



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE PARASITOLOGÍA AGRÍCOLA



MAESTRÍA EN CIENCIAS EN PROTECCIÓN VEGETAL

***Tobamovirus tabaci* PARA AFRONTAR EL ESTRÉS HÍDRICO EN PLANTAS DE JITOMATE (*Solanum lycopersicum*)**

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN
PROTECCIÓN VEGETAL**

Presenta:

OCOTL MONTES MARIA DE LOS ANGELES

Bajo la supervisión de:

**DRA. ERIKA JANET ZAMORA MACORRA
CO-DIRECTOR: LUIS FRANCISCO SALOME ABARCA**



APROBADA



Chapingo, Estado de México, junio 2026

Tobamovirus tabaci PARA AFRONTAR EL ESTRÉS HIDRICO EN PLANTAS DE
JITOMATE (*Solanum lycopersicum*)

Tesis realizada por **Maria de los Angeles Ocotl Montes** bajo la supervisión del
Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial
para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN PROTECCIÓN VEGETAL

DIRECTORA:



DRA. ERIKA JANET ZAMORA MACORRA

CODIRECTOR:



DR. LUIS FRANCISCO SALOME ABARCA

ASESOR:



DR. LUCIANO MARTÍNEZ BOLAÑOS

ÍNDICE

LISTA DE CUADROS	VI
DEDICATORIA	VIII
AGRADECIMIENTOS.....	X
DATOS BIOGRÁFICOS	XII
RESUMEN GENERAL	XIII
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Descripción del problema.....	3
1.1.1. Importancia del cultivo de jitomate en el mundo.....	3
1.1.2. Los desafíos de producir jitomate en el mundo	2
1.1.3. Importancia del cultivo de jitomate en México	3
1.1.4. Los desafíos de producir jitomate en México	5
1.1.5. La paradoja de pasar del virus como amenaza al virus como posible alternativa para enfrentar el estrés hídrico en las plantas de jitomate.....	7
1.2. Pregunta de investigación	8
1.3. Hipótesis de investigación	8
1.4. Objetivos de investigación	9
1.4.1. Objetivos específicos.....	9
1.6. LITERATURA CITADA.....	10
CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA	13
2.1. REVISIÓN DE LA LITERATURA	13
2.2. El cultivo de jitomate.....	18
2.2.1. Origen del jitomate	18

2.2.2. Clasificación taxonómica del jitomate.....	19
2.2.3. Descripción de la planta de jitomate	20
2.2.4. Condiciones necesarias para el cultivo de jitomate.....	23
2.2.5. Manejo del cultivo de jitomate	24
2.3. Los virus en las plantas de jitomate	27
2.3.1. Los virus que afectan el jitomate	27
2.3.2. Los <i>Tobamovirus</i> en el cultivo de jitomate	28
2.4. Estrés hídrico en plantas de jitomate	30
2.4.1. Estrés en la agricultura.....	30
2.4.2. Estrés hídrico	31
2.4.3. Efectos del estrés hídrico sobre las plantas de jitomate.....	33
2.4.4. Comportamiento de defensa de las plantas ante el estrés hídrico	35
2.5. LITERATURA CITADA	36
CAPÍTULO 3. RESPUESTA MORFOFISIOLÓGICA Y METABÓLICA DE PLANTAS DE JITOMATE A INFECCIONES DE VIRUS DEL MOSAICO DEL TABACO DURANTE ESTRÉS HÍDRICO	40
3.1. RESUMEN.....	40
3.2. INTRODUCCIÓN.....	42
3.3.0. Localización y condiciones del experimento	43
3.3.1. Descripción del sitio experimental	43
3.3.2. Condiciones ambientales	43
3.4. Material biológico	44
3.4.1. Material vegetal: Hospedero <i>Solanum lycopersicum</i> L. var. 'Aztek'	44

3.4.2. Material viral: Aislamiento de <i>Tobamovirus tabaci</i> (<i>Tobacco Mosaic Virus</i>) (TMV)	45
3.4.2.1. Origen y mantenimiento de fuentes de inóculo viral	45
3.4.2.2. Extracción de ARN total.....	46
3.4.2.3. Retrotranscripción-Reacción en Cadena de la Polimerasa (RT-PCR)	47
3.4.2.4. Electroforesis en gel de agarosa	48
3.5. Establecimiento y manejo del cultivo	49
3.5.1. Germinación y sustrato utilizado	49
3.5.2. Trasplante y manejo agronómico.....	49
3.6. Inoculación del virus.....	50
3.6.1. Preparación y estandarización del inóculo (Macerado, solución amortiguadora de fosfatos).	50
3.6.2. Protocolo de inoculación mecánica	51
3.7. Diseño experimental y análisis estadístico.....	52
3.7.1. Unidades experimentales y tratamientos.....	52
3.7.2. Establecimiento del estrés hídrico y modelo estadístico	53
3.8.1. Variables morfológicas	54
3.8.2. Variables pomológicas.....	54
3.9. Preparación de extractos vegetales	55
3.9.2. Cuantificación de flavonoides totales	56
3.9.3. Determinación de Potencial Antioxidante (DPPH·)	56
3.10 Resultados y discusión	57
3.10.1. Análisis de crecimiento y respuesta bioquímica a la infección de virus del mosaico del tabaco y a diferentes frecuencias de riego.....	59
3.10.2. Análisis de Componentes Principales (PCA).....	69

3.11. CONCLUSIONES	76
3.12. LITERATURA CITADA	77
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES GENERALES	80
4.1. Anexos	81

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Producción mundial de jitomate 2024	1
Cuadro 2. Porcentaje de exportación de jitomate por país 2024.	3

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplo de variedades de jitomate con diversos colores.....	5
Figura 2. Resultados experimento interacción virus y estrés hídrico en cultivo de jitomate. la columna VD refiere a infectada con virus y estrés hídrico, la cual se compara directamente con la columna HD que es sin virus y también con estrés hídrico.	17
Figura 3. Flor y fruto de jitomate.	21
Figura 4. Flor de la planta de jitomate.....	22
Figura 5. Plántulas de jitomate listas para transplantar.....	25
Figura 6. Tutorado en el cultivo de jitomate	26
Figura 7. Lesiones por tobamovirus en jitomate.....	29
Figura 8. Viriones de Tobamovirus	30
Figura 9. Sintomatología sistémica observada en plantas de jitomate var. ‘Aztek’ infectadas con el Tobamovirus tabaci (Virus Mosaico del Tabaco) Los síntomas iniciales, caracterizados por un mosaico foliar y ligera deformación, se manifestaron a los 12 días después de la inoculación mecánica (ddi).	46
Figura 10. Sustrato y siembra de jitomate cherry variedad ‘Aztek’.....	49

Figura 11. Trasplante de plántulas de <i>Solanum lycopersicum</i> var “Aztek”	50
Figura 12. Preparación del tejido foliar mediante la aplicación de carborundum	51
Figura 13. Porte y desarrollo morfológico general de la variedad experimental ‘Aztek’	54
Figura 14. Evaluación de variables pomológicas y de calidad en frutos de la variedad ‘Aztek’	55
Figura 15. Electroforesis en gel de agarosa (1.5%) de productos de RT-PCR con peso esperado (500 pb)	57
Figura 16. Comparación del desarrollo fenotípico de <i>Solanum lycopersicum</i> var. ‘Aztek’ bajo distintos regímenes de frecuencia de riego en plantas sanas (macetas verde y naranja) e infectadas (macetas vino, azul y rosa). Ambos tratamientos se mantuvieron con la misma frecuencia de riego. De izquierda a derecha: 1, 2, 5 y 7 días.	58
Figura 17. Comparación del crecimiento y desarrollo de <i>Solanum lycopersicum</i> var. ‘Aztek’ bajo condiciones testigo con riego cada 24 h.	59
Figura 24. Dispersión multivariada basada en el Análisis de Coordenadas Principales (PCoA) para los grupos de intervalo de riego y condición sanitaria.	74

DEDICATORIA

A Dios, el primer agricultor, por ser guía y fortaleza constante, permitiéndome florecer y encontrar propósito incluso en los tiempos de mayor sequía.

A mi familia, por ser el suelo firme donde crecí:

A mis padres, por ser la raíz que sostiene mis sueños y el ejemplo vivo de que todo lo que se cuida con amor y paciencia rinde los mejores frutos.

A mis hermanos, por su apoyo incondicional y por creer en mí en cada etapa; gracias por ser el abono necesario que nutrió mi perseverancia cuando las fuerzas faltaban.

A mis sobrinos, quienes con su alegría y luz son el recordatorio más dulce de por qué vale la pena esforzarse; son mi motivación y la mayor alegría de este proceso.

A mis cuñados, por integrarse a este camino y brindarme su respaldo y compañía en los momentos clave.

A mi abuela y mis tíos, por ser la herencia de sabiduría y el refugio de amor que me mantiene conectada a mis orígenes; gracias por su presencia y por ser parte de mi historia.

A mis directores de tesis, Dra. Erika Janet y Dr. Luis Francisco, por su guía experta y su paciencia. Gracias por compartir conmigo la sabiduría necesaria para cultivar este conocimiento y por ayudarme a transformar la curiosidad en ciencia.

Finalmente, a mí misma por la tenacidad de sostener mis metas y el coraje de no soltar mi propia mano en los momentos de incertidumbre. Esta tesis es el testimonio de que, con fe, familia y disciplina, la perseverancia siempre alcanza su mejor cosecha.

A las semillas eternas que florecen en silencio dentro de mi jardín interior, por convertirse en la luz tenue que guía mis pasos y en la fuerza invisible que me

enseñó a seguir sembrando aun en medio de las tormentas. Su esencia vive entre mis raíces, acompaña cada una de mis cosechas y habita en la esperanza con la que hoy cierro este ciclo.

Con cariño y gratitud
Maria de los Angeles Ocotl Montes

AGRADECIMIENTOS

A Dios, el autor de la vida y el primer sembrador, por ser mi roca y mi guía en cada etapa de este camino. Gracias por darme la templanza para enfrentar las tormentas, la paciencia para esperar los tiempos de cosecha y por permitir que mi fe floreciera a la par de este proyecto. Tu gracia fue el sol que iluminó mis días de incertidumbre y la fuerza que me permitió llegar a este cumplimiento.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por el apoyo económico otorgado, el cual fue fundamental para el desarrollo y culminación de mis estudios de posgrado.

A la Universidad Autónoma Chapingo, mi alma mater, y al Posgrado en Ciencias en Protección Vegetal, por abrirme sus puertas y brindarme las herramientas académicas necesarias para mi formación profesional.

A mis directores, la Dra. Erika Janet Zamora Macorra y el Dr. Luis Francisco Salomé Abarca, por su invaluable guía, su tiempo y su confianza en este proyecto. Gracias por compartir su conocimiento y por orientarme con paciencia en el rigor de la investigación.

Al Dr. Luciano Martínez Bolaños por su compromiso y dedicación.

Al Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, por las facilidades otorgadas para el uso del Laboratorio de Fisiología Postcosecha, pieza clave en la obtención de los resultados de esta tesis.

A Doña Mary, por su apoyo incondicional en los procesos administrativos, pero sobre todo por su calidez humana y respaldo que fue mucho más allá de lo profesional.

A la Sra. Isidora y a Maribel, por su valiosa ayuda y disposición en el Laboratorio de Fisiología Postcosecha del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo.

A mis amigos y compañeros de camino:

A Ruth Ocotl, mi mejor amiga, por estar siempre presente, por la escucha y el apoyo incondicional que me mantuvo firme.

A Eduardo, por su invaluable ayuda en las jornadas de riego y por permanecer, incluso en los cambios y las despedidas. Gracias por tu apoyo constante durante esta etapa.

A Pablo, por su asesoría y disposición para desmenuzar la estadística de este trabajo.

A JAPM, por su apoyo fundamental en la toma de datos finales y por ser el respaldo constante en el cierre de esta investigación; pero, sobre todo, por ser mi respaldo absoluto en cada aspecto de mi vida durante este proceso. Gracias por tu entrega incondicional, por sostenerme en lo moral y en lo presente, y por ser la serenidad y la fuerza necesarias para culminar con éxito esta investigación.

A todas aquellas personas que, de manera directa o indirecta, me brindaron una palabra de aliento, su ayuda en el invernadero o su compañía en el laboratorio. Cada gesto contribuyó a que este fruto hoy sea una realidad.

Con cariño y respeto
Maria de los Angeles Ocotl Montes

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre: Maria de los Angeles Ocotl Montes

Fecha de nacimiento: 29 de agosto 1995

Lugar de nacimiento: San Bernardino Chalchihuapan, Ocoyucan, Puebla

CURP: OOMA950829MPLCNN08

Profesión: agrónoma en Horticultura protegida

Desarrollo Académico

Bachillerato: Emiliano Zapata 2010 -2013

Propedéutico: Preparatoria Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo, 2013 - 2016.

Licenciatura: Agrónomo en Horticultura Protegida, Universidad Autónoma Chapingo, 2015 - 2019.

Maestría: M. C. en Protección Vegetal, Universidad Autónoma Chapingo, 2024 – 2025

RESUMEN GENERAL

***Tobamovirus tabaci* PARA AFRONTAR EL ESTRÉS HÍDRICO EN PLANTAS DE JITOMATE**

El jitomate (*Solanum lycopersicum*) es un pilar de la alimentación mundial, pero su producción enfrenta desafíos críticos debido al cambio climático y al estrés hídrico, responsable del 29% de las pérdidas abióticas. Ante este escenario, surge la paradoja de utilizar al Virus del Mosaico del Tabaco (TMV) no como una amenaza, sino como un modulador potencial de la tolerancia a la sequía en la variedad 'Aztek'. Evaluar la influencia de la infección por TMV en la respuesta al estrés hídrico mediante el análisis del desarrollo biométrico, la partición de biomasa y el sistema de defensa antioxidante (fenoles, flavonoides y capacidad DPPH). Se empleó un diseño factorial con cuatro frecuencias de riego (1, 2, 5 y 7 días) y dos condiciones sanitarias. La presencia viral se validó mediante RT-PCR. Se realizó el fraccionamiento de órganos, deshidratación a 50 °C y extracción asistida por ultrasonido. Los análisis químicos incluyeron los métodos de Folin-Ciocalteu, cloruro de aluminio y la técnica DPPH para determinar la actividad antioxidante. Bajo estrés hídrico severo (7 días), las plantas inoculadas con TMV mostraron mayor estabilidad estructural (tallo de 21.40 cm) y un sistema radicular más robusto (0.71 g de biomasa seca) que las plantas sanas (18.37 cm y 0.38 g). Mientras que las plantas sanas bajo estrés extremo no alcanzaron producción comercial (0%), las plantas con TMV conservaron la fructificación (1.42 frutos/planta) con mayores sólidos solubles (8.6 °Brix). Bioquímicamente, la interacción virus-sequía incrementó significativamente la capacidad antioxidante (DPPH) en frutos (71.89) frente a los sanos (57.79). La infección por TMV actúa como un modulador positivo en la variedad 'Aztek', induciendo una reprogramación metabólica que favorece el desarrollo radicular y la defensa antioxidante, permitiendo la supervivencia y producción bajo condiciones de restricción hídrica severa.

