.10.3 Ventajas y limitaciones del cultivo protegido

Entre las principales ventajas del cultivo protegido destacan el incremento de la productividad, la mejora de la calidad comercial de los frutos, el uso eficiente del agua y fertilizantes, la reducción de daños ocasionados por plagas y enfermedades, y la posibilidad de producir durante todo el año. Asimismo, estos sistemas permiten un mayor control de las condiciones ambientales, lo que favorece a estabilidad de la producción (Resh, 2013).

Sin embargo, también existen limitaciones asociadas a la agricultura protegida. Entre ellas se encuentran la elevada inversión inicial para la construcción y equipamiento de los invernaderos, los costos de mantenimiento, la necesidad de personal capacitado y la posibilidad de que se desarrollen problemas fitosanitarios específicos cuando las condiciones de ventilación y manejo no son adecuadas (Castellanos y Ojodeagua, 2009).

2.10.4 Manejo agronómico del tomate en invernadero

El manejo agronómico del tomate en invernadero comprende diversas practicas destinadas a maximizar el rendimiento y la calidad del cultivo. Entre ellas destacan la selección de híbridos adaptados, la producción de plántulas de calidad, el establecimiento de sistema de tutorado y poda, el manejo adecuado del riego y la fertirrigación, así como el monitoreo constante de plagas y enfermedades (Resh, 2013).

La nutrición mineral constituye uno de los factores más importantes dentro del manejo agronómico, debido a que influyen directamente en el crecimiento vegetativo, la floración, el cuajado de frutos y la calidad final de la cosecha. Por ello, es fundamental ajustar las concentraciones de nutrientes de acuerdo con las necesidades fisiológicas de la planta durante cada etapa de desarrollo (Sonneveld y Voogt, 2009).

2.11 Nutrición vegetal en tomate

2.11.1 Importancia de la nutrición mineral

La nutrición mineral es uno de los factores más importantes en la producción de tomate, ya que influye directamente en el crecimiento, desarrollo, rendimiento y calidad de los frutos. Las plantas requieren elementos minerales esenciales para llevar a cabo procesos fisiológicos fundamentales como la fotosíntesis, la respiración, la síntesis de proteínas y

el transporte de compuestos orgánicos. Un suministro adecuado y balanceado de nutrientes permite obtener plantas vigorosas, mejorar el cuajado de frutos y maximizar la productividad del cultivo, (Marschner, 2012).

En sistemas de producción intensiva bajo invernaderos, la nutrición adquiere una importancia aun mayor debido a que el productor controla prácticamente la totalidad del suministro de nutrientes mediante programas de fertirrigación. Por ello, el manejo adecuado de la nutrición mineral constituye una herramienta fundamental para optimizar el rendimiento y la calidad comercial de los frutos de tomate (Sonneveld y Voogt, 2009).

2.11.2 Absorción y transporte de nutrientes

Los nutrientes son adsorbidos principalmente por las raíces en forma de iones disueltos en la solución del suelo o en la solución nutritiva. La absorción ocurre mediante mecanismo pasivos y activos que permiten el ingreso de los elementos minerales a los tejidos vegetales. Posteriormente, los nutrientes son transportados a través de la xilema hacia las partes aéreas de la planta, donde participan en diferentes procesos metabólicos (Taiz et al., 2018).

El movimiento de nutrientes dentro de la plántula depende de factores como la disponibilidad de agua, la temperatura, el pH del medio del cultivo y la concentración de nutrientes presentes en la solución nutritiva. Un adecuado desarrollo radicular favorece la absorción eficiente y el aprovechamiento de los elementos esenciales (Marschner, 2012).

2.11.3 Macronutrientes esenciales y sus funciones

Los macronutrientes son elementos requeridos en mayores cantidades por las plantas. Entre ellos se encuentran nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S). El nitrógeno es fundamental para la formación de proteínas, aminoácidos, clorofila y ácidos nucleicos. Su deficiencia provoca clorosis generalizada y reducción del crecimiento vegetativo (Marschner, 2012).

El fósforo participa en procesos relacionados con la transferencia de energía, la división celular y el desarrollo radicular. Además, favorece la floración, el cuajado y la maduración de los frutos (Hawkesford et al., 2012).

El potasio interviene en la regulación osmótica, la apertura y cierre estomático, la síntesis y transporte de carbohidratos, así como en la localización de los frutos. Este nutriente

contribuye significativamente al tamaño, firmeza, color y contenido de sólidos solubles del tomate (Marschner, 2012).

El calcio forma parte de las paredes celulares y contribuye a la integridad estructural de los tejidos vegetales. Su deficiencia se asocia frecuentemente con la aparición de pudrición apical en frutos de tomate (Taiz et al., 2018).

El magnesio es el átomo central de la molécula de clorofila y participa activamente en la fotosíntesis y en numerosos procesos enzimáticos. El azufre forma parte de aminoácidos esenciales y proteínas involucradas en el metabolismo vegetal (Marschner, 2012).

2.11.4 Micronutrientes esenciales y sus funciones

Los micronutrientes son requeridos en cantidades menores, pero son igualmente indispensables para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Entre los principales micronutrientes se encuentran hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn), cobre (Cu), boro (B), molibdeno (Mo), cloro (Cl) y níquel (Ni) (Taiz et al., 2018).

El hierro participa en la síntesis de clorofila y en procesos de respiración celular. El zinc interviene en la síntesis de hormonas vegetales y en la activación enzimática. El cobre forma parte de enzimas relacionadas con procesos de oxidación y reducción, el boro es fundamental para la división celular. La formación de paredes celulares y el desarrollo reproductivo de la planta (Marschner, 2012). Aunque las cantidades requeridas son pequeñas, la deficiencia de cualquiera de estos elementos puede afectar severamente el crecimiento, desarrollo y productividad del cultivo de tomate (Hawkesford et al., 2012).

2.11.5 Deficiencias y toxicidades nutricionales

Las deficiencias nutricionales ocurren cuando la disponibilidad de un elemento esencial es insuficiente para satisfacer los requerimientos fisiológicos de la planta. Estas deficiencias suelen manifestarse mediante síntomas visuales específicos como clorosis, necrosis, reducción del crecimiento, deformación foliar y disminución de la producción, (Marschner, 2012).

Por otro lado, las toxicidades nutricionales se presentan cuando la concentración de determinados elementos supera los niveles tolerables para la planta. Esta condición puede ocasionar daños celulares, alteraciones fisiológicas y reducción del rendimiento. En sistemas de producción bajo invernadero, un manejo inadecuado de la fertirrigación puede

favorecer la acumulación excesiva de sales y generar desequilibrios nutricionales que afectan el desarrollo del cultivo (Sonneveld y Voogt, 2009). Por lo tanto, el manejo adecuado de la nutrición mineral constituye una practicas esenciales para garantizar altos rendimientos y una adecuada calidad de fruto en el cultivo de tomate bajo condiciones protegidas.

2.12 Soluciones nutritivas

2.12.1 Componentes de una solución nutritiva

Una solución nutritiva es una mezcla de agua y nutrientes minerales si sueltas en concentraciones adecuadas para satisfacer los requerimientos de crecimiento y desarrollo de las plantas. En los sistemas hidropónicos y de fertirrigación utilizados en invernaderos, la solución nutritiva constituye la principal fuente de elementos esenciales para los cultivos, por lo que su formulación debe ser precisa y equilibrada (Resh, 2013).

Las soluciones nutritivas contienen macronutrientes como nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S), así como micronutrientes esenciales entre los que destacan hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn), cobre (Cu), boro (B), molibdeno (Mo) y níquel (Ni). Cada uno de estos elementos desempeña funciones específicas relacionadas con el crecimiento vegetativo, la fotosíntesis, la floración, el desarrollo de frutos y la calidad de la producción (Sonneveld y Voogt, 2009).

La concentración de cada nutriente debe ajustarse de acuerdo con las necesidades fisiológicas del cultivo, la etapa fenológica y las condiciones ambientales, con el fin de evitar deficiencias o excesos que pueden afectar el rendimiento y la calidad de los frutos, (Marschner, 2012).

2.12.2 Preparación y manejo de soluciones nutritivas

La preparación de soluciones nutritivas requiere el uso de fertilizantes solubles de alta pureza que permitan aportar los nutrientes necesarios en las proporciones adecuadas. Generalmente se utilizan sales fertilizantes como nitrato de calcio, nitrato de potasio, fosfato monopotásico, sulfato de magnesio y mezclas comerciales de micronutrientes, (Resh, 2013). Durante la preparación es importante considerar la compatibilidad química entre los fertilizantes para evitar la formación de precipitados que reduzcan la disponibilidad de nutrientes. Por esta razón, en muchos sistemas de fertirrigación se

emplean soluciones madre separadas, comúnmente denominadas solución A Y solución B, que posteriormente son mezcladas con el agua de riego antes de su aplicación al cultivo (Sonneveld y Voogt, 2009). El manejo adecuado de la solución nutritiva incluye el monitoreo periódico de la conductividad eléctrica (CE), el pH y la concentración de nutrientes, con el objetivo de mantener condiciones óptimas para la adsorción y el desarrollo de las plantas (Steiner. 1984).

2.12.3 Conductividad eléctrica y pH

La conductividad (CE) es un indicador de la concentración total de sales disueltas presentes en la solución nutritiva. Este parámetro permite estimar la disponibilidad de nutrientes para las plantas y constituye una herramienta fundamental para el manejo de la fertirrigación. Valores excesivamente bajos pueden provocar deficiencias nutricionales, mientras que concentraciones muy elevadas pueden generar estrés osmótico y reducir la adsorción de agua por las raíces (Sonneved y Voogt, 2009).

En el cultivo de tomate bajo invernadero, la CE suele mantenerse dentro de rangos que favorecen un adecuado crecimiento y producción, aunque estos valores pueden variar según la etapa de desarrollo y los objetivos de producción (Resh, 2013).

Por otra parte, el pH influye directamente en la disponibilidad de nutrientes dentro de la solución nutritiva. En la disponibilidad de nutrientes dentro de la solución nutritiva. En términos generales, valores de pH entre 5.5 y 6.5 favorecen la absorción eficiente de la mayoría de los nutrientes esenciales. Valores fuera de este intervalo pueden ocasionar deficiencia inducidas o problemas de toxicidad debido a cambio en la solubilidad de algunos elementos minerales (Marschner, 2012).