Palabras clave: *Solanum lycopersicum*, TMV, estrés combinado, DPPH, biomasa.

GENERAL ABSTRACT

***Tobamovirus tabaci* FOR COPING WITH WATER STRESS IN TOMATO PLANTS**

The tomato (*Solanum lycopersicum*) is a staple of the global diet, but its production faces critical challenges due to climate change and water stress, which accounts for 29% of abiotic losses. Given this scenario, a paradox emerges: using the Tobacco Mosaic Virus (TMV) not as a threat, but as a potential modulator of drought tolerance in the 'Aztek' variety. To evaluate the influence of TMV infection on the response to water stress by analyzing biometric development, biomass partitioning, and the antioxidant defense system (phenols, flavonoids, and DPPH capacity). A factorial design was used with four irrigation frequencies (1, 2, 5, and 7 days) and two disease conditions. Viral presence was validated by RT-PCR. Organ fractionation, dehydration at 50 °C, and ultrasound-assisted extraction were performed. Chemical analyses included the Folin-Ciocalteu and aluminum chloride methods, as well as the DPPH technique to determine antioxidant activity. Under severe water stress (7 days), plants inoculated with TMV exhibited greater structural stability (stem length of 21.40 cm) and a more robust root system (0.71 g of dry biomass) than healthy plants (18.37 cm and 0.38 g). While healthy plants under extreme stress failed to reach commercial production levels (0%), TMV-infected plants-maintained fruit set (1.42 fruits/plant) with higher soluble solids (8.6 °Brix). Biochemically, the virus-drought interaction significantly increased antioxidant capacity (DPPH) in fruits (71.89) compared to healthy ones (57.79). TMV infection acts as a positive modulator in the 'Aztek' variety, inducing metabolic reprogramming that promotes root development and antioxidant defense, enabling survival and production under conditions of severe water stress.

Keywords: *Solanum lycopersicum*, TMV, combined stress, DPPH, biomass.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1. INTRODUCCIÓN

El jitomate es uno de los cultivos más importantes del planeta, siendo base de la alimentación en la mayoría de los países y una de las verduras más consumidas por la población. Esto se debe a su facilidad de integración en platillos básicos de ingesta cotidiana, pero también a su aportación nutricional rica en vitaminas, minerales y antioxidantes. Por ello, históricamente la demanda de este ha crecido de manera multiplicativa, necesitando cada vez más esfuerzos productivos e inversiones (Zavala, 2023).

A pesar de su relevancia, el cultivo de jitomate enfrenta cada vez más amenazas y desafíos, que ocasionan principalmente bajo rendimiento productivo, pérdidas económicas y disminución del deseo de continuarlo. La mayoría pueden englobarse como estrés de tipo biótico y abiótico, entre los que destacan plagas, heladas, altas temperaturas, escasez de agua y volatilidad en precios de insumos. Esto dificulta la actividad agrícola para plantarlo, cuidarlo y cosecharlo (Krishna et al., 2022).

Las altas temperaturas y la escasez de agua, que se muestran con claridad en zonas que experimentan sequía frecuente, son algunos de los más relevantes problemas que enfrenta el jitomate en el mundo. La consecuencia directa de estos en las plantas de ese cultivo es el estrés hídrico, que se entiende como la insuficiencia de agua disponible para cubrir en el corto plazo los requerimientos de la planta, por lo que se activan diversas respuestas fisiológicas que disminuyen su crecimiento y desarrollo (Nava, 2023).

El estrés hídrico es uno de los factores que más pérdidas ocasionan en el cultivo del jitomate, las cuales no solamente son a nivel de producción de la hortaliza, sino también en términos de inversión, empleos y de tipo social al encarecerse el precio y haber menos cantidad de producto disponible. Se calcula que como amenaza a esta hortaliza, es causante de alrededor del 29% de las huertas

malogradas en todo el mundo, dentro de la categoría de estrés abiótico (Akram et al., 2024).

Además, el problema se acentúa cada vez más ante el aumento de la temperatura mundial con origen en el cambio climático, el crecimiento de la superficie de zonas áridas, la menor recurrencia de lluvias y que ese estrés hídrico se acompaña de otros factores adversos. En la actualidad ya se ha alcanzado un 16% de suelo con algún grado de aridez con respecto del total en el mundo (Turan et al., 2023), aunque cultivar jitomate necesita cada vez más superficie.

Esta situación ha generado gran preocupación mundial, por lo que los productores de este sistema de producción agrícola están ávidos de encontrar soluciones para enfrentar el estrés hídrico por medio del fortalecimiento a las plantas de jitomate, incluso en opciones que pueden considerarse inesperadas, como es el caso de experimentar con agentes patógenos que, aunque también amenazan la sobrevivencia del cultivo, al utilizarlos bajo condiciones específicas de control, pueden ayudar a que este sea más resiliente a la falta de agua (Conti et al., 2023).

Por eso, el objetivo de este trabajo de investigación es evaluar la influencia de la infección por el Virus del Mosaico del Tabaco (TMV) como modulador de la tolerancia al estrés hídrico en plantas de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.), mediante el análisis de su desarrollo biométrico, la partición de biomasa y la respuesta del sistema de defensa antioxidante. Para lograrlo, se organiza en cuatro capítulos. El primero es el planteamiento de la investigación, en el que se describen el problema, la pregunta, la hipótesis y los objetivos.

El segundo capítulo es el marco teórico, que se compone de la revisión de la literatura, así como del desarrollo de los aspectos clave del tema que se estudia, como son cultivo de jitomate, y la relación de los virus y el estrés hídrico con estas plantas. En el capítulo tres se desarrolla el experimento del uso del virus TMV en plantas de jitomate para comprobar sus efectos positivos en términos de

mejorar su resistencia hídrica. El cuarto capítulo está dedicado a determinar los compuestos fenólicos y la actividad antioxidante vinculada al experimento.

1.1. Descripción del problema

1.1.1. Importancia del cultivo de jitomate en el mundo

El jitomate (*Solanum lycopersicum*) es uno de los principales cultivos para alimentos que hay en el mundo, al ubicarse entre los tres que más se plantan y producen. Además de su facilidad para incluirlo en la dieta cotidiana, aporta minerales esenciales como fósforo, calcio y hierro. Similarmente, brinda vitaminas A y C, al igual que antioxidantes como glutatión y licopeno (Zavala, 2023). Los datos estadísticos demuestran que China es el mayor productor de jitomate con 52.5 millones de toneladas cada año, mientras que Estados Unidos es el país que más importa esta verdura (Platas, 2021).

En términos económicos, el mercado internacional de jitomate es de 2,433 millones de dólares anuales, por lo que se trata de uno de los más dinámicos en relación con la agricultura (Mexicano-Santoyo et al., 2025). Entre 2007 y 2017 la producción mundial de jitomate creció en alrededor de 30%, lo que llevó a 182 millones de toneladas anualmente usando 5 millones de hectáreas con un rendimiento medio de 3.7 kilogramos por metro cuadrado (López y Matey, 2022).

El país con un nivel productivo más bajo es la India con 2.5 kilogramos por metro, pero de hasta 9 kilogramos en Estados Unidos y España. Se ha documentado como un caso extremo el de Holanda, con hasta 50 kilogramos de jitomate por metro cuadrado (López y Matey, 2022). La producción de jitomate se ha incrementado en los últimos años y en el 2021 llegó a 189 millones de toneladas, como se muestra en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Producción mundial de jitomate 2024

<i>País</i>	<i>Toneladas</i>	<i>%</i>
1 China	67,636,725	35.76
2 India	21,181,000	11.20
3 Turquía	13,095,258	6.92
4 Estados Unidos	10,475,265	5.54
5 Italia	6,644,790	3.51
6 Egipto	6,245,787	3.30
7 México	4,149,240	2.19
8 Brasil	3,679,160	1.95
Otros	56,026,729	29.62
Total	189,133,955.04	100.00

Fuente: Tomado de Hernández-Soto y Alcalde-Jiménez (2024).

En cuanto al consumo, se calcula que en promedio cada persona se alimenta con 20 kilogramos por año (López y Matey, 2022). El mercado mundial de jitomates no está dedicado enteramente al consumo fresco de este producto ya que el 25% del total se usa de manera industrial para pasta, jugo, conservas, deshidratados y salsas. En esto, los líderes mundiales son Estados Unidos, China, Italia y Turquía (Solís y Pinto, 2020).

. Algunas de estas presentaciones industriales son pasta, puré, distintas salsas, sopa, cátsup, polvo deshidratado, conservas y otros modos de jitomate en lata. En la actualidad, se produce en alrededor de 170 países de todo el planeta, por adicionalmente se le considera uno de los alimentos protectores con base en su alta concentración de nutrientes, entre vitaminas y minerales (Kumar et al., 2025).

1.1.2. Los desafíos de producir jitomate en el mundo

Aunque el jitomate es una de las hortalizas más producidas y consumidas en el mundo, se enfrenta a cada vez mayores amenazas provocadas por distintos factores. El más preocupante es el cambio climático y la disponibilidad de agua potable, pues esto afecta directamente la sobrevivencia de los cultivos en diversas partes del planeta. La disponibilidad de agua es causante en la actualidad de una gran cantidad de pérdidas, no sólo agrícolas, sino también económicas y sociales (Turan et al., 2023).

Por ejemplo, en la actualidad el 16% del suelo total existente en el mundo son zonas áridas o presentan algún grado de aridez. En estas zonas es frecuente experimentar falta de lluvia o poca recurrencia de esta, irregularidad en el acceso al agua, o tener que esperar largas temporadas de tiempo para acceder al riego que se necesita para dar continuidad al cultivo. Este problema aumenta aún más con el efecto del cambio climático, lo que impone retos más grandes para estos lugares donde ya escaseaba el agua (Turan et al., 2023).

El estrés abiótico en plantas, en el que el estrés hídrico es uno de los más importantes, causa alrededor del 70% de las pérdidas que tiene el cultivo de jitomate en todo el mundo. La falta de agua o la irregularidad en el riego se considera el estrés abiótico más agresivo y destructivo en el cultivo de jitomate, pues esta hortaliza es altamente sensible ya que su material genético le hace carecer de resistencia al estrés hídrico, al perder de inmediato su equilibrio homeostático (Krishna et al., 2022).

Dentro de los diferentes tipos de estrés abiótico, la temperatura representa el 20% de los casos de pérdidas, mientras que la salinidad es el 10%, el de tipo hídrico (ausencia o poca disponibilidad de agua) es el 9%, el frío sucede en el 7% de las situaciones y otros estreses equivalen al 4%. El de temperatura se refiere a que esta aumenta más allá del rango que se considera pertinente para el crecimiento y desarrollo del cultivo, por lo que podría sumarse al hídrico, siendo en agregación del 29% (Akram et al., 2024).

1.1.3. Importancia del cultivo de jitomate en México

México es considerado el principal exportador de jitomate en el mundo, teniendo como comprador más importante a Estados Unidos, el cual adquiere el 99.7% de la producción nacional destinada a exportación. Se ha estimado que México cultiva alrededor de 2.2 millones de hectáreas de jitomate por año, de las cuales 80 mil tienen un rendimiento productivo promediado en 28.7 toneladas por hectárea. En total, México genera aproximadamente 45 millones de toneladas de jitomate en cada anualidad (Platas, 2021).

En términos proporcionales, se sabe que México tiene una participación del mercado mundial que equivale del 23% al 25% (ver Cuadro 2) del total del jitomate comercializado para exportación (Mexicano-Santoyo et al., 2025). Al interior, esta hortaliza tiene una importancia que equivale al 8.4% del total de economía generada por el sector agrícola. Una de las razones de esto son las condiciones climáticas, de suelo y posición geográfica que hacen propicia su producción (Montaño et al., 2021).

Cuadro 2. Porcentaje de exportación de jitomate por país 2024.

<i>País</i>	<i>Toneladas</i>	<i>%</i>
1 México	1,903,779	23.13
2 Países Bajos	954,518	11.60
3 España	660,093	8.02
4 Marruecos	629,510	7.65
5 Turquía	606,583	7.37
6 Afganistán	312,104	3.79

Fuente: Tomado de Hernández-Soto y Alcalde-Jiménez (2024).

El área noreste del país es la que más produce jitomate, siendo Sinaloa el principal estado productor. Además, a México se le considera históricamente centro de domesticación del jitomate, fortaleciendo cada vez su posición en el mercado mundial. Una razón para esto es que se tiene una gran variedad, pudiendo producir distintas formas de jitomate, como saladette, bola, tipo pera, chino criollo, cereza, en forma de riñón y ojo de venado (Pérez-Díaz et al, 2020).

De esta manera, se puede afirmar que México posee una ventaja competitiva fuerte en comparación con otros países para lograr una buena producción de jitomate y comercializarlo. Otras entidades, además de Sinaloa, que destacan por la cantidad que cultivan de esta hortaliza son Baja California, Michoacán, San Luis Potosí, Jalisco, Zacatecas y Baja California Sur, entre otros con mínima participación. Y aunque Sinaloa es el número uno, otras entidades como Jalisco y Zacatecas demuestran un crecimiento más acelerado (Montaño et al, 2021).

El jitomate está asociado a México históricamente pues es el primer lugar de domesticación de este, es decir, de lograr que transitara de ser plantas silvestres de rendimiento muy bajo, a cultivarse con propósito y bajo demanda de consumo. Hoy en día, México ofrece un catálogo de variedades de esta hortaliza único en todo el mundo, ofreciendo frutos de diversos tamaños y colores como amarillos, naranjas y rojos (Figura 1) (Sandoval-Ceballos et al, 2021).



Figura 1. Ejemplo de variedades de jitomate con diversos colores.

Fuente: Tomado de Pertíñez (2023).

1.1.4. Los desafíos de producir jitomate en México

La demanda de jitomate crece continuamente, al incorporarse cada vez más en los hábitos de consumo de la población, por su versatilidad para utilizarse en una gran cantidad de platillos. Esto presenta retos importantes a los productores, quienes tienen que buscar mejores formas de mejorar el rendimiento y también de defenderse ante factores adversos que comprometen tanto la cantidad como la calidad de jitomate que puede ofrecerse. Uno de estos es la irregularidad y variabilidad del clima (Platas, 2021).

Otro factor es la falta de agua, lo cual es cada vez más recurrente, teniendo que racionar la cantidad que se utiliza, pero también buscar proteger los cultivos ante las sequías que se presentan más extensamente. También, están las heladas, la erosión del suelo, la pérdida de fertilidad de este, la aparición de salinidad excesiva, entre otros. A eso se adiciona la inestabilidad del precio en el mercado del jitomate que, en ocasiones, lleva a pérdidas económicas incontrolables (Platas, 2021).

En este sentido, un cada vez mayor consumo de jitomate aunado a la crisis hídrica ocasionada por el cambio climático son los dos principales desafíos que enfrenta el cultivo de jitomate en el mundo. En 2022 la población mundial llegó a 8 mil millones de seres humanos y se estima que en 2050 alcance un 25% adicional, lo que se traduce directamente en multiplicar la necesidad de consumo de esa hortaliza. Sin embargo, al mismo tiempo, superficies que antes eran fértiles y cultivables ya no lo son, lo que es resultado del aumento de la temperatura global y de la carencia de agua (Nava, 2023).

La necesidad de cultivar jitomate se ve amenazada directamente al saberse que desde la Revolución Industrial y hasta la actualidad, la temperatura mundial ha crecido en 1.1 grados centígrados, lo que materializa el llamado cambio climático. A esto se agrega que en las próximas décadas se estima que esta temperatura global será aún mayor en una medida de hasta 2 grados centígrados más. Esto se traduce directamente en que, en ciertas partes del mundo, quizá las más productivas, la cantidad y frecuencia de las lluvias se reduzca significativamente (Conti et al, 2023).

Así, los casos de carencia de agua para cultivar se acrecientan enormemente. Un indicador claro de esto es que las estimaciones de demanda de agua llegarán a su punto más alto históricamente para el año 2050, que podría ser de hasta el doble al actual, con un efecto paralelo contrario de disponibilidad del vital líquido para usarlo en la agricultura, que se podrá reducir hasta a la mitad. Esto potencia el reto de cultivar y cosechar jitomate, haciéndolo una actividad de alta complejidad (Conti et al, 2023).

Cuando se intenta producir jitomate en suelos donde la temperatura es de 35 grados centígrados o superior, es sabido que el potencial productivo en términos de cantidad y también de calidad se ve afectado. Si a esto se adiciona la dificultad para realizar riegos como es debido, el cultivo en general se enfrenta a estrés hídrico severo, con los correspondientes efectos adversos que produce. De ahí la necesidad de buscar todas las alternativas posibles que permitan enfrentarlos

y que, a pesar de las condiciones climáticas no deseables, se recupere la rentabilidad de producción (Nava, 2023).

1.1.5. La paradoja de pasar del virus como amenaza al virus como posible alternativa para enfrentar el estrés hídrico en las plantas de jitomate

La falta de agua, y por tanto el estrés hídrico, ha provocado que empresas, laboratorios, productores y académicos busquen alternativas para que las plantas de jitomate sean más tolerantes y resistentes a este suceso. Es una forma de prepararse para el futuro ante la predicción de que el cultivo de jitomate deberá realizarse en condiciones cada vez más adversas, sobre todo con el cambio climático avanzando (Conti et al, 2023).

Esto ha llevado, inclusive, a buscar soluciones donde antes sólo se veían amenazas. Como puede notarse en Prakash et al (2024), es el caso de los virus que históricamente habían constituido agentes que afectaban la supervivencia, el desarrollo y el rendimiento de los cultivos. Aunque no se trata de todos los virus, sino solamente algunos que han demostrado ofrecer ciertos beneficios, como aumentar la tolerancia ante el estrés hídrico, cuando se les emplea bajo condiciones controladas (Roy et al, 2025).

El *Tobamovirus tabaci*, anteriormente conocido como *Tobacco Mosaic Virus (TMV)*, es uno de los virus que ha generado importantes afectaciones en el cultivo de tabaco y otras solanáceas, como el cultivo de jitomate, las que se manifiestan por medio de deformaciones en las hojas (enaciones), mosaicos y clorosis y reducción del crecimiento y el desarrollo de las plantas. Esa es la interacción más conocida que puede plantearse entre el virus y el jitomate. Sin embargo, al igual que otros virus fitopatógenos, el TMV puede estar infectando a sus huéspedes sin ocasionarle síntomas, pero sí beneficios (Roy et al, 2025).

Uno de estos, entre varios identificados, es la resistencia, resiliencia o tolerancia ante situaciones de poca agua o ausencia de esta, que se traduce en que las plantas experimentan estrés hídrico. Una forma concreta en que hace eso es por medio de fortalecer a los osmoprotectores y también al activar instrumentos de defensa que ayudan a no soltar el agua y a conservar la que ya se tiene. Aunque se trate de estudios iniciales que necesitan mucha más experimentación y confirmaciones (Roy et al, 2025).

Pero se trata de evidencias iniciales que dan cuenta de la capacidad que tienen el virus y la planta de beneficiarse mutuamente cuando se generan determinadas condiciones, logrando que las plantas incrementen su capacidad de adaptarse a crisis y sobrevivir (Roy et al, 2025). Ante este escenario, es pertinente ahondar en la aportación de evidencia científica que fortalezca la hipótesis de que ciertos virus, bajo circunstancias controladas, pueden ayudar al cultivo de jitomate a resistir el estrés hídrico.

1.2. Pregunta de investigación

¿De qué manera la infección por el *Tobamovirus tabaci* (TMV) modula la respuesta fisiológica y bioquímica en plantas de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) para conferir tolerancia ante condiciones de estrés hídrico?

1.3. Hipótesis de investigación

La infección por *Tobamovirus tabaci* (= Virus del Mosaico del Tabaco) (TMV) induce una respuesta de priming o preconditionamiento fisiológico en plantas de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.), la cual atenúa los efectos negativos del déficit hídrico. Esta tolerancia se manifiesta mediante una regulación eficiente de la translocación de recursos y un incremento en la biosíntesis de metabolitos secundarios (fenoles y flavonoides), fortaleciendo el sistema de defensa antioxidante y permitiendo una mayor estabilidad de la biomasa en comparación con plantas sanas bajo condiciones de estrés.

1.4. Objetivos de investigación

Evaluar la influencia de la infección por el (*Tobamovirus tabaci*) (=Virus del Mosaico del Tabaco) (TMV) como modulador de la tolerancia al estrés hídrico en plantas de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.), mediante el análisis de su desarrollo biométrico, la partición de biomasa y la respuesta del sistema de defensa antioxidante.

1.4.1. Objetivos específicos

- Determinar el efecto de la interacción virus-sequía sobre el número de hojas, longitud de tallo, número de flores y fructificación en diferentes etapas del estrés hídrico.
- Cuantificar la acumulación de materia fresca y seca en los diferentes órganos (raíz, tallo, hojas y frutos), así como la elongación radicular, para determinar la capacidad de mantenimiento de biomasa bajo condiciones de déficit hídrico.
- Cuantificar la concentración de compuestos fenólicos y flavonoides totales en los órganos de la planta para identificar cambios en las rutas biosintéticas inducidos por la infección viral y el estrés hídrico.
- Evaluar la capacidad antioxidante total (mediante la técnica DPPH) para establecer si la infección viral mejora la aptitud de la planta para neutralizar el estrés oxidativo provocado por la escasez de agua.

1.6. LITERATURA CITADA

- Akram, S., Saleem, Y., Rehman, A., Wadood, A., Hameed, A., & Sajjad, S. (2024). Identification of drought-tolerant tomato genotypes using multi-trait index at early growth stage. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. <https://doi.org/10.1007/s42729-024-01649-0>
- Conti, V., Parrotta, L., Romi, M., Del Duca, S., & Cai, G. (2023). Tomato biodiversity and drought tolerance: A multilevel review. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(12), 10044. <https://doi.org/10.3390/ijms241210044>
- Hernández-Soto, D., & Alcalde-Jiménez, M. E. (2024). Un análisis de la competitividad del tomate mexicano en el mercado de Estados Unidos. *The Journal of Globalization, Competitiveness, and Governability*, 18(3). Dialnet PDF del artículo
- Krishna, R., Akhter, W., Soumia, P. S., Yadav, A., Kumar, D., Kumar, S., Kumar, A., Singh, M., & Prakash, J. (2022). Biotechnological interventions in tomato (*Solanum lycopersicum*) for drought stress tolerance: Achievements and future prospects. *BioTech*, 11(4), 48. <https://doi.org/10.3390/biotech11040048>
- Kumar, H., Lata, R., Sundar, S., Sangh, D., Singh, H., & Yadav, G. C. (2025). Scientific advances in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) cultivation, agronomic innovation and genetic improvement: A comprehensive review. *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*, 28(10), 781–803. ResearchGate PDF del artículo
- López, B. J., & Matey, W. A. (2022). *Tolerancia de seis cultivares de tomate (Solanum spp.) a Ralstonia solanacearum* [Smith (1896) Yabuuchi et al., 1996], en el Centro Experimental El Plantel, Masaya, 2020* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria]. Repositorio Institucional UNA. Repositorio Institucional UNA

- Mexicano-Santoyo, L., Medina-Saavedra, T., Arroyo-Figueroa, G., Marín-Sánchez, A., Montalvo-García, E., & Castro-Jácome, T. (2025). Aplicación de insumos orgánicos: Su efecto en variables de calidad del fruto de jitomate. *Abanico Agroforestal*, 7, 1–9. Dialnet PDF del artículo
- Montaño, I. E., Valenzuela, I. N., & Villavicencio, K. V. (2021). Competitividad del tomate rojo de México en el mercado internacional: Análisis 2003–2017. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(7). SciELO PDF del artículo
- Nava, E. (2023). *Producción de jitomate (Solanum lycopersicum L.) con aplicaciones de ácido salicílico y algas marinas bajo malla sombra** [Tesis de maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo]. Repositorio UMSNH
- Pérez-Díaz, F., Arévalo-Galarza, M. L., Pérez-Flores, L. J., Lobato-Ortiz, R., & Ramírez-Guzmán, M. E. (2020). Crecimiento y características postcosecha de frutos de genotipos nativos de tomate (*Solanum lycopersicum L.*). *Revista Fitotecnia Mexicana*, 43(1), 89–99. Revista Fitotecnia Mexicana PDF
- Pertíñez, M. C. (2023). *Estudio sobre el comportamiento fisiológico de 6 variedades de tomate (Solanum lycopersicum L.) sometidas a estrés hídrico en invernadero** [Trabajo de fin de grado, Universidad Politécnica de Madrid]. Repositorio UPM
- Platas, L. (2021). *Estrategias de manejo sustentable del cultivo de jitomate (Solanum lycopersicum L.) en invernadero** [Tesis de licenciatura, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla]. Repositorio BUAP
- Prakash, V., Sharma, V., Devendran, R., Prajapati, R., Ahmad, B., & Kumar, R. (2024). A transition from enemies to allies: How viruses improve drought resilience in plants. *Stress Biology*, 4, 33. <https://doi.org/10.1007/s44154-024-00172-2>

- Roy, A., Bhattacharjee, B., & Hallan, V. (2025). Dancing with the enemy: Symbiotic relationships between plant RNA viruses and their hosts. *Frontiers in Plant Science*, 16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1716996>
- Sandoval-Ceballos, M. G., Andwe, N., Charles, J. H., Martínez-Guerra, G., Ramírez-Ramírez, I., Maldonado-Peralta, R., Marshall, L., Bosch, C., Cruz-Huerta, N., Gonzalez-Santos, R., León, P., Chávez-Servia, J. L., González-Hernández, V. A., Phelps, J., & Toledo-Ortiz, G. (2021). The importance of conserving Mexico's tomato agrobiodiversity to research plant biochemistry under different climates. *Plants, People, Planet*, 3, 703–709. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10218>
- Solís, E. R., & Pinto, A. D. J. (2020). *Evaluación de rendimiento y calidad organoléptica de 5 cultivares de tomate (Solanum lycopersicum) para pasta, en dos localidades en el departamento de Chiquimula 2019*. Programa Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria, CRIA Oriente–Cadena de Tomate. Informe PDF ICTA
- Turan, M., Ekinici, M., Argin, S., Brinza, M., & Yildirim, E. (2023). Drought stress amelioration in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) seedlings by biostimulant as regenerative agent. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1211210. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1211210>
- Zavala, M. R. (2023). *Caracterización morfológica del fruto de líneas avanzadas de jitomate (Solanum lycopersicum L.) nativo del sureste de México** [Tesis de licenciatura, Tecnológico Nacional de México]. Repositorio TecNM

CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. REVISIÓN DE LA LITERATURA

El estudio del impacto que tiene el estrés hídrico en las plantas de jitomate es de gran interés. Sin embargo, una línea de investigación que es relativamente nueva refiere a la utilización de infecciones virales como estrategia para hacer frente de forma más efectiva. Algunos de los autores que han aportado en este camino investigativo son Prakash et al. (2024) por medio de su artículo de investigación titulado *“A transition from enemies to allies: how viruses improve drought resilience in plants”*.

El objetivo de esa investigación fue hacer una revisión sistemática para indicar cómo los virus pasaron de ser entidades biológicas acelulares que afectan el crecimiento y el desarrollo de las plantas, a considerarse que podrían ayudar a estas a resistir vulnerabilidades y estrés de distintos tipos, siendo el más relevante el hídrico. Concretamente, los autores exploran los mecanismos de reacción o de respuesta que se ponen en marcha cuando existen infecciones virales antes de comenzar algún tipo de estrés (Prakash et al., 2024).

Los investigadores parten del hecho de que el estrés hídrico será cada vez más frecuente, lo que pone en amenaza el rendimiento del cultivo de jitomate. De ahí que se busque indagar en los virus los beneficios que pueden obtener, cuando se cumplen ciertas circunstancias en los cultivos. Esto sucede concretamente al permitir la utilización de los virus de forma controlada para que las plantas activen sus propios mecanismos de defensa y esto sirva a combatir otras amenazas (Prakash et al., 2024).

Los virus de los que se ha obtenido evidencia que pueden provocar beneficios sobre el cultivo de jitomate, son aquellos cuyo genoma está compuesto por RNA, incluyendo a los tobamovirus. Aunque se advierte que no todos los cultivos responden igual, así como tampoco todos los virus provocan beneficios y cuando lo hacen, no es de la misma forma. De ahí que sea necesario realizar

experimentos diferentes para conocer con certeza esa interacción entre virus y cultivo, e identificar también las condiciones que son necesarias para potenciar los buenos resultados y mitigar los que no (Prakash et al., 2024).