2.12.4 Factores que afectan la absorción de nutrientes

La absorción de nutrientes por las plantas depende de diversos factores relacionados con el medio de cultivo, la solución nutritiva y las condiciones ambientales. Entre los factores más importantes se encuentran la temperatura, el contenido de humedad, la aireación radicular, la concentración de nutrientes, el pH y la conductividad eléctrica de la solución (Taiz et al., 2018). La temperatura de la zona radicular influye en la actividad metabólica de las raíces y en la velocidad de absorción de los nutrientes. Temperaturas demasiado bajas reducen el crecimiento radicular y limitan la absorción de elementos esenciales,

mientras que temperaturas excesivamente altas puede afectar la integridad de las raíces y disminuir su funcionamiento (Resh, 2013).

Asimismo, las interacciones entre nutrientes pueden modificar su disponibilidad y absorción. Por ejemplo, concentraciones elevadas de ciertos cationes pueden interferir con la absorción de otro elemento debido a fenómenos de competencia iónica. Por ello, el equilibrio nutricional constituye un aspecto fundamental para lograr una nutrición eficiente y maximizar el rendimiento del cultivo de tomate (Marschner, 2012).

2.13 Efecto de la concentración de la solución nutritiva

2.13.1 Concentración de nutrientes y crecimiento vegetal

La concentración de nutrientes presentes en la solución nutritiva influye directamente en el crecimiento en el crecimiento y desarrollo de las plántulas. Un suministro adecuado de elementos de minerales favorece procesos fisiológicos fundamentales como la fotosíntesis, la respiración, la división celular y la síntesis de compuestos orgánicos. Cuando las concentraciones de nutrientes son insuficiencias nutricionales; por el contrario, concentraciones excesivas pueden ocasionar problemas de toxicidad, desequilibrios nutricionales y reducción del crecimiento (Marschner, 2012).

En sistemas de producción bajo invernaderos, la concentración de nutrientes debe ajustarse cuidadosamente de acuerdo con las necesidades fisiológicas del cultivo y la etapa fenológica. El manejo adecuado de la solución nutritiva permite maximizar la eficiencia en el uso de los nutrientes y mejorar el desempeño agronómico de las plantas (Sonneveld y Voogt, 2009).

2.13.2 Respuesta fisiológica del tomate a diferentes concentraciones

El tomate presenta una respuesta fisiológica estrechamente relacionada con la disponibilidad de nutrientes en la solución nutritiva. Concentraciones adecuadas favorecen el desarrollo del sistema radicular, a formación de biomasa, la producción de flores y el cuajado de frutos. Asimismo, permite mantener una adecuada actividad fotosintética y un balance óptimo entre crecimiento vegetativo y reproductivo (Taiz et al., 2018).

El fósforo desempeña un papel fundamental en la transferencia de energía, la formación de ATP y el desarrollo radicular. Niveles adecuados de este elemento favorecen el

crecimiento inicial de las plantas, la floración y el osmótica de frutos. Por su parte, el potásico participa en la regulación osmótica, la apertura y cierre de estomas, a síntesis de carbohidratos y el transporte de azúcares hacia los órganos de almacenamiento, influyendo directamente en el crecimiento y productividad del cultivo (Hawkesford et al., 2012).

Sin embargo, concentraciones excesivas de nutrientes pueden incrementar la conductividad eléctrica de la solución nutritiva, provocando estrés osmótico y disminuyendo la absorción de agua por raíces. Esta situación puede afectar negativamente el desarrollo fisiológico y reducir el rendimiento potencial de las plantas (Sonneveld y Voogt, 2009).

2.13.3 Efecto sobre el rendimiento

El rendimiento del tomate depende en gran medida de la disponibilidad y balance de nutrientes durante todo el ciclo de cultivo. Diversas investigaciones han demostrado que un adecuado suministro de fósforo y potasio contribuye al incremento del número de frutos, peso promedio de fruto y rendimiento total por planta (Doráis et al., 2001).

El fósforo favorece la formación y desarrollo de estructura reproductivas, mientras que el potasio mejora el transporte de fotoasimilados hacia los frutos en crecimiento. Por esta razón, ambos nutrientes son considerados esenciales para alcanzar altos niveles de productividad en sistemas de producción intensiva bajo invernadero (Marschener, 2012). Por otra parte, tanto las deficiencias como los excesos nutricionales pueden provocar disminuciones significativas en el rendimiento debido a alteraciones fisiológicas que afectan la información y llenado de frutos. En consecuencia, es indispensable ajustar las concentraciones de nutrientes de acuerdo con los requerimientos específicos del cultivo (Sonneveld y Voogt, 2009).

2.13.4 Efecto sobre la calidad de fruto

Además del rendimiento, la concentración de nutrientes en la solución nutritiva influye de manera importante en la calidad de los frutos de tomate. Características como tamaño, firmeza, color, contenido de sólidos solubles totales, acidez y vida de anaquel están estrechamente relacionadas con la nutrición mineral de la planta, (Doráis et al., 2001).

El potasio es uno de los nutrientes más importantes para la calidad del fruto debido a su participación en el transporte de azúcares y en la regulación hídrica de los tejidos. Un

adecuado suministro de este elemento favorece la acumulación de sólidos solubles, mejorando el color y aumenta la firmeza de los frutos. Asimismo, el fósforo contribuye a la maduración y al adecuado desarrollo fisiológico del fruto (Hawkesford et al., 2012). La modificación de las concentraciones de nutrientes en la solución nutritiva puede utilizarse como una estrategia para mejores atributos específicos de calidad, siempre que se mantenga un equilibrio nutricional adecuado que no comprometa el rendimiento del cultivo (Doráis et al., 2001).

2.13.5 Estudios previos sobre concentraciones de solución nutritiva en tomate

Diversos estudios han evaluado el efecto de diferentes concentraciones de nutrientes sobre el crecimiento, rendimiento y calidad del tomate cultivado bajo condiciones protegidas. Steiner (1984), desarrolló una solución nutritiva universal que ha servido como base para numerosos programas de fertirrigación en cultivos hortícolas.

Sonneveld y Voogt (2009), reportaron que el ajuste de las concentraciones de nutrientes de acuerdo con la etapa fenológica del cultivo permite optimizar la absorción nutrimental y mejorando la eficiencia productiva. Asimismo, indicaron que el manejo adecuado de la conductividad eléctrica puede influir favorablemente en la calidad de los frutos.

Doráis et al. (2001), señalaron que modificaciones en la concentración de potasio pueden incrementar el contenido de sólidos totales y mejorar características organolépticas del fruto. De igual manera, diversos estudios han demostrado que el fósforo influye significativamente en el desarrollo radicular, la floración y el rendimiento del tomate bajo condiciones de invernadero.

2.14 El híbrido de tomate Retador F1

2.14.1 Características agronómicas

Retador F1 es un híbrido de tomate tipo saladette o pera, caracterizado por presentar crecimiento indeterminado, planta de porte abierto y entrenudos cortos, características que facilitan las labores de manejo bajo condiciones de agricultura protegida. Produce frutos homogéneos de tamaño comercial, con forma de pera bien definida, alta firmeza y color rojo intenso durante la maduración. Además, posee un amplio paquete de resistencias a

diversas enfermedades que afectan el cultivo del tomate, lo que contribuye a mantener la productividad y calidad de la cosecha (Fitoagropecuaria, 2025).

Los híbridos F1 utilizados en sistemas intensivos de producción destacan por su uniformidad genética, vigor híbrido, adaptación al cultivo protegido y elevada calidad comercial de fruto. Estas características han favorecido su adopción en la producción moderna de tomate bajo invernadero (Mugavero, 2024).

2.14.2 Potencial productivo

El potencial productivo de un híbrido de tomate depende de factores genéticos, ambientales y de manejo agronómico. Los híbridos indeterminados como Retador F1 presentan crecimiento continuo y capacidad de producir múltiples racimos durante un periodo prolongado, lo que favorece altos rendimientos bajo condiciones de invernadero cuando se proporciona una nutrición y manejo adecuados (Mugavero, 2024).

Asimismo, la uniformidad de los frutos, su firmeza y resistencia al manejo poscosecha representan características de importancia comercial, ya que permiten reducir pérdidas durante la cosecha, transporte y comercialización (Fitoagropecuaria, 2025).

2.14.3 Adaptación a condiciones de invernadero

Retador F1 ha sido desarrollado para sistemas de producción intensiva, presentando características favorables para su establecimiento bajo condiciones protegidas. El crecimiento indeterminado y los entrenudos cortos facilitan las prácticas de tutorado, poda y condición de plantas comúnmente utilizadas en invernaderos. Además, la arquitectura de plantas abierta favorece la ventilación y la penetración de la luz dentro del cultivo, aspectos importantes para mantener una adecuada productividad y reducir problemas fitosanitarios (Fitoagropecuaria, 2025).

La utilización de híbrido F1 en invernadero permite aprovechar mejor las condiciones controladas de temperatura, humedad y fertirrigación, obteniendo mayores rendimientos y mejor calidad de fruto en comparación con material tradicional (Mugavero, 2024).

2.14.4 Requerimientos nutricionales

Al igual que otro híbrido de tomate de crecimiento indeterminado, Retador F1 requiere un suministro adecuado y balanceado de nutrientes durante todo su ciclo de desarrollo. El nitrógeno es fundamental para el crecimiento vegetativo; el fósforo favorece el desarrollo radicular, la floración y el cuajado de frutos; mientras que el potasio participa en el transporte de carbohidratos, la regulación osmótica y la calidad final de los frutos, (Marschner, 2012; Sonneveld y Voogt, 2009).

Debido a su elevado potencial productivo, este híbrido demanda programas de fertirrigación cuidadosamente ajustados a cada etapa fenológica. Un manejo adecuado de la solución nutritiva permite maximizar el rendimiento el contenido de solubles totales, parámetros de gran importancia en la producción comercial de tomate bajo invernadero (Sonneveld y Voogt, 2009).

2.15 Soluciones empleadas en la producción de tomate

Las soluciones nutritivas constituyen la base de los sistemas de producción hidroponía y de fertirrigación, ya que suministran a las plantas todos los elementos minerales esenciales requeridos para su crecimiento y desarrollo. Una solución nutritiva consiste en una mezcla balanceada de macro y micronutrientes disueltos en agua, cuyas concentraciones deben ajustarse de acuerdo con los requerimientos fisiológicos del cultivo y la etapa fenológica de la planta (Steiner, 1984).