Dos de esos mecanismos que se ponen en marcha y se mantienen en implementación ante el uso controlado de virus, son los osmo protectores y la agregación de antioxidantes. Estos combaten y reducen las Especies Reactivas de Oxígeno (ROS), que son comunes en situaciones de estrés y son causantes de oxidación y provocan daños en las células, a tal grado que se genera la muerte de estas y el daño al tejido vegetal (Prakash et al., 2024).

En un estudio similar realizado por Turan et al (2023) y el que titularon como *“Drought stress amelioration in tomato (Solanum lycopersicum L.) seedlings by biostimulant as regenerative agent”*, se analizaron los efectos que ocasiona el uso de bioestimulantes en los parámetros de crecimiento plantas de jitomate, tales como las rizobacterias, considerando diferentes escenarios de riego, siendo uno de estos el que ocasiona el estrés hídrico. Estos autores definen a los bioestimulantes como sustancias que aportan nutrientes tanto a las plantas como al suelo.

La metodología utilizada contempla un cultivo de jitomate realizado bajo condiciones de protección, específicamente en invernadero. La humedad observada fue de 60 a 70%, la temperatura estuvo entre 23 y 27 grados centígrados en el día, así como de 16 a 20 grados centígrados durante la noche. El estudio se condujo desde la siembra de la planta, siguiendo todo el proceso de manejo al permitir que la semilla germine y trasplantar la plántula al estar esta lista. Se aplicaron bioestimulantes y bacterias, tales como *Azotobacter chroococcum* (Turan et al., 2023).

La duración desde la siembra y hasta finalizar el experimento fue de 45 días. Las plantas se dividieron en dos grupos, una con condiciones regulares de agua y otra con déficit de esta. Ambos fueron tratados con los mismos bioestimulantes. Los impactos del estrés hídrico fueron evidentes, midiéndose diámetros y altura

de plantas, tallos y raíces, teniendo decrementos que sobrepasan el 20%. Similar comportamiento se tuvo en el contenido de agua, clorofila y otras sustancias que deben estar presentes en las plantas (Turan et al., 2023).

Sin embargo, también se encontró que los bioestimulantes provocaron que esos efectos negativos no fuesen tan amplios. Concretamente, se observó que la actividad antioxidante de las plantas se incrementó entre 38% y 82%, según el caso estudiado, logrando una protección de la planta. También, creció la materia orgánica presente y algunos minerales y nutrientes necesarios para el crecimiento, como calcio, magnesio, entre otros, en una medida que va de 51% a 71% (Turan et al., 2023).

Por su parte, Mishra y colaboradores (2021) revisaron la relación entre el estrés abiótico (por sequía) y biótico (por virus) en plantas de tomate "*Interplay between abiotic (drought) and biotic (virus) stresses in tomato plants*" y plantearon la importancia de revisar y conocer la relación e interacción que se logra en las plantas de jitomate cuando se le somete al estrés que genera la falta de agua y también al que provoca la exposición al virus *Yellow Leaf Curl Virus*. Su hipótesis fue que el virus en el cultivo de jitomate, al interactuar con el estrés hídrico, puede contribuir a que las plantas regulen sus defensas, lo que igual podría resultar en debilitarlas o fortalecerlas.

Esto significa que el virus hace que la planta cambie al prepararse para enfrentar la dificultad que le impone el ambiente, cuando al mismo tiempo el estrés hídrico afecta el virus ocasionándole expresarse con menor virulencia que lo normal. Sin el virus, las plantas de jitomate no tienen en alerta sus defensas y, por lo tanto, está en completa vulnerabilidad ante la falta de agua. La hipótesis se planteó en términos de que el virus debe ser aplicado a las plantas de tal manera que se generen respuestas en sus procesos fisiológicos para prepararse (Mishra et al., 2021).

En la revisión de la literatura que hicieron esos autores encontraron que diversos académicos han generado evidencia acerca de cómo algunos virus han ayudado

a que las plantas de jitomate enfrenten los efectos del estrés hídrico. Algunos de los virus con los que se ha experimentado son *Brome Mosaic Virus*, *Tobacco Mosaic Virus*, *Cucumber Mosaic Virus*, entre otros. Concretamente, las defensas que se activan son la mayor presencia de antioxidantes, así como de osmo protectores (Mishra et al., 2021).

En el estudio realizado, los autores encontraron que las plantas de jitomate que son expuestas a virus son más resistentes al estrés hídrico que aquéllas que no son infectadas por el virus. Para el experimento, crearon cuatro grupos de análisis. El primero de plantas sanas y con riego adecuado. El segundo de plantas saludables, pero sujetas a estrés hídrico. El tercero de plantas con virus, pero con riego adecuado. El cuarto con virus, pero en estrés hídrico. A los grupos con carencia agua se les garantizó una dotación mínima de esta, de apenas 50 mililitros, para evitar su muerte y que finalizara el experimento (Mishra et al., 2021). Uno de los efectos observado es que las plantas con virus reflejaron un menor crecimiento que aquéllas sin este, aunque las que tuvieron el virus y fueron sometidas a estrés hídrico lograron sobrevivir, ser tolerantes y continuar creciendo (Figura 2).

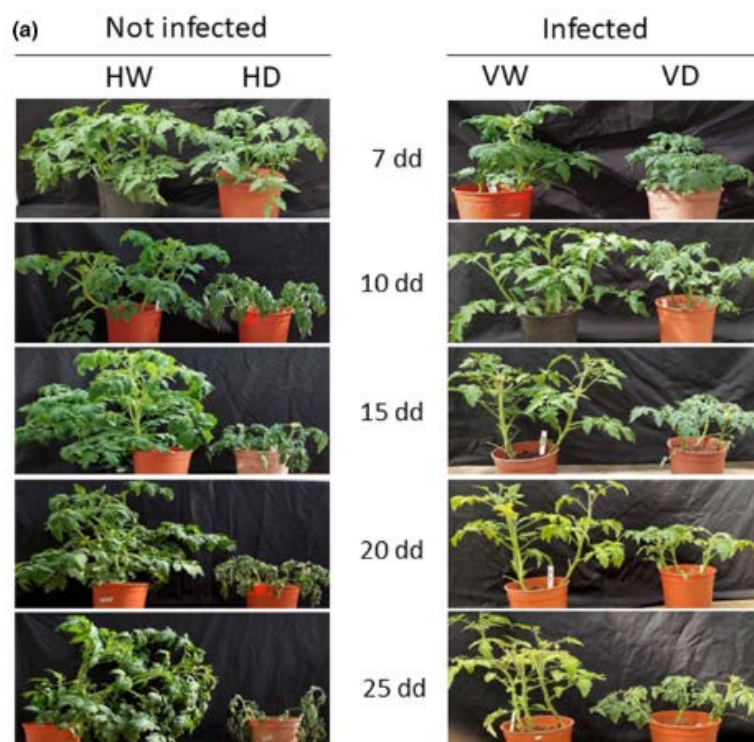


Figura 2. Resultados experimento interacción virus y estrés hídrico en cultivo de jitomate. La columna VD refiere a infectada con virus y estrés hídrico, la cual se compara directamente con la columna HD que es sin virus y también con estrés hídrico.

Fuente: Tomado de Mishra et al., (2021).

En una publicación más reciente, Ho et al., (2026) analizaron cómo la infección por el virus “*Tomato yellow leaf curl virus*” promovió la tolerancia ante el estrés hídrico en tomate (*Solanum lycopersicum* L.), similar a como lo realizaron Mishra et al (2021), analizaron cómo la interacción de un virus y del estrés hídrico en las plantas de jitomate, puede llevar a que estas adquieran una mayor capacidad de tolerancia a condiciones difíciles de altas temperaturas y falta de agua.

La idea que sustenta la elaboración de esa investigación es que el comportamiento de las plantas de jitomate es diferente cuando experimenta los efectos de los estrés biótico y abiótico, en donde mientras los primeros pueden ayudarles a prepararse mediante cambios en sus procesos fisiológicos y bioquímicos, mediante respuestas de defensa, los segundos las debilitan

directamente y las mantiene vulnerables por completo, sin protección y con carencia de la posibilidad de responder activamente (Ho et al., 2026).

En lo que refiere el estrés hídrico, las plantas de jitomate tuvieron la habilidad de resistir o tolerar la disminución de agua o el pasar más tiempo sin esta. Para demostrar eso, los autores aislaron el virus *yellow leaf curl*, creando clones infectivos. Utilizaron dos grupos, uno con virus y otros sin este, pero ambos sometidos a las mismas condiciones de estrés hídrico, teniendo menor severidad de consecuencias en el primero, es decir, el que tuvo el virus desde que se sembró y trasplantó (Ho et al., 2026).

2.2. El cultivo de jitomate

2.2.1. Origen del jitomate

El jitomate (*Solanum lycopersicum* L.), también referido comúnmente como tomate rojo, se considera uno de los alimentos de mayor importancia dentro de la dieta de las personas en todo el mundo. Es la segunda especie más relevante que forma parte del género de *Solanum spp* (Camejo et al., 2025). Su origen se rastrea al sur del continente americano, concretamente en algunas regiones de Perú, Ecuador, Bolivia y Chile, para después tener presencia en otras partes de América, trasladarse a Europa y el resto del planeta (Leana-Acevedo et al., 2022).

En su inicio, el jitomate se encontraba como plantas silvestres y gradualmente fue domesticando para su cultivo. Actualmente, se produce y consume en casi la totalidad de países, siendo cultivado en su mayoría en zonas con clima tropical, aunque el mayor rendimiento se obtiene bajo invernadero (Zamora-Macorra et al., 2023). Casi la totalidad se cultiva a campo abierto, aunque cada año se suma mayor superficie de producción de jitomate en el esquema protegido, es decir, en invernadero o con malla sombra (Platas, 2021).

Se tiene registro de que el cultivo de jitomate fue llevado al continente europeo en 1540, aunque no fue consumido ampliamente sino hasta varias décadas después, por lo que se trata de una hortaliza que es producida y comercializada

en el viejo continente desde alrededor de 400 años. Sin embargo, el avance científico para su mejora genética ha sido acelerado, pues hasta ahora se sabe podrían tenerse hasta 10 mil distintas variantes (Conti et al., 2023).

El nombre científico de *Solanum lycopersicum* L. fue acuñado en 1753 por Linneo, lo que fue sujeto a debate en distintas publicaciones posteriores para reafirmarse nuevamente con esa denominación original alrededor del inicio de la década de los años 2000 (López y Matey, 2022). El jitomate llegó a Europa por medio de España, después a Italia y también a Francia. Su utilización se diseminó gracias a que a mediados del siglo XIX se volvió hito la conserva (Lejavitzer, 2025).

Con ese impulso, los jitomates enlatados comenzaron a exportarse desde Italia a todas partes del planeta, al igual que surgió y también se popularizó la salsa de tomate estilo cátsup desde Estados Unidos. Son dos esfuerzos comerciales basados en el jitomate con tratamiento industrializado, lo que terminó por globalizar esta hortaliza y en pocos años se volvió casi omnipresente (Lejavitzer, 2025).

El origen de la palabra jitomate viene del náhuatl. Concretamente, del término *tómatl* que significa objeto gordo y que cuando se le usa como verbo adquiere la connotación de tendencia a engordar o a parecer gordo. También, se asocia con la palabra compuesta *xitómatl*, que viene de *tómatl* y *xictli*. La primera, como se dijo, es objeto redondo o gordo, y la segunda se traduce como ombligo (Lejavitzer, 2025).

2.2.2. Clasificación taxonómica del jitomate

La taxonomía del jitomate, de acuerdo con Platas (2021) y Zavala (2023), es:

Reino: Vegetal

División: Tracheophyta

Subdivisión: Pterostemata

Clase: Angiosperma

Subclase: Dicotyledoneae

Grupo: Metachlamydae

Orden: Solanales

Familia: Solanaceae

Subfamilia: Solanoideae

Género: *Solanum*

Especie: *Solanum lycopersicum*

La familia que se conoce *Solanaceae* se traduce como de las solanáceas, es decir, de las hierbas mora. En esta se agrupan hasta tres mil especies de cultivos, entre los que destacan similarmente la papa, el pimiento, el tabaco y la berenjena. Asimismo, el género *Solanum* se compone de 1,500 especies, dentro del que está el jitomate domesticado (*Solanum lycopersicum*) y sus variantes silvestres, siendo algunas de las principales *Solanum cerasiforme* y *Solanum pimpinellifolium* (López y Matey, 2022).

2.2.3. Descripción de la planta de jitomate

El jitomate (Figura 3) es una hortaliza, perenne y arbustiva, la cual nace a partir de la semilla que tiene un perímetro y superficie de tipo lenticular. Las plantas son cultivadas anualmente, clasificándose en determinadas e indeterminadas. Las primeras son las que experimentan un crecimiento limitado en su tamaño y ramas, mientras que las otras no tienen esa limitante (Zavala, 2023).

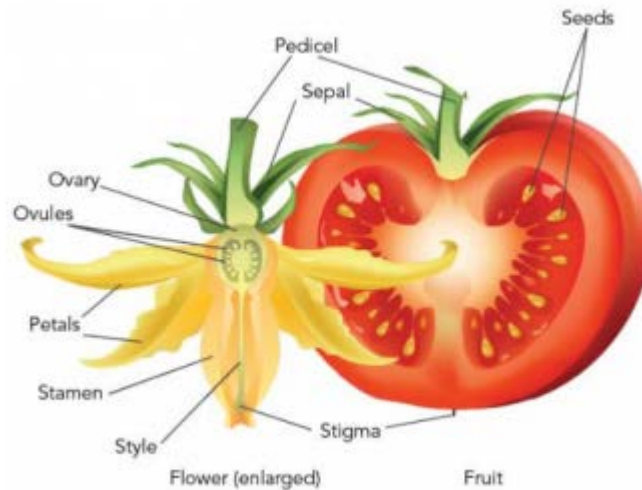


Figura 3. Flor y fruto de jitomate.

Fuente: Tomado de Kumar et al., (2025).

El tallo de la planta tiende a ser grueso, color verde y anguloso. Su parte más ancha se encuentra a nivel de tierra, pegada a la raíz, y se va haciendo más delgada conforme llegar a la sección superior. Del tallo central dependen y se alimentan tallos secundarios más delgados, los cuales se forran por hojas y producen racimos florales (Platas, 2021). El tallo inicia erguido en sus primeras etapas, aunque puede irse inclinando o torciendo de acuerdo con el peso que vaya teniendo la planta (Zavala, 2023).

El tallo puede verse afectado o fortalecido según el manejo que se dé al cultivo de jitomate, como al aplicársele poda, uso de entutorado, entre otros sistemas de conducción de la planta. El ancho puede ir de 2 a 4 centímetros (Zavala, 2023).

Las hojas de la planta de jitomate tienen la función principal de permitir la fotosíntesis, al ser receptoras de los rayos ultravioleta, pudiendo disponerse de forma adecuada para tener una mejor captación de estos. Están compuestas por folíolos lobulados con borde de tipo dentado, en color característico verde. Las hojas tienen cubierta con pelillos glandulares alternados respecto del tallo, pudiendo estar en forma horizontal o con inclinación (Platas, 2021).

Las flores (Figura 4) de la planta de jitomate están agrupadas en racimo, en el que puede haber una cantidad frecuente de mínimo tres y máximo diez flores, lo cual cambia de acuerdo con la variedad de que se trate. El jitomate como verdura puede describirse como una vaya en forma casi esférica y que puede considerarse alargada o globosa. Respecto del tamaño puede ir desde unos cuantos miligramos y alcanzar hasta cientos de estos. El jitomate en sí se compone de pericarpio y las semillas que están unidas a un tejido placentario (Platas, 2021).

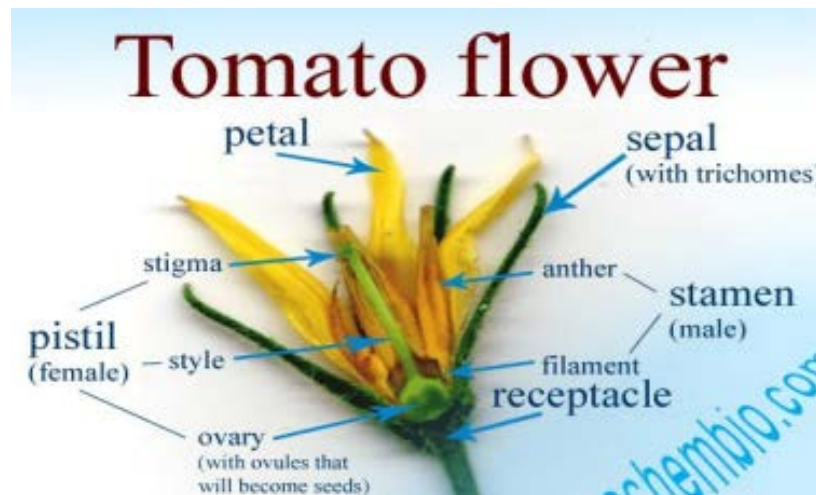


Figura 4. Flor de la planta de jitomate.

Fuente: Tomado de Kumar et al., (2025).

La raíz de la planta de jitomate tiene funciones esenciales, como el mantenerla anclada a la tierra y ser el punto de acceso de nutrientes y agua. Similar al tallo, hay una raíz central y otras secundarias, aunque también están las raíces que pueden llamarse adventicias, que son las más diminutas y se presentan en gran cantidad, al igual que se encuentran al final. La raíz en su diseminación tiene piel (epidermis), corteza (córtex) y cilindro vascular, siendo este último por donde fluyen el agua y los nutrientes hacia toda la planta (Platas, 2021).

La raíz principal de la planta de jitomate puede alcanzar una profundidad de hasta 60 centímetros, pero llegar hasta 150 centímetros, que en su punto más lejano

toca la tierra por medio de las raíces secundarias o las adventicias. En algunos casos, las raíces en su conjunto se constituyen en una masa en forma densa y con volumen. Según levantamientos que se han efectuado, tres cuartas partes de la raíz están a una profundidad de 45 centímetros desde el suelo hacia abajo (Zavala, 2023).

2.2.4. Condiciones necesarias para el cultivo de jitomate

Para que el cultivo de jitomate se desarrolle de forma propicia necesita una serie de condiciones de suelo, ambientales y climáticas. El más importante es la temperatura dada por el clima, teniendo un rango ideal durante el día de 21 a 27 grados centígrados, así como en la noche de 14 a 17 grados centígrados. Tiene la capacidad de tener crecimiento y desarrollo en temperaturas diversas, aunque estas impactan directamente en el rendimiento y la productividad que se pueda obtener (Zavala, 2023).

En cuanto a la humedad, esta es pertinente en una amplitud que va de 60% a 80%. Cuando se excede el límite superior se preñe una mayor propensión a que la planta sea afectada por plagas, que la verdura se agriete o experimente daños, así como inhibe el proceso de fecundación y reproducción por el aborto de las flores. El agrietamiento del jitomate puede ser por mucha humedad, pero también ocasionado por un manejo ineficiente en el suministro de agua al exceder la cantidad de esta seguido de haberse sufrido estrés hídrico (Zavala, 2023).

Mucha humedad es tan dañina como poca. Cuando la humedad está por debajo del rango mencionado los efectos son el entorpecimiento de la fijación del polen en la flor y, por ende, del proceso para producir el jitomate. La radiación o luz ultravioleta obtenida del sol es otro factor relevante, pues la planta de esta hortaliza necesita adecuada iluminación. Con carencia de esta se limita el proceso de fotosíntesis y con ello también el desarrollo de la planta y el rendimiento del cultivo. Se requiere una radiación de al menos 0.85 mega julios por metro cuadrado (Zavala, 2023).

El aire, aunque se considere poco importante, influye de manera primordial sobre el cultivo de jitomate. Se necesita, principalmente, que el aire fresco sustituya con frecuencia al aire caliente que puede acumularse. Esto se observa, sobre todo, cuando se utiliza el método de cultivo protegido, es decir, en invernadero o con malla sombra. La razón de esto son los niveles de oxígeno necesario, pero también regular la humedad presente en el ambiente (Zavala, 2023).

El suelo es otro factor que influye de forma determinante en el desarrollo del cultivo de jitomate. Aunque diferentes tipos de este pueden permitir la plantación y crecimiento de esta hortaliza, lo más apropiado es que tenga una textura que va de franca a franca arcillosa, tenga buena capacidad de aireado y de retención de humedad, así como de drenaje interno. La fertilidad del suelo aumenta cuando este contiene materia orgánica y conserva los nutrientes propios, así como al estar libre de hierbas y maleza (Zavala, 2023).

Además, la pertinencia del suelo se mide con base en el indicador conocido como potencial de hidrógeno o pH, el cual debe estar dentro del rango de 6 a 6.5. Por debajo de eso se considera ácido y por arriba alcalinos (Zavala, 2023).

2.2.5. Manejo del cultivo de jitomate

El primer paso en el manejo del cultivo de jitomate es la siembra en semilleros. Para esto, se prepara el sustrato que se va a utilizar, siendo importante antes eliminar mediante desinfección los patógenos que pueda haber en este. Para sembrar, se aplica agua al sustrato, se llena este en los compartimentos de las charolas, se prensa de manera leve y se marcan orificios en donde se pondrá la semilla, a una profundidad deseada que puede ir de medio a 1 centímetro desde la superficie. Se coloca una semilla en cada uno de estos (Zavala, 2023).

Los orificios se cubren con vermiculita o una mezcla de esta con sustrato. Se le aplica riego corriente, para después disponer de las charolas una sobre otra y cubrirlas con algún plástico para el proceso de incubación o, en su caso, ponerlas en cámara de germinado sin cubrimiento. Se les da seguimiento para visualizar

el proceso de germinación y detectar cuando aparezcan las plántulas, de tal manera que este sea el indicador para dispersar las charolas en la superficie del suelo o en mesas que permita el crecimiento de las plantas (Zavala, 2023).

La duración desde el sembrado hasta tener las plantas listas para retirarlas de las charolas y hacer el trasplante va de 30 a 35 días, aunque eso puede variar dependiendo de las condiciones de clima presentes y del crecimiento observado de las plantas. La señal de que ya es posible trasplantar es cuando estas alcanzan a tener cuatro hojas (ver Figura 5) o se observa una altura de planta que va de 10 a 15 centímetros, así como un tallo que es igual o excede el medio centímetro de ancho (Zavala, 2023).



Figura 5. Plántulas de jitomate listas para transplantar.

Fuente: Tomado de Kumar et al., (2025).

Se realiza la plantación que puede ser a campo abierto, o también para dejarse dentro de invernadero o protegerla con el uso de malla sombra, según las recomendaciones técnicas específicas. Una vez que se tienen las plantas se coloca el tutorado que es posible aplicarlo de distintas formas según decisión del productor, como por medio de varas, con estructura metálica o con el uso de

alambre. Esto forma una especie de parrilla a la que se anclan las plantas, teniendo una altura de hasta 2.5 metros desde el suelo (Zavala, 2023).

El tutorado (ver Figura 6) ayuda a que las plantas se fortalezcan y las protege ante cambios bruscos en el viento, por lo que crecen sin daños que inhiban o trunquen su crecimiento. La fijación de las plantas se hace continuamente conforme alcanzan cada vez mayor altura, de tal manera que su anclaje sea progresivo. También, en el proceso es muy necesaria la poda que retira el follaje innecesario, permite el aireado de la planta, evita que el fruto quede por completo oculto, así como que quede en total exposición con el sol (Zavala, 2023).



Figura 6. Tutorado en el cultivo de jitomate

Fuente: Tomado de Kumar et al., (2025).

La poda se hace por brotes laterales, así como para retirar hojas ya maduras o que limitan la productividad de la planta. Asimismo, se hace poda de frutos, consistente en eliminar los que no alcanzan maduración, que tienen una posición incorregible, que presentan alguna deformidad o daño y los que es notorio que su tamaño no coincide con la mayoría de los jitomates o con la variedad utilizada. Otra razón de la poda de frutos es cuando se tienen en exceso y perjudican el racimo (Zavala, 2023).

Durante el manejo del cultivo de jitomate el riego es una de las actividades que más pueden mejorar o perjudicar el rendimiento. Por ejemplo, desde las charolas justo para trasplantar se hace un riego abundante y lo mismo en las camas preparadas en el suelo. Es recomendable monitorear con frecuencia la presencia de agua en tierra, lo que se hace con el uso de tensiómetro, de tal manera que pueda saberse qué días es necesario aplicar los riegos para evitar estrés hídrico o sobre abundancia del vital líquido (Zavala, 2023).

La aplicación de fertilizante es aconsejable, aunque la medida y cuál varía del suelo en donde se realiza el cultivo, pues la finalidad principal es aportar nutrientes a la planta, sobre todo aquéllos que estén en déficit o los que se diagnosticó son necesarios para un crecimiento y un desarrollo apropiados. El resultado esperado es mantener un equilibrio nutrimental entre la aportación del suelo, el agua, el aire y el sol, con las demandas que exigen las plantas. Fertilizantes para brindar nitrógeno y fósforo son fundamentales, aunque se reitera el uso a necesidad (Zavala, 2023).

2.3. Los virus en las plantas de jitomate

2.3.1. Los virus que afectan el jitomate

Los virus que dañan el cultivo de jitomate se definen como agentes submicroscópicos, acelulares, de tipo infeccioso, los cuales se componen de ácido nucleico, por lo que pueden ser de ARN o de ADN, además de que están recubiertos con proteínas. Solo pueden multiplicarse al interior de las células vegetales, utilizándolas y acaparando sus procesos metabólicos. Según el tipo de virus, su forma es diferente, teniendo posibilidad de contar con varilla, bastón, ser bacilo, entre otras (Zamora-Macorra et al., 2023).

Los virus que afectan el jitomate pueden ser devastadores al acabar con todo un cultivo si no se les controla y pueden llegar a ocasionar síntomas en diferentes órganos de las plantas (como hojas y frutos), así como reducir la producción. Cada virus es diferente y también los daños que provoca (Sánchez et al., 2024).

De un total de 10 principales virus que afectan el crecimiento vegetal en el mundo, 6 de estos tienen incidencia directa en el jitomate, entre los que están el *Tomato spotted wilt virus*, *Tobacco mosaic virus*, *Tomato yellow leaf curl virus*, *beet curly top virus*, *Tomato Brown Rugose Fruit Virus* y *Tomato bushy stunt virus* (Zamora-Macorra et al., 2023).

2.3.2. Los Tobamovirus en el cultivo de jitomate

El género Tobamovirus ha sido relevante en el cultivo del jitomate. La primera identificación de este afectando a esta hortaliza aconteció en Estados Unidos en el año 1902, lo cual fue después ratificado en Europa por otro estudio en el año 1926. Los tobamovirus causan síntomas de mosaico en las hojas, que posteriormente pueden necrosarse. También pueden afectar los frutos (Ishibashi et al., 2023).

Los Tobamovirus están presentes, en mayor o menor grado, en casi la totalidad de cultivos de solanaceas. El *Tobacco Mosaic Virus* y el *Tomato Mosaic Virus* y el *Tobamovirus fructirugosum* son los tobamovirus más frecuentes (Ishibashi et al., 2023).

Generalmente, la infección por *Tobamovirus* no ocasiona la muerte de la planta de jitomate, pero sí retrasan o afectan el crecimiento y desarrollo de esta, en tallo, raíces, hojas y frutos. Los síntomas son más notorios en las hojas, las cuales presentan mosaicos que pueden ser claros u oscuros dependiendo la variedad del jitomate y otros factores. También, en ciertos casos, están se ponen amarillentas (clorosis), se encogen o rizan (deformaciones y enaciones). Los frutos de jitomate pueden inclusive presentar deformaciones, manchas o necrosis en casos severos (Figura 7).



Figura 7. Lesiones por tobamovirus en jitomate

Fuente: Tomado de Ishibashi et al., (2023).

Los Tobamovirus se transmiten principalmente de forma mecánica, es decir de plantas que tienen la infección a otras que están saludables mediante labores culturales como lo es la poda. Entre parcelas, la infección puede iniciar cuando personal lleva partículas virales de zonas infectadas hacia plantas sanas (Ishibashi et al., 2023). El porcentaje de transmisión por semillas en tobamovirus es muy bajo, pero puede ser suficiente para iniciar una infección (Ishibashi et al., 2023).

Los *Tobamovirus* forman viriones en forma de varilla rígida extendida, con medidas promedio de 300 nanómetros de largo y 18 nanómetros de ancho (ver Figura 8). A lo largo de tantos años, se han creado variedades de jitomate que son resistentes a algunos de los tomabovirus, no obstante, a, también han surgido nuevas especies como es el caso del Tomato Mottle Mosaic Virus o el Tomato Brown Rugose Fruit Virus, que ocasionan epidemias en el cultivo (Ishibashi et al., 2023).