En el cultivo de tomate, la composición de la solución nutritiva influye directamente sobre el crecimiento vegetativo, la floración, el cuajado de frutos, el rendimiento y la calidad de la cosecha. Entre los nutrientes más importantes se encuentran el nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), debido a su participación en procesos fisiológicos relacionados con la división celular, transferencia de energía, fotosíntesis, síntesis de proteínas y transporte de carbohidratos (DÍAZ-Vázquez et al., 2023).

La solución nutritiva de Steiner es una de las más utilizadas en la producción de tomate bajo condiciones protegidas. Esta solución se caracteriza por mantener un equilibrio iónico adecuado entre aniones y cationes, favoreciendo una adsorción eficiente de nutrientes por parte de las raíces. Diversos estudios han demostrado que modificaciones

en la contracción de esta solución pueden influir significativamente en la disponibilidad de nutrientes y en la productividad del cultivo (Díaz-Vázquez et al., 2023).

El fósforo es un nutriente esencial que participa en procesos metabólicos relacionados con la transferencia de energía mediante moléculas de ATP, además de favorecer el crecimiento radicular, la floración y el desarrollo de frutos. Su deficiencia puede provocar disminución en el crecimiento de la planta y reducción del rendimiento. Por otro lado, el potasio interviene en la regulación osmótica, apertura y cierre estomático, transporte de azúcares y síntesis de compuestos que determinan la calidad de los frutos, como sólidos solubles, color y firmeza (Melo et al., 2014).

Asimismo, se ha reportado que la utilización de soluciones nutritivas balanceadas permite mejorar el rendimiento y la calidad de los frutos, incrementando parámetro como peso fresco, contenido de sólidos solubles y eficiencia en el uso del agua, aspectos de gran relevancia para la producción comercial de tomate bajo agricultura protegida (Méndez et al., 2023; Luna-fletes et al., 2018).

2.16 Efecto del fósforo y potasio en soluciones nutritivas

la solución nutritiva universal propuesta por Steiner, (1984) ha sido ampliamente utilizada en la producción hidropónica de tomate debido a su equilibrio iónico. Las soluciones nutritivas modificadas consisten en ajustar las concentraciones de determinados nutrientes en ajustar las concentraciones de determinados nutrientes, principalmente nitrógeno, fósforo y potasio, para evaluar su efecto sobre el crecimiento, rendimiento y calidad de los frutos. Estas modificaciones permiten optimizar la adsorción de nutrientes y mejorar la eficiencia del fertirriego en condiciones de invernadero.

Díaz-Vázquez et al. (2023) evaluaron cuatro concentraciones de una solución Steiner modificada (50, 74 100 y 125 %) en tomate cultivado bajo invernadero. Los autores encontraron que el incremento en la concentración de la solución del suelo mejoró variables agronómicas relacionadas con el crecimiento, la calidad comercial y el rendimiento del cultivo. La concentración de 125 % presentó los mejores resultados productivos.

Por otra parte, Armenta-Bojórquez et al. (2001), modificaron la solución nutritiva de Steiner mediante diferentes relaciones de nitrato y potasio en fertirriego, observando

efectos significativos sobre la producción, calidad y absorción nutrimental del tomate. Los resultados indicaron que las variaciones en la concentración de potasio influyen directamente en el rendimiento y en características de calidad del fruto, tales como tamaño, peso y contenido de sólidos solubles.

Asimismo, Luna-Fletes et al. (2018), compararon las soluciones nutritivas de Steiner y Castellanos en tomate cherry, encontrando diferencias en variable de calidad de fruto, los autores concluyeron que el manejo adecuado de la solución nutritiva puede mejorar atributos comerciales importantes, entre ellos firmezas, contenido de sólidos solubles y peso de fruto.

De igual manera, estudios recientes han demostrado que el uso de soluciones Steiner modificadas con incrementos o reducciones en la concentración de nutrientes puede influir en la calidad fisiológica de la semilla de tomate. Se ha reportado que soluciones concentradas entre 25 y 50% por encima de la concentración estándar favorecen la calidad y germinación de la semilla producidas (Parra-Terraza, et al., 2010).

Por lo anterior, la modificación de soluciones nutritivas representa una herramienta importante para optimizar el manejo nutrimental del tomate bajo condiciones protegidas, permitiendo ajustar el suministro de fósforo y potasio de acuerdo con los requerimientos del cultivo y los objetivos de producción (Steiner, 1984; Díaz-Vázquez et al., 2023).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Material genético utilizado

Se utilizó semilla del híbrido Retador F1, lote H72880, un tomate tipo Saladette comercializado por Harris Moran Seed Company, con un porcentaje de germinación de 90%, tratada con Thiram. Este híbrido se caracteriza por su adaptación a condiciones de cultivo intensivo y por producir frutos de buena firmeza y calidad comercial. El material vegetal fue adquirido en presentación de 1000 semillas y utilizado bajo condiciones de producción en invernadero (Harris Moran Seed Company, 2021).

3.2 Ubicación y características del sitio experimental

El experimento se estableció en un invernadero tipo túnel semicircular con estructura metálica y cubierta de polietileno. El sistema de control ambiental estuvo integrado por dos extractores de aire, pared húmeda (cooling pad), sistema de calefacción y un regulador automático de temperatura, lo que permitió mantener condiciones adecuadas para el desarrollo del cultivo. La investigación se llevó a cabo en el área experimental del Departamento de Horticultura de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), ubicada en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. El sitio experimental se localizó en las coordenadas geográficas 25°21'21.7" latitud norte y 101°02'10.9" longitud oeste, a una altitud aproximada de 1,742 m s.n.m.

3.3 Producción de plántula y establecimiento del cultivo

La siembra se realizó el 27 de febrero de 2025 en dos charolas de poliestireno de 200 cavidades. Como sustrato se utilizó una mezcla compuesta por 70% de peat moss y 30% de perlita (Nathan Cole, 2026). Previo a la siembra, el pH del sustrato se ajustó a 5.5 mediante la aplicación de bicarbonato de calcio a una concentración de 1 g L⁻¹. La verificación del pH se realizó utilizando un potenciómetro marca Hanna®, asegurando condiciones adecuadas para la disponibilidad y absorción de nutrientes durante la etapa de establecimiento de las plántulas.

Después de la siembra, las charolas se colocaron en un semillero y se cubrieron con polietileno negro con la finalidad de mantener condiciones de oscuridad que favorecieran y uniformizaran el proceso de germinación. La emergencia de las plántulas se registró el 4 de marzo de 2025. Una vez emergidas las plántulas, se retiró la cubierta de polietileno y se inició el manejo de riego utilizando agua ajustada a un pH de 6.0 mediante la aplicación de ácido fosfórico. Esta práctica se realizó con el propósito de optimizar la disponibilidad de nutrientes y promover un adecuado crecimiento y desarrollo del sistema radical durante la etapa de almácigo. Los riegos se aplicaron de manera periódica, procurando mantener una humedad adecuada en el sustrato para favorecer el desarrollo uniforme de las plántulas hasta el momento del trasplante.

Previamente al establecimiento del cultivo, el suelo del invernadero fue preparado mediante labores de condicionamiento que incluyeron el barbecho rastreo y elaboración de camas, incorporación de mejorador de suelo y aplicación de abono orgánico. Posteriormente, se colocó acolchado plástico negro y se instalaron dos líneas de cintilla para el riego de cada cama.

Las camas de cultivo tuvieron una longitud de 45 m y un ancho de 150 cm, con una separación de 60 cm entre plantas. La distancia entre plántulas fue de 60 cm, adaptado al material vegetal establecido. En total, cada cama conto con 106 perforaciones distribuidas en dos hileras para el establecimiento de las plántulas.

El trasplante se realizó el 17 de abril de 2025, cuando las plántulas presentaban un desarrollo adecuado para su establecimiento definitivo. Las plántulas fueron trasplantadas con cepellón, distribuyéndose en las unidades experimentales correspondientes.

El experimento se estableció bajo un diseño experimental de bloques completos al azar, conformado por cuatro tratamientos, con tres repeticiones por tratamiento. Cada unidad experimental estuvo integrada por seis plantas evaluadas para la toma de datos y análisis de las variables de estudio.

3.4 Manejo del cultivo

Tutorado: Se realizó con la finalidad de proporcionar estabilidad y soporte a las plantas durante su crecimiento y desarrollo. Esta práctica consistió en la colocación de una rafia tutora sujeta a un gancho ubicado en la parte superior de la estructura del invernadero. La rafia se fijó a la base de cada plántula mediante un anillo de plástico colocado por debajo de una hoja madura, evitando daños al tallo principal.

Posteriormente, conforme las plántulas crecieron, el tallo se enrolló alrededor de la rafia en sentido de las manecillas del reloj, guiándolo verticalmente hasta el ápice de la plántula. Esta labor permitió mantener un adecuado porte de las plántulas, facilitando las actividades de manejo y favoreciendo la ventilación e iluminación dentro del cultivo.

Cosecha: Se realizó de forma manual, recolectando un racimo por semana hasta completar 20 cortes. Los frutos destinados al mercado en fresco fueron cosechados de acuerdo con su índice de madurez. Durante la recolección se utilizaron recipientes limpios y sonetizados para reducir el riesgo de contaminación y minimizar los daños mecánicos ocasionados durante el manejo. Asimismo, los frutos fueron manipulados cuidadosamente para evitar golpes, magulladuras y otras lesiones que pudieran afectar su calidad postcosecha. Se evitó la sobrecarga del recipiente y la exposición prolongada de los frutos a la radiación solar directa. La separación de los frutos de la planta se efectuó mediante una ligera torsión en la zona de abscisión del pedúnculo o mediante el uso de herramientas de corte cuando fue necesario, con el fin de prevenir daños físicos al fruto. Estas prácticas contribuyen a mantener la calidad comercial y prolongar la vida útil del producto durante la etapa postcosecha (Kader, 2002).

3.5 Manejo nutricional y riego

El experimento estuvo conformado por cuatro tratamientos nutricionales, de los cuales uno correspondió a una solución nutritiva convencional utilizada como testigo (T4), mientras que los tres tratamientos restantes (T1, T2 y T3) consistieron en diferentes niveles de concentración de la solución nutritiva evaluada (Tabla 3). Las soluciones nutritivas fueron preparadas a partir de distintas fuentes fertilizantes, incluyendo nitrato de amonio, nitrato de potasio, nitrato de calcio, nitrato de magnesio, fosfatos y sulfatos,

además de ácidos utilizados para el ajuste del pH de la solución. La formulación de cada tratamiento se realizó con el objetivo de suministrar los nutrientes esenciales requeridos para el crecimiento, desarrollo y producción del cultivo de tomate Retador F1 bajo condiciones de invernadero.