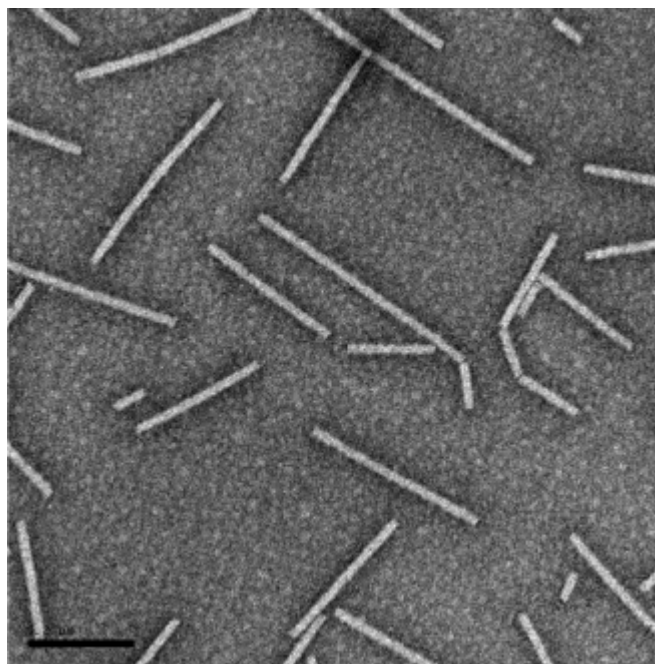


Figura 8. Viriones de Tobamovirus

Fuente: Tomado de Ishibashi et al., (2023).

La relevancia de los *Tobamovirus* también tiene que ver con la variedad genética que presenta. Científicamente, se ha establecido que este género de virus existe desde hace más de 120 millones de años en el planeta, lo que ha permitido que en especies silvestres se encuentre en homeostasis; no obstante, con la intensificación de la agricultura, algunas nuevas especies de Tobamovirus surgen y ocasionan epidemias (Vásquez et al., 2025).

2.4. Estrés hídrico en plantas de jitomate

2.4.1. Estrés en la agricultura

En la agricultura los cultivos son con frecuencia enfrentados a distintos tipos de estrés. A grandes rasgos se puede hablar de dos principales; uno de estos es el biótico, que se ocasiona por distintos organismos vivos, entre los que se encuentran virus, bacterias, insectos, arácnidos, hongos, entre otros. Se puede decir que existe una gran variedad de tipos de estrés biótico, el cual ocasiona distintas afectaciones dependiendo de cuál microorganismo lo produce, pero

también de las condiciones climáticas existentes y del cultivo de que se trate (Turan et al., 2023).

El segundo tipo de estrés es el abiótico, es decir, el que es generado por las condiciones de clima, suelo y otras presentes en el entorno. Concretamente, se puede mencionar al hídrico que es provocado con sequías prolongadas o ante la incapacidad de acceder a fuentes de riego constantes. Otros son el aumento o disminución desmedida de la temperatura, como cuando hay heladas, pero también la salinidad en el suelo, la pérdida de fertilidad de este, entre algunos más (Turan et al., 2023).

Los daños que ocasionan estos dos tipos de estrés en los cultivos pueden ser temporales o permanentes, tratables o imposibles de revertir. Los más comunes son evitar el crecimiento y desarrollo de las plantas, lesiones o deformidades en los frutos, cambios en el metabolismo, modificación de la conducta genética y dificultad de replicar siguientes cultivos. Por ejemplo, cuando el suelo pasa de ser fértil a perder sus nutrientes y su capacidad de albergar plantas, requiere tratamiento y seguimiento para volver a producir (Turan et al., 2023).

2.4.2. Estrés hídrico

El estrés hídrico es un fenómeno que ocurre en todo el mundo y se presenta al menos una vez en el año, afectando una gran cantidad de cultivos que son base de la alimentación del ser humano. Es visto como uno de los problemas que en mayor medida amenaza el crecimiento y la productividad de las plantas frutales. En algunas, como la del maíz, se ha documentado que puede llegar a ocasionar hasta una caída del 48% del rendimiento productivo total, lo que impone serias preocupaciones (Gu et al., 2024).

El agua es considerada la más importante limitante en la producción agrícola. Sin esta las plantas simplemente no podrían sobrevivir. Por eso, existe una necesidad y una preocupación permanente por hacer un uso racional, eficiencia y eficaz de esta, de tal manera que el poco disponible alcance adecuadamente

para el cultivo que se esté realizando. Sin duda no es lo mismo hacer crecer y producir plantas en un régimen de riego óptimo en comparación con otro donde existe estrés hídrico (Maldonado-Peralta et al., 2021).

El estrés hídrico en la agricultura se define como la condición en la que alguna etapa de un cultivo está en riesgo de no poderse llevar a cabo de manera apropiada en cantidad ni regularidad. Así, el estrés es experimentado por las plantas cuando durante un tiempo, que puede ser prolongado, no reciben agua y eso amenaza su desarrollo y también su supervivencia. Ello tiene como consecuencia que la productividad disminuye de manera relevante e, inclusive, puede llegar a perderse la totalidad (Begna, 2022).

Ese estrés es ocasionado cuando el suministro de agua es errático, pero también cuando la temperatura aumenta a tal grado que el riego regular no alcanza suficiencia para mantener hidratadas las plantas. Eso sucede en zonas áridas, de mucho calor, cuando el riego de pronto se torna errático, se esperaba lluvia y esta no llega o llega en menor cantidad que la esperada, o cuando el suelo tiene mayor salinidad o porosidad que lo debido, por lo que el agua se consume o drena más rápido (Begna, 2022).

En ciertos casos el estrés hídrico no es originado por la falta de agua, pero sí en por una alta vulnerabilidad del cultivo a experimentar disminuciones en la concentración de este líquido vital. Con esto se entiende que hay plantas que pueden resistir más tiempo y continuar creciendo ante restricciones de agua, mientras que otras tienen impactos adversos de inmediato. Así, el estrés hídrico depende no sólo de la cantidad y frecuencia de agua disponible, sino de la resistencia de esta a esa condición (Begna, 2022).

Las plantas experimentan estrés hídrico cuando se presenta una escasez de agua que modifica las condiciones ambientales propicias para su crecimiento y desarrollo, entrando en una situación en la que el grado de transpiración es más alto que el de absorción y retención de agua. Esto está asociado directamente al potencial hídrico que tiene cada cultivo, el cual se estima considerando los

potenciales de presión y osmótico, lo que indica cuáles son más residentes a la falta de agua (Pertíñez, 2023).

2.4.3. Efectos del estrés hídrico sobre las plantas de jitomate

El impacto adverso del estrés hídrico en las plantas es severo, afectando la mayoría de las funciones relacionadas con el crecimiento de la planta y la producción del fruto. Se inhibe la fotosíntesis y los distintos procesos celulares (Gu et al., 2024). En general, con una sequía se tiene una reducción en el crecimiento y en el desarrollo vegetal de estas, pero fundamentalmente en el rendimiento esperado. La falta de agua incide directamente en la disminución de la turgencia celular y el aumento de las especies reactivas de oxígeno (Gómez-Zúñiga et al., 2025).

De manera particular, se sabe que el estrés hídrico en plantas de jitomate afecta la estabilidad en sus membranas, disminuyendo su capacidad de absorción de nutrientes y de radiación ultravioleta, tan necesaria como el agua para lograr el crecimiento y el desarrollo de las plantas. Otros cambios que son resultado de la afectación por estrés hídrico son alteración a la transpiración, entorpecimiento de la fotosíntesis y aceleración del metabolismo oxidante (Camejo et al., 2025).

Como se ha dicho, el estrés hídrico impacta directamente los procesos fisiológicos de las plantas de jitomate y, por lo tanto, en el proceso y potencial de crecimiento. También, se generan respuestas de tipo bioquímico y molecular, así como disminuye de manera importante la fotosíntesis (Conti et al., 2023). Es coincidente encontrar en la literatura que la consecuencia directa del estrés hídrico en las plantas es el aumento de las Especies Reactivas de Oxígeno, las cuales provocan la oxidación de la planta, entre otras lesiones (Turan et al., 2023).

El estrés hídrico es considerado no sólo un problema, sino también un indicador del crecimiento, el desarrollo, el rendimiento y la calidad del cultivo de jitomate. El impacto directo ocurre en la planta, la cual crece menos y con falta de

vigorosidad. La mayor afectación puede notarse en las flores, las que pueden abortar o no llegar a convertirse en un fruto. Pero también, ya teniendo el fruto, este puede ser más pequeño, menos jugoso y no llegar a madurar (Grozeva et al., 2024).

Cuando el agua comienza a escasear, uno de los efectos más claros y adversos es que se interrumpe el proceso de fotosíntesis. Con estrés hídrico extremo, el cultivo puede llegar a perder hasta el 60% de su rendimiento, lo cual es altamente indeseable, por la resonancia económica y social que eso ocasiona. Para conocer los efectos del estrés hídrico en el jitomate, deben considerarse diversos indicadores que se relacionan con los procesos de tipo fisiológico y morfológico (Grozeva et al., 2024).

Las medidas más comunes para saber cómo el estrés hídrico ha afectado a esta hortaliza, a nivel físico de la planta, son el peso del fruto, el tamaño de este, ancho y longitud del tallo principal y el rendimiento productivo. Sin embargo, lo verdaderamente relevante se encuentra en el plano de fisiológico. Al estrés hídrico le sigue el osmótico, que es una de las primeras respuestas de la planta, llegando a ocasionar con el desbalance un shock de esa clase. Otra reacción es el uso de acuaporinas con la intención de regular el flujo de agua (Xie et al., 2024).

Otro proceso involucrado en las respuestas de las plantas de jitomate ante el estrés hídrico es la producción en exceso de las Especies Reactivas de Oxígeno que incrementan la oxidación e inducen a las plantas al límite de sobrevivencia. En modo claro, estas especies lesionan y matan de manera severa las células, disminuye de forma drástica la fotosíntesis y se muestra por medio del marchitamiento de las hojas. Cuando existe un buen riego, la cantidad de las especies reactivas de oxígeno se mantiene estable, pero ante la carencia de agua se incrementan multiplicativamente (Xie et al., 2024).

2.4.4. Comportamiento de defensa de las plantas ante el estrés hídrico

Según las condiciones de estrés hídrico, las plantas pueden adoptar, para defenderse, alguno de estos tres comportamientos: evasión, evitación y tolerancia. El primero sucede al acelerar o hacer más lento el proceso de reproducción, de tal manera que se logre evitar que se aborte en el mismo cuando se experimentan una sequía realmente severa. Permite una mayor subsistencia de frutos al activar una especie de sistema de prioridades, en donde la planta busca un equilibrio entre crecer y defenderse de las condiciones extremas que vive (Gu et al., 2024).

Este primer comportamiento o estrategia, además de llamarse evasión también se le conoce como escape. Es un intento de la planta por hacer que su proceso reproductivo acontezca más rápidamente, es decir, antes del tiempo previsto con regularidad, antes de que se llegue a estar realmente amenazada por la ausencia de agua (Conti et al., 2023).

La evasión se presenta al ajustar sus características de las hojas para modular la forma en que estas interactúan con su entorno y, específicamente, con la falta de agua. También, al modificar la estructura de sus raíces con la intención de aprovechar al máximo el poco líquido que esté disponible y lograr sobrevivir. Es una manera de intentar sobrevivir a pesar de lo que el entorno le ofrece (Gu et al., 2024). Esta respuesta de evitación también se entiende a partir de que la planta de jitomate crece de inmediato la cantidad de agua en su interior al saber que podría haber en el futuro cercano una carencia extrema de esta. Además, busca prevenir lo más posible el daño en el tejido, para evitar que se tenga que consumir agua de manera innecesaria (Conti et al., 2023).

Para la tolerancia, las plantas activan distintos sistemas con la finalidad de resistir a la falta de agua. Uno de estos es el ajuste osmótico, por medio del cual se aumentan los solutos al interior de las células para atraer agua de fuera de la planta y, al mismo tiempo, evitar que se pierda la ya contenida. Otro es la limpieza

de residuos al retirar especies reactivas de oxígeno por medio de antioxidantes (Gu et al., 2024). Es la habilidad de sobrevivir con poca agua e impulsar el crecimiento y desarrollo aun en estas condiciones adversas (Conti et al., 2023).

La tolerancia significa que las plantas se ajustan a las condiciones de estrés hídrico presentes a través de distintos mecanismos, logrando resistir un poco más esa ausencia de agua. Algunos de estos son acumular moléculas de protección, aumentar o retener proteínas, transformar la composición de la membrana celular, modificar la integración de los metabolitos primarios, así como cambiar el potencial osmótico de las células (Gómez-Zúñiga et al., 2025).

Al fortalecer su resistencia o tolerancia al estrés hídrico, las plantas de jitomate aumentan la capacidad para saber que se acerca una temporada o etapa de escasez de agua, por lo que dispone de la iniciación de mecanismos para defenderse o resistir. No son activaciones físicas, sino es una preparación a nivel celular y de cambio en los procesos fisiológicos y bioquímicos de desarrollo (Conti et al., 2023).

2.5. LITERATURA CITADA

- Akram, S., Saleem, Y., Rehman, A., Wadood, A., Hameed, A., & Sajjad, S. (2024). Identification of drought-tolerant tomato genotypes using multi-trait index at early growth stage. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. <https://doi.org/10.1007/s42729-024-01649-0>
- Begna, T. (2022). Impact of drought stress on crop production and its management options. *International Journal of Research Studies in Agricultural Sciences*, 8(12), 1–13. ARC Journals PDF
- Camejo, Y., Ruiz, C. C., Castro, Y., Florido, R., Álvarez, M. A., & Florido, M. (2025). Selección de accesiones de tomate tolerante al estrés hídrico basada en prueba de eflujo de iones. *Cultivos Tropicales*, 46(3), 1–4. SciELO Cuba PDF

- Conti, V., Parrotta, L., Romi, M., Del Duca, S., & Cai, G. (2023). Tomato biodiversity and drought tolerance: A multilevel review. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(12), 10044. <https://doi.org/10.3390/ijms241210044>
- Gómez-Zúñiga, C. A., Conde-Martínez, V., Trejo, C., & Velázquez-Márquez, S. (2025). Evaluación de niveles de humedad aprovechable en el balance hídrico y fotosintético en tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 12(3), 166–175. *Revista Mexicana de Agroecosistemas PDF*
- Grozeva, S., Topalova, E., Ganeva, D., & Tringovska, I. (2024). Evaluation of tomato landraces for tolerance to drought stress using morphological and physiological traits. *International Journal of Plant Biology*, 15, 1391–1404. <https://doi.org/10.3390/ijpb15040096>
- Gu, Z., Hu, C., Gan, Y., Zhou, J., Tian, G., & Gao, L. (2024). Role of microbes in alleviating crop drought stress: A review. *Plants*, 13(3), 384. <https://doi.org/10.3390/plants13030384>
- Hernández-Soto, D., & alcalde-Jiménez, M. E. (2024). Un análisis de la competitividad del tomate mexicano en el mercado de Estados Unidos. *The Journal of Globalization, Competitiveness, and Governability*, 18(3). *Dialnet PDF del artículo*
- Ho, P. T., Byun, H. S., Vo, T. T. B., Lal, A., Jung, Y. J., Kil, E. J., & Lee, S. (2026). Tomato yellow leaf curl virus infection promotes tolerance against drought stress in *Solanum lycopersicum* L. *Phytoprotection*, 103(1), 26–37. *Érudit PDF del artículo*
- Ishibashi, K., Kubota, K., Kano, A., & Ishikawa, M. (2023). Tobamoviruses: Old and new threats to tomato cultivation. *Journal of General Plant Pathology*, 89, 305–321. <https://doi.org/10.1007/s10327-023-01141-5>

- Krishna, R., Akhter, W., Soumia, P. S., Yadav, A., Kumar, D., Kumar, S., Kumar, A., Singh, M., & Prakash, J. (2022). Biotechnological interventions in tomato (*Solanum lycopersicum*) for drought stress tolerance: Achievements and future prospects. *BioTech*, 11(4), 48. <https://doi.org/10.3390/biotech11040048>
- Kumar, H., Lata, R., Sundar, S., Sangh, D., Singh, H., & Yadav, G. C. (2025). Scientific advances in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) cultivation, agronomic innovation and genetic improvement: A comprehensive review. *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*, 28(10), 781–803. ResearchGate PDF del artículo
- Leana-Acevedo, J. L., Juárez-López, P., Palemón-Alberto, F., Sainz-Aispuro, M. J., Alia-Tejacal, I., Avonce-Vergara, N., Damián-Nava, A., & Ortega-Acosta, S. A. (2022). Competitividad agronómica de ecotipos nativos de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivados en invernadero. *Acta Agrícola y Pecuaria*, 8, e0081017. Repositorio UAEM PDF
- Lejavitzter, A. (2025). El tomate: Historia, cocina y cultura. Cinco siglos entre América y Europa. *Revista Iberoamericana de Viticultura, Agroindustria y Ruralidad*, 12(36), 102–119. SciELO Chile PDF
- López, B. J., & Matey, W. A. (2022). *Tolerancia de seis cultivares de tomate (Solanum spp.) a Ralstonia solanacearum* [Smith (1896) Yabuuchi et al., 1996], en el Centro Experimental El Plantel, Masaya, 2020* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria]. Repositorio Institucional UNA. Repositorio Institucional UNA
- Maldonado-Peralta, R., Maldonado-Peralta, M. A., Rojas-García, A. R., & Salinas-Vargas, D. (2021). Efecto del estrés hídrico en poblaciones nativas de tomate mexicano. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, número especial 11. Revista ERA PDF

- Mishra, R., Shteinberg, M., Shkolnik, D., Anfoka, G., Czosnek, H., & Gorovits, R. (2021). Interplay between abiotic (drought) and biotic (virus) stresses in tomato plants. *Molecular Plant Pathology*, 23, 475–488. <https://doi.org/10.1111/mpp.13172>
- Sánchez, M., Aispuro-Hernández, E., Quintana-Obregón, E. A., Vargas-Aispuro, I. C., & Martínez-Téllez, M. A. (2024). Estimating tomato production losses due to plant viruses: A look at the past and new challenges. *Comunicata Scientiae*, 15, e4247. Dialnet PDF del artículo
- Vásquez, U., Delgado-Ortiz, J. C., Frías-Treviño, G. A., Aguirre-Uribe, L. A., & Flores-Olivas, A. (2025). *Tobamovirus fructirugosum*: Una enfermedad emergente: Revisión y situación actual en México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 43(1), 34. SciELO México PDF
- Xie, G., Chong, L., & Zhu, Y. (2024). Understanding drought stress response mechanisms in tomato. *Vegetable Research*, 4, e001. <https://doi.org/10.48130/vegres-0023-0033>
- Zamora-Macorra, E. J., Ávila-Alistac, N., Lagunes-Fortiz, E., & Santos-Villalobos, S. (2023). Virus y viroides en jitomate (*Solanum lycopersicum*) y rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal como alternativa de manejo. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 41(4), 1–23. SciELO México PDF
- Zavala, M. R. (2023). *Caracterización morfológica del fruto de líneas avanzadas de jitomate (Solanum lycopersicum L.) nativo del sureste de México** [Tesis de licenciatura, Tecnológico Nacional de México]. Repositorio TecNM

CAPÍTULO 3. RESPUESTA MORFOFISIOLÓGICA Y METABÓLICA DE PLANTAS DE JITOMATE A INFECCIONES DE VIRUS DEL MOSAICO DEL TABACO DURANTE ESTRÉS HÍDRICO

3.1. RESUMEN

Introducción El estudio de la interacción entre factores bióticos y abióticos es fundamental para comprender la resiliencia fisiológica de los cultivos. En este contexto, la presente investigación analizó cómo la infección por el Virus del Mosaico del Tabaco (TMV) puede modificar la respuesta fisiológica del jitomate frente al estrés hídrico.

Objetivos. Evaluar la influencia del TMV como modulador de la tolerancia al déficit hídrico en *Solanum lycopersicum* var. 'Aztek', mediante el análisis del desarrollo biométrico, la partición de biomasa.

Materiales y métodos. Bajo condiciones de invernadero, se evaluaron cuatro intervalos de riego (1, 2, 5 y 7 días) y dos condiciones fitosanitarias (plantas sanas e inoculadas con TMV). La presencia viral fue confirmada mediante RT-PCR y electroforesis en gel de agarosa. Se analizaron variables morfológicas, productivas, biomasa y parámetros bioquímicos. Los datos fueron procesados mediante análisis univariados y multivariados, incluyendo PCA, PERMANOVA y MANOVA.

Resultados. El análisis multivariado mostró que los dos primeros componentes principales explicaron el 36 % de la variación total. La restricción hídrica severa redujo el crecimiento y la productividad en plantas sanas; sin embargo, las plantas inoculadas con TMV presentaron mayor vigor vegetativo y mantuvieron la fructificación bajo condiciones de estrés. Asimismo, se observaron cambios en el metabolismo secundario, reflejados en la acumulación diferencial de flavonoides, fenoles y actividad antioxidante en distintos tejidos vegetales.

Conclusiones. La interacción entre el déficit hídrico y la presencia de TMV modificó significativamente la respuesta morfológica, productiva y bioquímica de *Solanum lycopersicum* var. 'Aztek'. Los resultados evidencian que el estado fitosanitario condiciona la respuesta fisiológica de la planta frente al estrés hídrico, generando ajustes relacionados con crecimiento, reproducción y defensa antioxidante.

Palabras clave

Solanum lycopersicum, TMV, estrés hídrico, antioxidantes, metabolismo secundario, análisis multivariado.

Abstract

Introduction: The study of the interaction between biotic and abiotic factors is essential for understanding the physiological resilience of crops. In this context, the present study examined how infection with the tobacco mosaic virus (TMV) can modify the physiological response of tomato to water stress.

Objectives: To evaluate the influence of TMV as a modulator of water deficit tolerance in *Solanum lycopersicum* var. "Aztek" by analyzing biometric development and biomass distribution.

Materials and methods. Under greenhouse conditions, four irrigation intervals (1, 2, 5, and 7 days) and two phytosanitary conditions (healthy plants and plants inoculated with TMV) were evaluated. The presence of the virus was confirmed by RT-PCR and agarose gel electrophoresis. Morphological variables, yield-related variables, and biomass variables were analyzed, as well as biochemical parameters. The data were processed using univariate and multivariate analyses, including PCA, PERMANOVA, and MANOVA.

Results. Multivariate analysis showed that the first two principal components accounted for 36% of the total variation. Severe water stress reduced growth and productivity in healthy plants; however, plants inoculated with TMV exhibited greater vegetative vigor and maintained fruit set under stressful conditions. Likewise, changes in secondary metabolism were observed, reflected in the

differential accumulation of flavonoids, phenols, and antioxidant activity in different plant tissues.

Conclusions. The interaction between water deficit and the presence of TMV significantly modified the morphological, productive, and biochemical response of *Solanum lycopersicum* var. 'Aztek'. The results show that the plant's health status influences its physiological response to water stress, leading to adjustments related to growth, reproduction, and antioxidant defense.

Keywords: *Solanum lycopersicum*, TMV, water stress, antioxidants, secondary metabolism, multivariate analysis.

3.2. INTRODUCCIÓN

El estudio de la interacción de diferentes tipos de estrés abiótico y biótico en plantas de jitomate es una línea de investigación que está en ascenso. Al realizarse en un ambiente controlado y considerando distintos escenarios de comportamiento, a partir de la alteración que estos estreses ocasionan en la fisiología y la capacidad de defensa, es posible identificar nuevas formas de abordar problemas que son cada vez más comunes en el cultivo (Pandey et al., 2017).

Son varios los efectos o impactos que pueden verse al analizar la combinación de estreses, aunque en términos investigativos y de mejora de la hortaliza de jitomate para hacerla más resistente o tolerante a estos, sólo interesan aquéllos que son positivos. Esto es, los casos de las plantas que al someterse a la influencia de dos tipos de estrés al mismo tiempo o con muy poca diferencia de este, generan una respuesta de mejora en los mecanismos de defensa (Suzuki et al., 2015).

Uno de los que podría ser de resultado es la interacción combinada del estrés hídrico, que es de tipo biótico, con la plaga denominada TMV, que es abiótico, donde el segundo puede ayudar a cambiar los procesos fisiológicos que experimenta la planta hasta alcanzar una mayor capacidad de resistir a la

carencia hídrica. Aunque para eso es necesario ir conociendo el desempeño de cada variable relevante (Liu et al., 2022).

En relación con lo anterior, para acercarse al cumplimiento del objetivo de esta investigación, resulta necesario hacer pruebas de manera directa con las plantas de jitomate para enfrentarlas a dos tipos de estrés, uno abiótico, como es el hídrico, y otro biótico, como es el TMV, para entender de qué manera esta interacción tiene impacto sobre los indicadores principales de las plantas de jitomate al intentar resistir y protegerse.

Por eso, en este capítulo se presenta la fase experimental que se realizó del cultivo de jitomate en ambiente controlado, como es el invernadero, con la finalidad de conocer los resultados que se pueden obtener del impacto del estrés hídrico en las plantas, diferenciado por intervalos de riego, condiciones ambientales y contagio del virus TMV. Esto permite saber cuál es el comportamiento que se tiene, por medio de observar variables morfológicas, de biomasa y bioquímicas.

3.3. Materiales y Métodos

3.3.0. Localización y condiciones del experimento

3.3.1. Descripción del sitio experimental

El experimento se realizó en los invernaderos de cristal, del Departamento de Parasitología Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo. En Texcoco, Estado de México. Ubicada a una altitud de 2,249.4 msnm, con coordenadas aproximadas de 19° 29' 46.98" latitud norte y 98° 53' 05.58" longitud oeste. El ciclo de cultivo y las evaluaciones experimentales duraron seis meses. Iniciando en junio de 2025 y concluyendo en diciembre del mismo año.

3.3.2. Condiciones ambientales

El experimento se llevó a cabo bajo un clima templado subhúmedo con lluvias en verano (C(w)), de acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por García (2004) y adoptada oficialmente por el INEGI (2024) para la región de Texcoco.

Durante el ciclo experimental, comprendido entre junio y diciembre de 2025, se registraron las siguientes variables ambientales. La temperatura media anual en la zona de Chapingo oscila entre 16 °C y 18 °C (Weather Spark, 2026). No obstante, bajo las condiciones controladas del invernadero de cristal, se mantuvo una media diurna de 24 ± 3 °C y una mínima nocturna de 12 ± 2 °C. Estos rangos térmicos son fundamentales para el cultivo, ya que aseguran un desarrollo vegetativo y reproductivo óptimo en *Solanum lycopersicum* var. 'Aztek', evitando el estrés por fluctuaciones extremas que comprometan el rendimiento (Vázquez-García *et al.*, 2017). Humedad Relativa (HR): La media regional se sitúa entre el 60% y 70%. Mediante el uso de ventilación manual, el ambiente interno se estabilizó en un rango de 65% a 75%. Este control ambiental favoreció los procesos fotosintéticos y mitigó el riesgo de proliferación de fitopatógenos. Durante el segundo semestre del año, la región presentó un fotoperiodo promedio de 11 a 13 horas de luz diaria (Weather Spark, 2026). La infraestructura de cristal permitió una transmisión eficiente de la Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR), esencial para la acumulación de biomasa y el correcto llenado de frutos.

3.4. Material biológico

3.4.1. Material vegetal: Hospedero *Solanum lycopersicum* L. var. 'Aztek'

Como unidad experimental se utilizaron plantas de jitomate tipo *Heirloom* (*Solanum lycopersicum* L.) variedad 'Aztek' adquirido de forma comercial. Este genotipo, de origen estonio, se distingue por poseer atributos morfológicos y fisiológicos que lo consolidan como un modelo biológico idóneo para el estudio de la eficiencia en el uso del agua bajo condiciones controladas. Su arquitectura vegetal presenta un hábito de crecimiento determinado y compacto, de tipo arbustivo, alcanzando una altura promedio de 30 cm al término de su ciclo ontogénico. Dichas características facilitan el establecimiento de altas densidades de población y optimizan el aprovechamiento del espacio experimental en invernadero.

La elección de este cultivar para la presente investigación se fundamenta en la estrecha relación alométrica entre su sistema radicular y su porte aéreo. Esta configuración morfológica permite una monitorización precisa de las respuestas al estrés hídrico, dado que las fluctuaciones en el potencial hídrico son más detectables y uniformes en genotipos de dimensiones reducidas.

3.4.2. Material viral: Aislamiento de *Tobamovirus tabaci* (*Tobacco Mosaic Virus*) (TMV)

3.4.2.1. Origen y mantenimiento de fuentes de inóculo viral

El aislamiento original del Virus del Mosaico del Tabaco (TMV, por sus siglas en inglés), perteneciente al género *Tobamovirus*, fue proporcionado por el Laboratorio de Control Biológico de la Universidad Autónoma Chapingo. Con el objetivo de garantizar la estabilidad genómica de las partículas virales y prevenir la degradación de su ácido nucleico (ssRNA+), el material se mantuvo bajo condiciones de criopreservación estricta a -20 °C hasta el momento de su reactivación biológica.