El programa de fertilización se dividió en tres etapas fenológicas. La primera etapa comprendió desde el trasplante hasta el primer cuajado de frutos, realizándose una aplicación semanal de la solución nutritiva cada lunes. La segunda etapa abarcó desde el segundo hasta el undécimo cuajado, incrementándose la frecuencia de aplicación a dos veces por semana (lunes y jueves). Finalmente, la tercera etapa comprendió desde el undécimo hasta el vigésimo cuajado efectuándose tres aplicaciones semanales (lunes, jueves y sábado) (Tabla, 4).

El tratamiento (T4) se formuló con una solución nutritiva basada en la solución de equilibrio iónico de 1.88, 1.91 y 1.21 meq L⁻¹ de ácido nítrico, ácido fosfórico y ácido sulfúrico, complementada con sulfato de potasio como fuente potasio. De igual manera, durante la tercera etapa de producción se incorporó nitrato de amonio a una concentración de 0.5g L⁻¹, siguiendo el mismo criterio aplicado a los tratamientos experimentales.

Etapas 1.- 1er cuaje. Una fertilización por semana. (lunes).

Etapas 2.- 2er al 11° cuaje. Dos fertilizaciones por semana. (lunes, jueves).

Etapas 3.- 11° al 20° cuaje. Tres fertilizaciones por semana (Tabla 4). Se modificó la solución por las bajas temperaturas aumentando el NO₃⁻ al 7%, (lunes, jueves y sábado)

Tabla 3. Composición de las soluciones nutritivas utilizadas en los tratamientos T1, T2 y T3 y T4 durante las etapas 1 y 2.

Fertilizantes	Tratamiento 1 (g L⁻¹)	Tratamiento 2 (g L⁻¹)	Tratamiento 3 (g L⁻¹)	Tratamiento 4 (g L⁻¹)
Nitrato de amonio	0.053	0.000	0.000	0.000
Nitrato de potasio	0.294	0.000	0.000	0.000
Nitrato de magnesio	0.059	0.000	0.000	0.000
Fosfato monopotásico	0.170	0.088	0.089	0.000
Sulfato de potasio	0.000	0.056	0.052	2.59

Ácido nítrico (mL/ L ⁻¹)	0.34	0.00	0.00	1.88
Ácido fosfórico (mL/ L ⁻¹)	0.00	0.00	0.00	1.91
Ácido nítrico (mL/ L ⁻¹)	0.00	0.00	0.00	1.21

Tabla 4: Modificación de la solución nutritiva durante la etapa 3 (11° al 20° cuajado), mediante la edición 0.5 g L⁻¹.

Fertilización	Tratamiento 1 (g L⁻¹)	Tratamiento 2 (g L⁻¹)	Tratamiento 3 (g L⁻¹)	Tratamiento 4 Meq/L
Nitrato de amonio	0.5	0.000	0.000	0.5
Nitrato de potasio	0.294	0.000	0.000	0.000
Nitrato de magnesio	0.059	0.000	0.089	0.000
Fosfato monopotásico	0.170	0.088	0.089	0.000
Sulfato de potasio	0.000	0.056	0.052	2.59
Ácido nítrico (mL/ L ⁻¹)	0.34	0.00	0.00	1.88
Ácido fosfórico (mL/ L ⁻¹)	0.00	0.00	0.00	1.91
Ácido sulfúrico (mL/ L ⁻¹)	0.00	0.00	0.00	1.21

3.6 Aplicaciones complementarias de bioestimulantes, fertilizantes foliares y microorganismos benéficos

Como complemento al programa de nutrición (Tabla 5), vía fertirrigación, durante el ciclo de cultivo se realizaron aplicaciones de microorganismos benéficos, bioestimulantes y fertilizantes foliares con el propósito de favorecer el desarrollo vegetativo, la adsorción de nutrientes, el cuajado de frutos y la calidad de producción.

Desde el trasplante se efectuaron cinco aplicaciones de *Trichoderma spp.* con intervalos de 15 días, utilizando una dosis de 5 mL L⁻¹ de agua. Asimismo, se realizaron aplicaciones de Prevence T3 ® como parte de la estrategia de manejo biológico para promover el desarrollo radicular y contribuir a la protección de las plantas contra patógenos del suelo,

(Li *et al.*, 2015). Un inoculante microbiológico Prevence T ® formulado a base de *Trichoderma harzianum*, *T. asperellum* y *T. yunnanense*, utilizado para promover el desarrollo radicular y contribuir al manejo biológico de enfermedades asociadas al suelo, (BioStar México, s.f.).

Como bioestimulantes se utilizaron NG-PLUS ®, Complejo Aminofol Potásico ®, Inactive ® y productos a base de algas marinas. Las aplicaciones se realizaron principalmente por vía foliar a una dosis de 3 mL L⁻¹ de agua, con una frecuencia semanal o quincenal según la etiqueta del producto y la etapa fenológica del cultivo. Estos productos contienen compuestos como aminoácidos, ácidos fulvicos, fitohormonas y extractos vegetales que favorecen procesos fisiológicos relacionados con el crecimiento, la fotosíntesis, la floración y el desarrollo de frutos, (BioStar México, s.f.).

Para completar la nutrición mineral se aplicaron fertilizantes foliares y correctos de micronutrientes, entre ellos Boro-Calcio ®, Micro Mix con Silicio ®, Ultrasol Micro Rexene Zn-15 ® y Ultrasol Micro Rexene Fe Q48 ®. Los productos quelatados se aplicaron a una concentración de 55g por 1100 L de agua mediante el sistema de riego.

Las aplicaciones se realizaron durante todo el ciclo de producción, generalmente después de las labores de cosecha, procurando efectuarlas en horarios de bajas radiación solar para favorecer la adsorción de los productos y minimizar por evaporación.

Tabla 5: Aplicaciones complementarias de bioestimulantes, fertilizantes foliares y microorganismos benéficos.

Producto	Clasificación	Vía de aplicación	Frecuencias	Dosis
<i>Trichoderma spp.</i>	Microorganismo benéfico	Riego	Cada 15 días (5 aplicaciones)	5 mL L ⁻¹
Prevence T3®	Microorganismo benéfico	Foliar/ riego	1 ves cada 3 meses	10 mL L ⁻¹
NG-PLUS®	Bioestimulante	Foliar	Semanal	3 mL L ⁻¹
Complejo Aminofol Potásico ®	Bioestimulante	Foliar	Cada 15 días	0.5 mL L ⁻¹
BioActive®	Bioestimulante	Foliar	Semanal	0.5 mL L ⁻¹
Algas Marinas®	Bioestimulante	Foliar	Semanal	3 mL L ⁻¹
Calcio-Boro®	Fertilizante foliar	Foliar	Cada 15 días	2 mL L ⁻¹

Polique Calcio®	Fertilizante foliar	Foliar	Cada 15 días	0.5 L/200L agua
Micro Mix con Silicio®	Micronutrientes	Foliar	Cada 10 días	55g/1100L agua
Ultrasol Micro Rexene Zn-15®	Micronutrientes quelatados	Riego	semanal	55g/1100L agua
Ultrasol Micro Rexene Fe Q48®	Micronutrientes quelatados	Riego	Semanal	55g/1100L agua

3.7 Manejo de plagas y enfermedades

Durante el ciclo de cultivo se presentó incidencia de mosca blanca (*Bemisia tabaci*), pulgón (*Macrosiphum euphorbiae*), paratrioza (*Bactericera cockerelli*), cenicienta (*Leveillula taurica*) y tizón temprano (*Alternaria solani*), el manejo de estas plagas y enfermedades se realizó mediante un programa integrado que incluyó la aplicación de productos químicos y productos de origen botánico (Jaramillo et al., 2007).

Para el control de insectos se emplearon los insecticidas Fidato ® y Plenum ®, complementados con aplicaciones preventivas de extractos de ajo, extracto de clavo, jabón potásico y extracto de neem. Estas aplicaciones se realizaron de acuerdo con la presencia de plagas y las necesidades del cultivo, con el propósito de mantener las poblaciones por debajo de niveles que ocasionaran daños económicos (Jaramillo et al., 2007).

De manera preventiva, se implementó un programa de rotación de fungicidas químicos con intervalos de 15 días, con el objetivo de reducir el riesgo desarrollo de resistencia y mantener bajo control las enfermedades de origen fúngico. Las aplicaciones se realizaron sobre el follaje de las plantas, así como en pasillos y paredes del invernadero, contribuyendo a disminuir las fuentes potenciales de inóculo y la dispersión de patógenos dentro del área de producción (Jaramillo et al., 2007).

Las medidas implementadas permitieron mantener las poblaciones de plagas y la incidencia de enfermedades en niveles bajos durante el desarrollo del cultivo, favoreciendo el crecimiento y la productividad de las plantas.

3.8 Eliminación de brotes axilares

Esta práctica se inició el 8 de mayo de 2025 y consistió en la eliminación manual de los brotes axilares (chupones) presentes en las axilas de las hojas de todas las plantas. El objetivo de esta labor fue dirigir los fotoasimilados y nutrientes hacia el crecimiento del tallo principal y el desarrollo de los racimos florales y frutos, reduciendo la competencia por agua, luz y nutrimentos entre los brotes laterales y los órganos productivos de la planta, la eliminación de brotes se realizó semanalmente durante todo el ciclo del cultivo, procurando retirar los brotes cuando aún se encontraban en estado tierno para facilitar la operación y minimizar daños a la planta, (Navarrete y Jeannequin,2000; Castellanos, 2009).

3.9 Poda de hojas

La poda de hojas se realizó por primera vez el 30 de mayo de 2025. Esta práctica consistió en la eliminación gradual de las hojas basales, manteniendo entre 13 y 14 hojas funcionales por planta, con el fin de conservar un adecuado equilibrio entre crecimiento vegetativo y reproductivo del cultivo, (Jaramillo *et al.*, 2007). La poda se efectuó manualmente utilizando tijeras previamente desinfectadas, realizando los cortes lo más cerca posible del tallo para reducir el riesgo de infecciones y favorecer una adecuada cicatrización de los tejidos. Esta labor se llevó a cabo una vez por semana durante todo el periodo experimental. Durante cada intervención se eliminaron las hojas localizadas por debajo de los racimos ya cosechados, con el propósito de mejorar la penetración de la luz y la circulación de aire dentro del dosel vegetal. Asimismo, esta práctica contribuyó a reducir la humedad relativa alrededor de la planta, disminuyendo las condiciones favorables para el desarrollo de enfermedades de origen fúngico y facilitando las labores de manejo y cosecha (Jaramillo *et al.*, 2007).

3.10 Variables evaluadas

Las variables evaluadas durante el experimento se clasificaron en variables agronómicas e índices de calidad del fruto.

Variables agronómicas: Diámetro ecuatorial del fruto (DEF) en mm; diámetro polar del fruto (DPF) en mm; peso de fruto por racimo (PFPR) en g; peso promedio por racimo (PPR) en g y número de fruto por racimo (NFPR).

Índices de calidad: Firmeza del fruto (FF) en kg cm^{-2} ; sólidos solubles totales ($^{\circ}\text{Brix}$), contenido de vitamina C (VC) (%) y pH.

Diámetro ecuatorial (DEF) y diámetro polar (DPF) (mm): El DEF y el DPF de los frutos se determinaron utilizando un vernier digital LCD (pie de rey) con una precisión de 0.01 mm y una capacidad máxima de medición de 150 mm. El DE se midió en la parte más ancha del fruto, mientras que el DP se registró desde la base hasta el ápice de este. Para cada tratamiento se realizaron mediciones en los frutos de seis plantas correspondientes a cada unidad experimental.

Peso de fruto por racimo (PFPR) (g): Se determinó utilizando una báscula electrónica marca Rhino® con capacidad máxima de 8kg. Cada racimo cosechado fue pesado individualmente y los datos obtenidos se registraron en kilogramos.

Número de fruto por racimo (NFR): Esta variable se determinó mediante el conteo manual de los frutos presentes en cada racimo al momento de la cosecha. La evaluación se realizó semanalmente durante todo el periodo de producción.

Peso promedio por racimo (PPR) (g): Se tomaron los datos de medias de peso de frutos por racimo (PFPR) entre número de fruto por racimo (NFR), obteniendo así el peso promedio por racimo (PPR).

Firmeza en Kg/cm^{-2} (FF): La firmeza se evaluó mediante un penetrometro marca QA con capacidad de 13 kg y puntilla de 11 mm de diámetro. En cada fruto se realizaron dos perforaciones en lados opuestos de la zona ecuatorial, registrando la fuerza necesaria para penetrar la pulpa y expresando los resultados en kg cm^{-2} .

Sólidos solubles totales ($^{\circ}\text{Brix}$): Se determinaron utilizando un refractómetro marca ATAGO con rango de lectura de 0 a 32 $^{\circ}\text{Brix}$. Para la medición se colocó una muestra homogénea del jugo extraído del fruto sobre el prisma del equipo, evitando la presencia de residuos sólidos que pudieran efectuar la lectura. Los resultados se expresaron en $^{\circ}\text{Brix}$.

Vitamina C (VC): Se determinó mediante el método volumétrico descrito por la AOAC (1990). Para ello se utilizó una balanza electrónica digital marca Esnova modelo SE-2000, mortero, bureta de 50 mL, embudo de filtración, gasa, matraces Erlenmeyer de 125 y 250 mL, soporte universal, pipeta graduada, probeta graduada, vasos de precipitados y los reactivos correspondientes.

Se pesaron 10g de muestra fresca de tomate, los cuales fueron triturados en un mortero con 10 mL de ácido clorhídrico (HCl) al 2%. Posteriormente se agregaron 100 mL de agua destillada y la mezcla se filtró mediante gasa hacia un matraz Erlenmeyer de 250ml. Del filtrado obtenido se tomó una alícuota de 10 mL, la cual fue titulada con reactivo de Thielman (0.2 g de 2,6-dicloroindofenol) hasta la aparición de una coloración rosa persistente durante 30 segundos (AOAC,1990).

El contenido de vitamina C se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Mg/100g de vitamina C} = (\text{VRT} \times 0.088 \times \text{VT} \times 100) / (\text{VA} \times \text{P})$$

Donde:

VTR= Volumen gastado (mL) del reactivo de Thielman.

0.088 = Miligramos de ácido ascórbico equivalentes a 1 mL de reactivo de Thielman.

VT = Volumen total del filtrado (mL).

VA = Volumen de la alícuota valorada (mL).

P = Peso de la muestra (g).

pH: El pH del fruto se determinó utilizando un potenciómetro digital marca HANNA modelo HI98128. Las mediciones se realizaron directamente sobre el jugo obtenido de los frutos evaluados.

3.11 Diseño experimental

El experimento se estableció bajo un diseño de bloques completos al azar (DBA), conformado por cuatro tratamientos nutricionales, incluyendo un tratamiento, solución nutritiva convencional (T4) y tres tratamientos experimentales en tres niveles (T1, T2 y T3). Cada tratamiento conto con tres repeticiones y cada unidad experimental estuvo constituida por seis plantas de tomate, las cuales fueron consideradas para la evaluación de las variables agronómicas y de calidad del fruto.

Los tratamientos fueron distribuidos aleatoriamente dentro del área experimental con el fin de minimizar el efecto de factores externos sobre los resultados obtenidos.

En total se evaluaron 72 plantas, resultado de la combinación de cuatro tratamientos, tres repeticiones y seis plantas por unidad experimental.

El análisis estadístico de los datos se realizó mediante el software SAS. Para evaluar el efecto de los tratamientos sobre las variables estudiadas, se aplicó un análisis de varianza

(ANOVA) bajo un diseño completamente al azar con tres repeticiones y cuatro tratamientos. El modelo incluyó los efectos de repetición y tratamiento. Cuando se detectaron diferencias significativas entre tratamientos, se realizó una comparación de medias mediante la prueba de Tukey, considerando un nivel de significancia de $P \leq 0.05$.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Número de frutos por racimo (NFPR)

La figura 1, muestra el efecto de la diferencia significativa entre tratamientos para el NFR ($p \leq 0.005$). Los tratamientos T3 y T4 registraron los valores más altos, con promedios cercanos a 4.5 frutos por racimo, siendo estadísticamente iguales entre sí (grupo A). Por su parte, T1 presentó el valor más bajo, con aproximadamente 3.8 frutos por racimo, diferenciándose significativamente de T3 y T4 (grupo B).

El tratamiento T2 mostró un comportamiento intermedio, con un promedio cercano a 4.2 frutos por racimo, ubicándose en el grupo AB, por lo que no presentó diferencias estadísticas respecto a los tratamientos T1, T3 y T4.

Los resultados indican que el incremento en la concentración de la solución nutritiva favoreció la formación de frutos por racimo, observándose una tendencia a mayores valores en los tratamientos de mayor concentración. Estos resultados sugieren que los niveles más altos de fósforo y potasio, así como la solución nutritiva convencional, favorecieron la formación y el cuajado de frutos. El fósforo participa en procesos energéticos relacionados con la floración y el desarrollo reproductivo, mientras que el potasio interviene en la translocación de fotoasimilados hacia los órganos de almacenamiento, promoviendo una mayor producción de frutos.

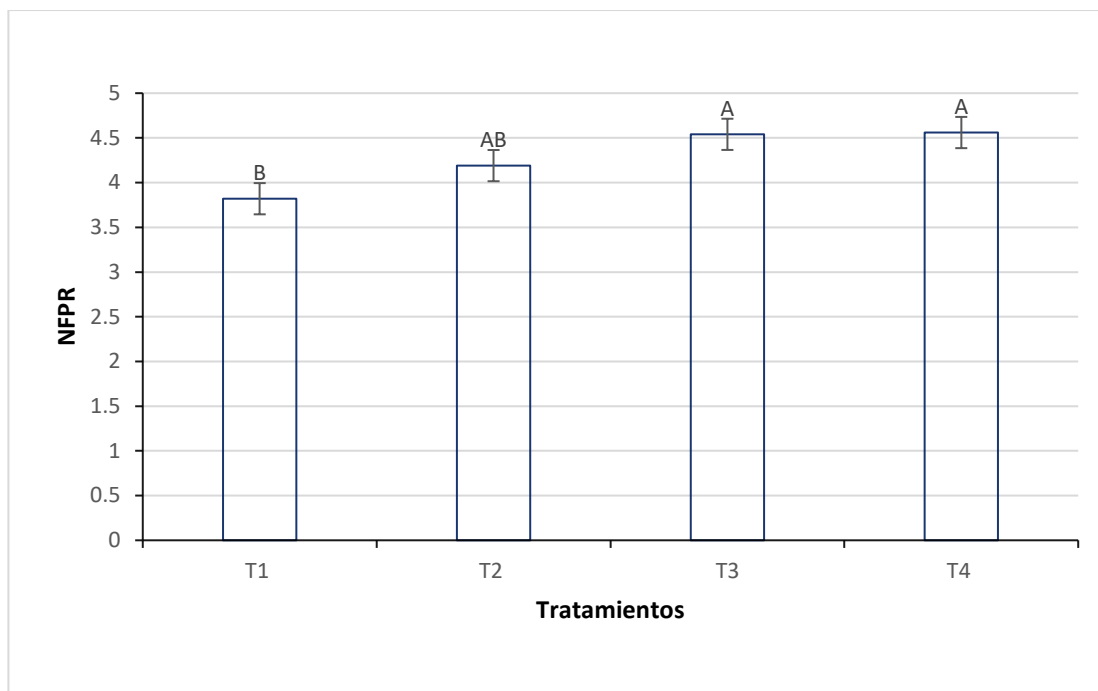


Figura 1: Efecto de diferentes soluciones nutritivas sobre el NFPR del tomate híbrido Retador F1. Barras con letras iguales no presentan diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Los resultados obtenidos concuerdan con los reportados por Armenta-Bojorquez et al. (2001), quienes observaron que el incremento en la disponibilidad de potasio mejoro la producción y el desarrollo reproductivo del tomate. Asimismo, Díaz-Vázquez al. (2023) señalaron que concentraciones superiores de la solución Steiner favorecieron la productividad del cultivo al incrementar la disponibilidad de nutrientes. De igual manera, Castellanos (2009), menciona que un adecuado balance nutrimental durante la etapa reproductiva favorece el cuajado y desarrollo de frutos en tomate cultivado bajo invernadero.

4.2 Peso promedio de fruto (PPR)

Se observaron diferencias significativas entre tratamientos para el PPF ($p \leq 0.05$). Siendo el T2 el que presentó el mayor valor con 163.40g por fruto, mientras que T3 registro el menor peso promedio con 94.21g. Los tratamientos T1 Y T4 mostraron valores intermedios de 158.85 y 151.31g, respectivamente. La reducción del peso individual observada en T3 puede explicarse por el incremento simultaneo en el número de frutos por racimo (Figura 2). Cuando aumenta la cantidad de frutos producidos, los

fotoasimilados deben distribuir entre mayor número de órganos reproductivos, reduciendo el peso individual de cada fruto.

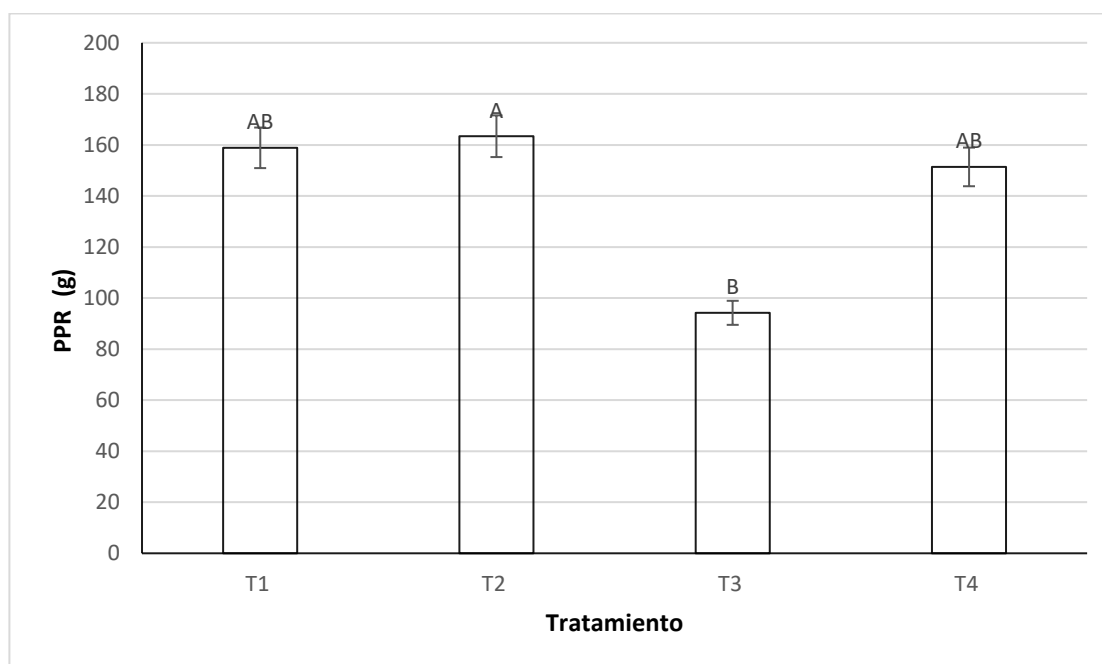


Figura 2: Efecto de diferentes soluciones nutritivas sobre PPR del tomate híbrido Retador F1. Los valores representan la media y la barras con letras iguales no presentan diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Resultados similares fueron reportados por Hernández-Díaz et al. (2009), quienes encontraron que diferentes relaciones nutrimentales influyeron significativamente en el peso promedio del fruto debido a cambios en la distribución de carbohidratos. Asimismo, Parra-Terraza et al. (2010) señalaron que las concentraciones de potasio en la solución nutritiva afectan el crecimiento y desarrollo de los frutos de tomate. Por su parte, Armenta-Bojórquez et al. (2001) indicaron que el potasio desempeña a su participación en el transporte de azúcares y regulación osmótica.

4.3 Sólidos solubles totales (°Brix)

En la figura 3, se muestra que el contenido de °Brix presentó diferencias significativas entre tratamientos ($p \leq 0.05$). Siendo el T3 el que obtuvo el mayor valor con 4.72 °Brix, mientras que T1 presentó el menor contenido con 4.24 °Brix. Los tratamientos T2 y T4 mostraron valores intermedios de 4.55 y 4.48 °Brix, respectivamente.

El incremento de los sólidos solubles en T3 puede atribuirse a una mayor disponibilidad de potasio, nutriente relacionado con el transporte y acumulación de azúcares en el fruto. Un mayor contenido de °Brix generalmente se asocia con mejor sabor y calidad organoléptica del tomate.

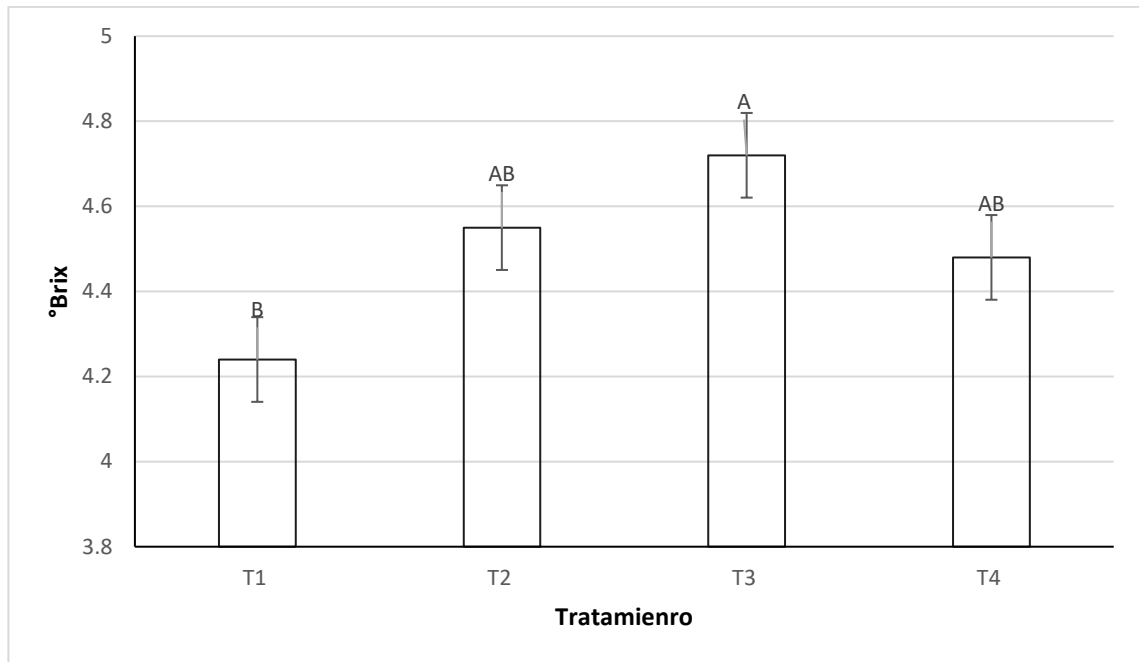


Figura 3: efecto de diferentes soluciones nutritivas sobre el contenido de sólidos solubles totales (°Brix) del tomate híbrido Retador F1. Los valores representan la media y la barras con letras iguales no presentan diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Estos resultados coinciden con los obtenidos por Armenta-Bojorquez et al. (2001), quienes reportan que niveles adecuados de potasio incrementaron la calidad del fruto y el contenido de sólidos solubles. De igual manera Luna-Fletes et al. (2018), encontraron que el manejo de la solución nutritiva influye significativamente en el contenido de azúcares y otro atributo de los elementos minerales más importantes para incrementar la concentración de sólidos solubles y mejorando la calidad comercial de los frutos de tomate.

4.4 Diámetro ecuatorial del fruto (DEF)

La Figura 4 muestra el comportamiento de la variable DEF en los cuatro tratamientos evaluados. Donde no se obtuvieron diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$), se observaron diferencias significativas entre algunos tratamientos.

El tratamiento T2 presentó el valor promedio más alto de DEF, con aproximadamente 64.98 mm, siendo estadísticamente superior al tratamiento T3, que registró el valor más bajo con cerca de 55.66 mm, mientras que los tratamientos T1 (61.96 mm) y T4 (55.66 mm) mostraron valores intermedios y compartieron grupos estadísticos con T2 y T3 (AB), por lo que no difirieron significativamente de estos tratamientos.

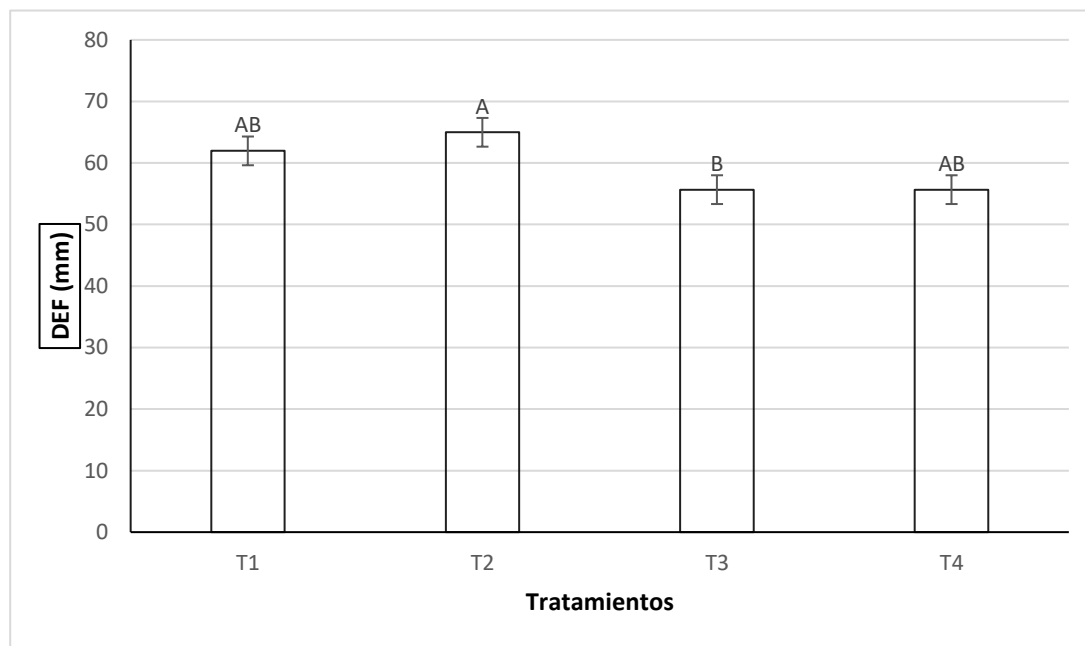


Figura 4: Efecto de diferentes soluciones nutritivas sobre el contenido de DEF del tomate híbrido Retador F1. Los valores representan la media y las barras con letras iguales no presentan diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

El mayor diámetro observado en T2 puede atribuirse a una concentración adecuada de fósforo y potasio, nutrientes que favorecen la división y expansión celular durante el crecimiento del fruto. el fosforo participa en los procesos de transferencia de energía y desarrollo celular, mientras que el potasio regula el transporte de carbohidratos y el balance hídrico de la planta, contribuyendo al desarrollo y tamaño del fruto (Marschner, 2012).

Estos resultados coinciden con los reportados por Doráis et al. (2001), quienes encontraron que una nutrición mineral balanceada incremento el tamaño de los frutos de tomate cultivados bajo condiciones de invernadero. Asimismo, Snneveld y Voogt (2009) señalaron que el manejo adecuado de la solución nutritiva favorece el crecimiento y desarrollo de los frutos al mejorar la absorción y distribución de nutrientes. De igual manera Bertín y Gérard (2018) reportaron que el suministro adecuado de nutrientes durante el desarrollo reproductivo influye positivamente en las dimensiones y calidad de los frutos de tomate.

El resultado obtenido en la presente investigación sugiere que una concentración intermedia de fosforo y potasio favorece el desarrollo del DEF, mientras que concentraciones más elevadas no necesariamente producen incremento adicional en esta variable.

4.5 Variables sin diferencias significativas

En la tabla 7, se muestran las variables de las cuales no se obtuvieron diferencias estadísticas: PFPR, RTF, VC, FF, DPF, pH. Los valores representados en medias con letras iguales dentro de la misma columna no presentan diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Tabla 6: Análisis de varianza entre los tratamientos evaluados sin diferencias significativas.

Tratamiento	PFPR g	FF kg cm⁻²	pH	VC	DPF mm	RTF Kg ha⁻¹
T1 (40P-200K)	606.90 A	7.75 A	4.00 A	6.80 A	86. 89 A	269728 A
T2 (60P-250K)	685.31 A	7.08 A	3.67 A	7.50 A	85. 74 A	304580 A
T3(80P-300K)	682.36 A	6.80 A	4.03 A	8.63 A	84. 49 A	303266 A
T4(Solución Steiner)	689.70 A	5.62 A	3.83 A	9.93 A	88.48 A	306529 A
CV (%)	5.37	12.48	6.04	17.65	4.85	5.37

El (PFPR) no presento diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos evaluados. Estos resultados coinciden con los que diferentes soluciones con los

obtenidos por Ojodeagua et al. (2008), quienes reportaron una productividad similar del tomate bajo diferentes sistemas de cultivo en invernadero. Asimismo, Velasco-Hernandez et al. (2004) señalaron que la evaluación de distintos sustratos no modificó significativamente algunas variables productivas del tomate. De igual manera, Lopez-Martinez et al. (2016) encontraron que diferentes soluciones nutritivas elaboradas con materiales orgánicas mantuvieron rendimientos comparables en la producción de tomate. Las variables rendimiento total de fruto, firmeza, pH, diámetro polar, diámetro ecuatorial y contenido de vitamina C no presentaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos ($p > 0.05$), lo que indica que las soluciones nutritivas evaluadas no modificaron significativamente estas características del híbrido Retador F1.

Los resultados presentados en la tabla 7 muestra la ausencia de diferencias en el rendimiento total de frutos sugiere que las concentraciones de fósforo y potasio utilizadas en los tratamientos fueron suficiente para satisfacer los requerimientos nutricionales del cultivo, permitiendo un desarrollo adecuado de las plantas independientemente de la solución nutritiva aplicada. Resultados similares fueron reportados por Díaz-Vázquez et al. (2023), quienes encontraron que diferentes concentraciones de la solución no siempre generan cambios significativos en algunas variables productivas cuando el suministro nutrimental cubre las necesidades fisiológicas del cultivo.

Respecto a las variables de calidad física del fruto, como firmeza (FF), diámetro polar (DPF), los resultados indican que las modificaciones en las concentraciones de fósforo y potasio no fueron suficientes para provocar cambios significativos en las características morfológicas de los frutos. En este sentido, Hernández-Díaz et al. (2009) señalaron que las variaciones en la nutrición mineral pueden influir sobre algunos parámetros de calidad, aunque su respuesta depende del genotipo, las condiciones ambientales y el manejo agronómico del cultivo.

Por otra parte, el pH y el contenido de VC, tampoco mostraron diferencias significativas entre tratamientos. Estos resultados coinciden con lo reportado por Luna-Fletes et al. (2028), quienes observaron que diferentes soluciones nutritivas no modificaron

significativamente algunos atributos químicos del fruto de tomate, debido a que estas variables están influenciadas no solo por la nutrición mineral, sino también por factores genéticos y ambientales.

En conjunto, los resultados obtenidos indican que, aunque las soluciones nutritivas evaluadas influyeron en el número de frutos por racimo, el peso promedio de fruto y el contenido de sólidos solubles totales, no tuvieron un efecto significativo sobre el rendimiento total ni sobre diversas variables físicas y químicas de calidad del híbrido Retador F1 bajo las condiciones de invernadero en que se desarrolló el experimento.

V. CONCLUSIONES

1. Las diferencias soluciones nutritivas evaluadas modificaron influyeron significativamente algunas variables de producción y calidad del tomate híbrido Retador F1 cultivado bajo condiciones de invernadero, particularmente el número de frutos por racimo, el peso promedio de fruto y el contenido de sólidos solubles totales.
2. Los tratamientos con mayores concentraciones de fósforo y potasio favorecieron el desarrollo reproductivo de las plantas, reflejándose en un mayor número de frutos por racimo. Los tratamientos T3 (80ppm de P Y 300ppm de K) y T4 (solución nutritiva convencional) presentaron los valores más altos para esta variable, lo que una adecuada disponibilidad de estos nutrientes contribuye al cuajado y desarrollo de frutos.
3. El tratamiento T2 (60ppm de P y 250 ppm de K) produjo el mayor peso promedio de frutos, lo que sugiere que esta combinación nutrimental favoreció la acumulación de biomasa y el crecimiento individual de los frutos.
4. El tratamiento T3 destacó por presentar el mayor contenido de sólidos solubles totales (°Brix), indicando una mejora en la calidad organoléptica del fruto. este comportamiento puede atribuirse a la participación del potasio en el transporte y acumulación de azúcares dentro del fruto.
5. Aunque se observaron diferencias significativas en algunas variables de producción y calidad, las diferentes soluciones nutritivas no afectaron significativamente el rendimiento total de fruto, la firmeza, el pH, el diámetro polar, el diámetro ecuatorial ni el contenido de vitamina C, lo que muestra que estas características fueron estables bajo las condiciones de evaluación.

6. Los resultados obtenidos permitieron concluir que la modificación de las concentraciones de fosforo y potasio en la solución nutritiva constituye una estrategia viable para mejorar atributos específicos de producción y calidad en tomate, particularmente el número de frutos por racimo y el contenido de solidos solubles totales.
7. De acuerdo con la variable evaluada, el tratamiento T3 (80 ppm de P y ppm de K) mostro la mejor respuesta general al combinar un elevado número de frutos por racimo con el mayor contenido de solidos solubles totales, por lo que puede considerarse una alternativa prometedora para la producción de tomate bajo condiciones de agricultura protegida.
8. Se recomienda utilizar el tratamiento T3 (80 ppm de fosforo y 300 ppm de potasio) en futuras investigaciones, debido a que presento un mayor número de frutos por racimo y el mayor contenido de solidos solubles totales (°Brix), características asociadas con una mejor calidad del fruto. Evaluar concentraciones superiores e intermedias de fósforo y potasio en la solución nutritiva para determinar el rango optimo que permitan incrementar simultáneamente el rendimiento y la calidad del tomate. Replicar la investigación en otros híbridos o variedades de tomate para determinar si la respuesta observada es específica del híbrido Retador F1 o puede extrapolarse a otro material genético.

VI. REFERENCIAS

1. Armenta-Bojorquez, A. D., Baca-Castillo, G. A., Alcantar-Gonzales, G., Kohasshi-Shibata, J., Valenzuela- URETA, J. G., & Guzmán- Maldonado, H. (2001). Relaciones de nitrato y potasio en fertirriego sobre la producción, calidad y adsorción nutrimental de tomate. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 7(1), 61-68.
<https://doi.org/10.5154/r.rchsh.1999.11.073>
2. Acquaah, G. (2012). *Fundamentos de horticultura* (5.ª ed.). Pearson Educacion.
3. Agrios, G. N. (2005). *Plant pathology* (5th ed.). Elsevier Academic Press.
4. AOAC. (1990). *Official methods of analysis* (15th ed.). Association of Official Analytical Chemists.
5. Bertin, N., & Génard, M. (2018). *Tomato quality as influenced by preharvest factors*. *Scienti Horticulturae*.
6. Blanca, J., Cañizares, J., Roig, C., Roig, C., Ziarsolo, P., Nuez, F. & Pico, B. (2012). Variation revealed by SBNP genotyping and morphology provides insight into the origin of the tomato. *PLoS ONE*, 7(10), e48198.
7. BioStar México. (s.f.). Aminofol MgFeZn. <https://biostar.mx>
8. BioStar México. (s.f.). Aminofol Micros. <https://biostar.mx>
9. BioStar México. (s.f.). Aminofol Potasio. <https://biostar.mx>
10. BioStar México. (s.f.). Prevence T3. <https://biostar.mx/productos/prevence-t3/>
11. Castellanos, J.Z. (2009). *Manuel de producción de tomate en invernadero*. Intagri.
<https://www.intagri.com/articulos/horticultura-protegida/por-que-se-realiza-la-poda-en-tomate>
12. Consumer Eroski. (2020). El tomate.
<https://www.consumer.es/alimentacion/el-tomate.html>

13. Delices, G., Leyva Ovalle, O. R., Mota-Vargas, C., Núñez Pastrana, R., Gámez Pastrana, R., Meza, P. A., & Serna-Lagunes, R. (2019). Biogeografía del tomate *Solanum lycopersicum var.cerasiforme* (Solanaceae) en su centro de origen (Sur de América) y de domesticación (México). *Revista de Biología Tropical*, 67(4), 1023-1036.
14. Desnoux, N., Wajnberg, E., Wyckhuys, K. A. G., Burgio, G., Arpaia, S., Narváez-Vasquez, C. A., Gonzales-Cabrera, J., Catalán Ruescas, D., Tabone, E., Frandon, J., Pizzol, J., Poncet, C., Cabello, T., & Urbaneja, A. (2010). Biological invasión of European tomand crops by *Tuta absoluta*: Ecology, geographic expansión and prospects for biological control. *Journal of Pest Science*, 83(3), 197-215.
15. Díaz-Vázquez, F. A., Cabrera-De la Fuente, M., Benavides-Mendoza, A., Robledo-Torres, V., Juárez-Maldonado, A., Garcia-Leon, Á., & Sandoval-Rangel, A.(2023). *Influencia de cuatro concentraciones de solución Steiner sobre los nutrientes en la solución del suelo y productividad en tomate (Solanum lycopersicum L.)*. *Terra Latinoamericana*, 41 1-15.
<https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1646>
16. Dorais, M., Papadopoulos, A. P., & Gosselin, A. (2001). Greenhouse tomato fruit qualiti. *Horticultura Reviews*, 26,239-319.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470650813>
17. Food and Agriculture Organization (FAO). (2020). Cultivo del tomate.
<https://www.fao.org/home/en/>
18. FAO. (2020). FAOSTAT Statistical Database. Organización de las Nacionales Unidas para la alimentación y la Agricultura.
<https://www.fao.org/faostat>
19. FAO. (2021). World FOOD and Agriculture-Statistical Yearbook 2021. Organización de las Naciones Unidas Para la Alimentación y la Agricultura.
<https://www.fao.org>
20. Food and Agriculture Organization (FAO). (2020). FAOSTAT: Agricultural and livestock products.
<https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>

21. Food and Agriculture Organization (FAO). (2021). World food and agricultura statistical yearbook 2021.
<https://doi.org/10.4060/cb4477en>
22. FAOSTAT. (2023). Crops and Livestock Products Database. Organización de las Naciones Unidad para la Alimentación y la A gricultura.
<https://www.fao.org/faostat>
23. Fitoagícola. (2025). Tomate Retador F1. Disponible en: Ficha comercial Retador F1.
<https://www.fitoagricola.es/tomate-retador-f1-1000-semilla>
24. Harris Moran Seed Company. (2021). Tomate hibrido Retador F1 [Etiqueta comercial de semilla].
<https://www.harrismoran.com>
25. Howe, H. F., & Smallwood, J. (1982). Ecology of seed dispersal. Annual Review of Ecology and Systematics, 13, 201-228.
<https://doi.org/10.1146/annurev.es.13.110182.001221>
26. Howard M. Resh. (2013). Hydroponic food production (7th ed.). CRC Press.
27. Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Skrumsager, I., & White, P. (2012). *Functions of MacronutrientS*. En Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants.
<https://shop.elsevier.com/books/marshners-mineral-nutrition-of-higher-plants/marschner/978-0-12-384905-2>
28. Jaramillo, J., Rodríguez, V. P., Guzmán, M., Zapata, M., & Rengifo, T. (2007). Buenas prácticas agrícolas en la producción de tomate bajo condiciones protegidas. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).
29. Jones, J.B., Zitter, T. A., Momol, T.M. & Miller, S. A. (2014). *Compendium of Tomato Diseases and Pests*. APS Press.
30. Hernandez-Diaz, M. I., Chailoux-Laffita, M., Moreno, V., et al. (2009). *Relaciones nitrógeno-potasio en fertirriego para el cultivo protegido del tomate*. Pesquisa Agropecauria Brasileira, 44(5). 429-436).

31. Kader, A. A. (ED.). (2002). Postharvest technology of horticultural crops (3rd ed.). University of California, Agriculture and Natural Resources.
32. Kimura, S., & Sinha, N. (2008). Tomato (*Solanum lycopersicum*): A model fruit-bearing crop. Cold Spring Harbor Protocols, 2008, pdb. emo105.
<https://doi.org/10.1101/pdb.emo105>
33. Klee, H.J. & Giovannoni, J.J. (2011). Genetics and control of tomato fruit ripening and quality attributes. *Annual Review of Genetics*, 45, 41-59.
34. Klee, H. J., Resende, M. F. R., Jr. (2020). Plant domestication: Reconstructing the route to modern tomatoes. *Current Biology*, 30, R359-R361.
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2020.02.072>
35. Klee, H. J., & Resende, J. T. V. (2020). Tomato breeding and production Advances and challenges. Springer Nature.
36. Li, R. X., Cai, F., Pang, G., Shen, Q. R., Li, r., & Chen, W. (2015).
37. Solubilisation of phosphate and micronutrients by *Trichoderma harzianum* and its relationship with the promotion of tomato plant growth. *PLOS ONE*, 10(6), e0130081.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130081>
38. Luna-Fletes, J.A., Can-Chulim, Á., Cruz-Crespo, E., Bugarin-Montoya, R., & Valdivia-Reynoso, M. G. (2018). *Internsidad de raleo y soluciones nutritivas en la calidad de tomate cherry*. *Revista fitotecnia mexicana*, 41(1), 59-66.
<https://doi.org/10.35196/rfm.2018.1.59-66>
39. López-Martínez, J. D., Vázquez-Díaz, D. A., Esparza-Rivera, J. R., García-Hernández, J. L., Castruita-Segura, M. A., & Preciado-Rangel, P. (2016). *Rendimiento y calidad nutracéutica de frutos de tomate producidos con soluciones nutritivas preparadas con materiales orgánicos*. **Revista Fitotecnia Mexicana**, 39(4), 409–414.
<https://doi.org/10.35196/rfm.2016.4.409-414>
40. Marschner, P. (2012). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*, (3rd ed.). Academic press.
<https://shop.elsevier.com/books/marschners-mineral-nutrition-of-higher-plants/marschner>

41. Marin, L. M. (2017). Manuel técnico del cultivo de tomate.
<https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-10921.pdf>
42. Melon, N. C., Souza, L. C., Silva, V. F. A., Gomes, R. F., Oliveira Neto, C. F., & Coata, D. L. P. (2014). *Cultivo de tomate (Solanum lycopersicum) hidropónico bajo diferentes niveles de fosforo y potasio en solución nutritiva*. Revista Agroecosistemas, 6(1), 10-18.
<https://doi.org/10.35196/rfm.2018.1.59-66>
43. Mugavero, M. (2024). Evaluación del rendimiento y calidad comercial de híbrido F1 de tomate. Disponible en: Trabajo de investigación UNNOBA.edu.ar
<https://repositorio.unnoba.edu.ar/%20Martina%20Mugavero%20ing.repositorio.unnoba.edu.ar>
44. Navarrete, M., & Jeannequi, B. (2000). Effect of frequency of axillary bud pruning on vegetative growth and fruit yield in greenhouse tomato crops. Scientia Horticulturae, 86(3), 197-210.
45. Ojodeagua Arredondo, J. L., Castellanos Ramos, J. Z., Munoz Ramos, J., J-.Alcantar Gonzalez G., Tijerina Chavez, L., Vargas Tapia, P., & Enriquez Reyes, S. (2008).
46. Peralta, I. E., & Spooner, D. M. (2000). Classification of wild tomatoes: A review. Kurtziana , 28819, 45-54. *Eficiencia de suelo y tezontle en sistemas de producción de tomate en invernadero*. **Revista Fitotecnia Mexicana**, 31(4), 367–374.
<https://doi.org/10.35196/rfm.2008.4.367>
47. Peralta, I.E. & Spooner, D.M. (2007). History, origin and early cultivation of tomato. En *Genetic improvement of Solanaceous Crops*.
48. Peralta, I. E., Spooner, D. M., & Knapp, S. (2008) The taxonomy of tomatoes and wild relatives (*Solanum sect. Lycopersicoides*, *sect. Juaglandifolia*, *sect. Lycopersicon*; *Solanaceae*). American Society of Plant Taxonomists.
49. Procuraduría Federal del Consumidor (PROFECO). (2020) Jitomate, versátil y nutritivo.
<https://www.gob.mx/profeco/articulos/jitomate-versatil-y-nutritivo>

50. Parra-Terraza, S., Salas-Ñuñez, E., Villarreal-Romero, M., Hernandez-Verdugo, S., & Ramirez-Legarreta, M. R. (2012). *Relaciones nitrógeno/a, nitrógeno/urea y concentraciones de potasio en la producción de plántulas de tomate*. Revista Chapingo serie Horticultura 16(1), 37-47.
<https://revista.chapingo.mx/horticultura>
51. Rodriguez-Huerta, L. (2024). Morfofisiología y nutrición vegetal del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) bajo sistemas de producción intensiva. Editorial Universitaria Agraria.
52. Roger A. C. Jones. (2003). Plant virus emergence and evolution: Origins, new encounter scenarios, factors driving emergence, effects of changing world conditions, and prospects for control.
53. Resh, H.M. (2013). *Hydroponic Food Production (7th ed.)*. CRC Press.
54. Sonneveld, C., & Voogt, W. (2009). *Plant Nutrition of Greenhouse Crops*. Springer.
<https://link.springer.com/book/10.1007/978-90-481-2532-6>
55. Salazar, J. F. (2019). El silicio (Si) Como mineral multifuncional en la agricultura.
<https://dspace.utb.edu.ec/server/api/core/bitstreams/51f82bba-ad734478-b7d4-38dca3e2e543/content>
56. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2024). Estadísticas de producción agrícola. Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural.
<https://www.gob.mx/siap>
57. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2025). Panorama Agroalimentario 2025. Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural.
https://nube.agricultura.gob.mx/panorama_dgsiap/2025.pdf
58. Steiner, A. A. (1984). *The universal nutrient solution*. Proceedings of the Sixth International Congress on Soilless Culture, Wageningen, The Netherlands.
59. Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I., & Murphy, A. (2018). *Plant Physiology and Development* (6th ed.). Sinauer associates.
<https://global.oup.com/academic/product/plant-physiology-and-development>
60. Universidad Tecnológica de la Mixteca. (2013). El jitomate Rosapa'ak o Riñón.
61. Velasco-Hernández, E., Miranda-Velázquez, I., Nieto-Ángel, R., & Villegas-Rodríguez, H. (2004). *Evaluación de sustratos y variedades en la producción*

protegida de jitomate. Revista Chapingo Serie Horticultura, **10**(2), 239–246.
<https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2003.12.084>

62. Waheed, K., Nawaz, H., Hanif, M. A., & Rehman, R. (2019). Tomato. En M. A. Hanif, H. Nawaz, M. Khan, & H. Byrne (Eds.), *Medicinal plants of South Asia: Novel sources for drug Discovery* (pp.631-644=. Elsevier.