Debido al periodo de latencia derivado de su conservación, se llevó a cabo una fase de incremento del título viral en un hospedero intermedio para asegurar la virulencia y obtener una carga infectiva adecuada. Para este proceso de propagación se empleó jitomate tipo “cherry” (*Solanum lycopersicum* L.), seleccionado por su susceptibilidad sistémica específicamente ante esta cepa.

La inoculación en este hospedero intermedio se ejecutó en 10 plántulas de 45 días post-germinación, con altura promedio de 20 cm; etapa en la que el vigor del sistema vascular y la activa tasa de translocación de fotosintatos facilitan la replicación y el movimiento viral eficiente (figura 9). El procedimiento se realizó mediante la técnica de transmisión mecánica descrita por Zamora-Macorra y colaboradores (2023a). A la par se inocularon 10 plantas solo con buffer de fosfatos como control negativo. Tras la manifestación de síntomas sistémicos característicos en las plantas inoculadas con el virus y su corroboración molecular, descrita posteriormente, el tejido infectado fue recolectado y

procesado inmediatamente para su uso como fuente de inóculo fresco y viable. Una vez obtenido el inóculo, se procedió a la inoculación de la variedad experimental 'Aztek'.



Figura 9. Sintomatología sistémica observada en plantas de jitomate var. 'Aztek' infectadas con el *Tobamovirus tabaci* (Virus Mosaico del Tabaco) Los síntomas iniciales, caracterizados por un mosaico foliar y ligera deformación, se manifestaron a los 12 días después de la inoculación mecánica (ddi).

3.4.2.2. Extracción de ARN total

La extracción de ácidos nucleicos se llevó a cabo a partir de 100 mg de tejido vegetal infectado con síntomas evidentes a los 35 d posteriores a la inoculación mecánica, el cual fue macerado en un mortero de porcelana utilizando nitrógeno líquido para garantizar la ruptura celular y preservar la integridad del material genético. Al tejido pulverizado se le añadió 1 mL de solución AGPC (isotiocianato de guanidina-fenol-cloroformo), mezclando por inversión en seis ocasiones y agitando vigorosamente durante 15 s. Posteriormente, la mezcla se incubó durante 5 min a temperatura ambiente.

Para lograr la separación de fases, se adicionaron 250 μ L de cloroformo, se agitó la muestra por 15 s y se procedió a una centrifugación a máxima velocidad

durante 5 min. Posterior a la centrifugación, se recuperó la fase acuosa y se transfirió a un nuevo tubo de microcentrífuga, donde se añadió un volumen igual (1V) de una mezcla de fenol-cloroformo (1:1 v,v), agitando nuevamente por 15 s.

La precipitación del ARN se realizó mediante la adición de un volumen igual de isopropanol, seguida de incubación a 4°C durante 10 min. Una vez completada la incubación, las muestras se mezclaron por inversión y se centrifugaron a máxima velocidad durante 5 min para sedimentar el ARN. El sobrenadante fue descartado y la pastilla resultante se lavó con un volumen de etanol al 70% para eliminar sales residuales. Finalmente, tras eliminar el excedente de etanol, la pastilla se dejó secar a temperatura ambiente y se resuspendió en agua libre de nucleasas. La calidad y cantidad del RNA extraído se corroboró en un nanodrop para su posterior uso en las pruebas de RT-PCR.

3.4.2.3. Retrotranscripción-Reacción en Cadena de la Polimerasa (RT-PCR)

Para la detección molecular del virus, se empleó la técnica de RT-PCR en dos etapas consecutivas. Inicialmente, se procedió a la desnaturalización térmica del ARN viral a 70 °C durante 10 min con el fin de facilitar el desenrollamiento de las cadenas y el acoplamiento del primer. Los primers utilizados fueron aquellos descritos por Dovas y colaboradores (2004) y las condiciones de amplificación y concentraciones de reactivos son los descritos por Zamora-Macorra y colaboradores (2023a). Posteriormente, se llevó a cabo la síntesis de ADN complementario (cDNA) mediante la acción de la enzima retrotranscriptasa, utilizando 10 µL de DTT como agente estabilizador de la reacción. Una vez obtenido el cDNA, se preparó la mezcla maestra de reacción en tubos de PCR estériles, la cual consistió en un volumen final ajustado con agua libre de nucleasas. Los componentes de reacción incluyeron buffer de reacción, MgCl₂, dNTPs (10 mM), cebadores forward y reverse y la enzima Taq polimerasa. Se utilizó el 20 % del producto de retrotranscripción para la reacción de PCR.

La amplificación se ejecutó en un termociclador automatizado bajo un programa de 35 ciclos. El gradiente de temperatura consistió en una fase de

desnaturalización a 95 °C durante 30 s, seguida de una fase de alineación a 53 °C por 45 s y una extensión a 72 °C por 45 s. Finalmente, el proceso concluyó con una etapa de extensión final a 72 °C durante 10 min, garantizando así la obtención de amplicones estables y completos para su posterior análisis mediante electroforesis.

3.4.2.4. Electroforesis en gel de agarosa

Para la visualización y confirmación de los fragmentos amplificados,

se preparó un gel de agarosa al 1% disolviendo la cantidad correspondiente de agarosa en buffer de corrida TAE (Tris-Acetato-EDTA). La mezcla se calentó en microondas hasta obtener una solución completamente traslúcida. Una vez que la temperatura de la solución fue manejable, se vertió en una bandeja para gel nivelada y se colocó un peine de 12 cavidades en un extremo para la formación de los pozos de carga.

El gel se dejó solidificar a temperatura ambiente por un periodo de 20 a 30 minutos. Posteriormente, se retiró el peine y el gel fue sumergido en una cámara de electroforesis, cubriéndolo con buffer de corrida TAE. Los productos de PCR se prepararon utilizando micropipetas, cargando 5 µL de la muestra y 1 µL de buffer de carga.

Para la corroboración del tamaño de las bandas, se cargó un marcador de peso molecular de 1000 pares de bases en el primer pozo. Las muestras se depositaron en el resto de las cavidades y se conectó el tanque a una fuente de poder. La corrida se mantuvo hasta que el tinte de carga migró una distancia suficiente para permitir la separación de los fragmentos. Es importante resaltar que todo el procesamiento se llevó a cabo bajo un esquema de cadena fría para garantizar la integridad de las muestras. Finalmente, el gel se visualizó en un transiluminador UV y se realizó el registro fotográfico para documentar los resultados obtenidos.

3.5. Establecimiento y manejo del cultivo

3.5.1. Germinación y sustrato utilizado

El proceso inició el 6 de junio con la siembra en charolas de germinación de 200 cavidades, utilizando como sustrato turba de musgo (peat moss) debido a su elevada capacidad de retención de humedad y porosidad, factores que propician un óptimo desarrollo radicular inicial (Figura 10). Las plántulas permanecieron bajo estas condiciones durante 20 d hasta alcanzar la madurez fisiológica necesaria para su trasplante.



Figura 10. Sustrato y siembra de jitomate cherry variedad 'Aztek'

3.5.2. Trasplante y manejo agronómico

El 28 de junio, las plántulas fueron trasplantadas a macetas de polietileno con una capacidad de 2.5 L, cada una suministrada con 2.5 kg de sustrato húmedo estandarizado (Figura 11). Este volumen de contenedor garantizó un crecimiento radicular sin restricciones durante las etapas críticas del experimento. Durante la

fase de aclimatación post-trasplante, se aplicó un régimen hídrico de 50 mL de agua cada 72 h durante 20 d para la climatización. Este esquema se mantuvo de forma ininterrumpida hasta una semana después de la inoculación mecánica del virus, asegurando un desarrollo uniforme de las unidades experimentales previo a la aplicación de los tratamientos de estrés hídrico.



Figura 11. Trasplante de plántulas de *Solanum lycopersicum* var “Aztek” macetas de polietileno. El establecimiento se realizó para iniciar con la fase de adaptación previa a la aplicación de los tratamientos.

3.6. Inoculación del virus

3.6.1. Preparación y estandarización del inóculo (Macerado, solución amortiguadora de fosfatos).

El inóculo se preparó a partir de tejido foliar que presentaba síntomas sistémicos confirmado. Se maceraron 2 g de tejido vegetal en 10 ml de solución amortiguadora de fosfatos de potasio (KH_2PO_4 , 0.05M, pH 7.0), utilizando un mortero de porcelana previamente esterilizado y mantenido en frío. La dilución final resultante fue de 1:10 (p/v); proporción seleccionada para garantizar la estabilidad de las partículas virales, prevenir su desnaturalización y optimizar su viabilidad durante el proceso de transferencia hacia el hospedero definitivo.

3.6.2. Protocolo de inoculación mecánica

La inoculación del virus se realizó cuando las plantas de jitomate presentaron el segundo par de hojas verdaderas con una altura promedio de 7 cm, garantizando así un estado fenológico estandarizado. Previo a la inoculación, se espolvoreó de manera homogénea carborundum (400 mesh) sobre el haz de las hojas verdaderas como factor abrasivo (Figura 12). Esto ayudó a generar microlesiones no letales en la epidermis, lo cual sirvió como puntos de entrada directa para las partículas virales hacia el citoplasma celular.

Posteriormente, se humedeció un hisopo de algodón estéril con la suspensión viral y se realizó un frotado suave y firme sobre la lámina foliar seleccionada. Después de cinco minutos de la inoculación, se realizó un lavado exhaustivo con agua destilada para eliminar el exceso de sales del buffer y los residuos del agente abrasivo, evitando así posibles efectos de fitotoxicidad o necrosis tisular. Para el grupo de plantas testigo (control), se replicó el mismo procedimiento utilizando únicamente la solución amortiguadora de fosfatos sin inóculo viral.



Figura 12. Preparación del tejido foliar mediante la aplicación de carborundum (carburo de silicio) como agente abrasivo. El procedimiento busca generar

microlesiones en la superficie de la hoja para facilitar la penetración del inóculo viral en la variedad 'Aztek'

3.7. Diseño experimental y análisis estadístico

3.7.1. Unidades experimentales y tratamientos

La unidad experimental estuvo consistió en una planta individual de *Solanum lycopersicum* var. 'Aztek', sometida a la combinación de dos factores experimentales: intervalo de riego y condición sanitaria, es decir, estado de infección (infectada o no infectada). El experimento se estableció bajo un diseño factorial, considerando cuatro intervalos de riego (1, 2, 5 y 7 días) y dos condiciones sanitarias (plantas sanas y plantas infectadas con el Virus del Mosaico del Tabaco, TMV). Cada tratamiento contó con siete repeticiones biológicas.

Las variables de respuesta incluyeron parámetros morfológicos, de crecimiento, productivos, y variables bioquímicas relacionadas con fenoles, flavonoides, capacidad antioxidante y calidad del fruto. Los resultados fueron expresados como valores promedio $\pm$ error estándar. Previo a los análisis, los datos fueron organizados y estandarizados de acuerdo con la naturaleza de cada variable. Para evaluar diferencias individuales entre tratamientos y condición sanitaria se realizaron análisis de varianza (ANOVA) y posteriormente se aplicó una corrección de Benjamini–Hochberg para controlar la tasa de falsos descubrimientos derivada de múltiples comparaciones.

Con el fin de evaluar patrones globales de respuesta, se realizaron análisis multivariados utilizando variables morfológicas, productivas, de crecimiento y bioquímicas. Se utilizó Análisis de Componentes Principales (PCA) para reducir la dimensionalidad de los datos e identificar tendencias de agrupamiento entre tratamientos. Además, se construyeron biplots para visualizar asociaciones entre grupos y variables. La significancia multivariada de los factores intervalo de riego, condición sanitaria y su interacción se evaluó mediante PERMANOVA basada en distancia euclidiana. La homogeneidad de dispersión multivariada entre grupos se verificó mediante un análisis de dispersión multivariada (PERMDISP).

En total, se establecieron 8 tratamientos con 7 repeticiones cada uno, conformando un total de 56 unidades experimentales, donde cada unidad consistió en una maceta con una planta de jitomate var. 'Aztek'.

Los tratamientos se definieron de la siguiente manera:

- T1: Plantas sanas con riego diario (Control / Capacidad de campo).
- T2: Plantas sanas con riego cada 48 horas.
- T3: Plantas sanas con riego cada 5 días (Estrés hídrico moderado).
- T4: Plantas sanas con riego cada 7 días (Estrés hídrico severo).
- T5 a T8: Réplica de los regímenes hídricos anteriores aplicado a plantas inoculadas con TMV.

El suministro hídrico inició con una dosis de 50 mL por planta, incrementándose gradualmente a 100 mL y 150 mL conforme al desarrollo vegetativo, hasta alcanzar 200 mL durante la etapa de floración.

3.7.2. Establecimiento del estrés hídrico y modelo estadístico

El diferencial de riego comenzó a los 20 días después del trasplante (ddt) y siete días después de la inoculación mecánica. Para los tratamientos de mayor restricción (T3 y T4) (figura 14), el riego se determinó mediante la observación visual del sustrato y el estado de turgencia de la planta. En el T3, se aplicó el riego al observar sequedad superficial y deshidratación leve; mientras que, en el T4, se esperó a que la resequedad del sustrato fuera evidente y la pérdida de turgencia foliar fuera notoria, asegurando que el tratamiento presentara síntomas de estrés en más del 50% de las repeticiones sin alcanzar el punto de marchitez permanente. Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de comparación de medias (Tukey) mediante el software estadístico (SAS) utilizando un nivel de significancia $\alpha = 0.05$

3.8. Evaluación de variables

3.8.1. Variables morfológicas

Se cuantificó la altura de la planta (cm) mediante la medición desde el cuello hasta el ápice caulinar, así como el número total de hojas (Figura 13). Al finalizar el periodo experimental, se procedió a la extracción de las plantas para determinar el peso fresco de la raíz y el tallo. Posteriormente, las muestras se sometieron a un proceso de deshidratación a temperatura ambiente hasta alcanzar un peso constante para la determinación de la biomasa seca.



Figura 13. Porte y desarrollo morfológico general de la variedad experimental 'Aztek'

3.8.2. Variables pomológicas

La cosecha de los frutos se realizó en la etapa de madurez comercial, garantizando la uniformidad entre las muestras (Figura 14A). El peso del fruto se cuantificó en gramos (g) empleando una balanza electrónica de precisión (Ohaus® Scout Pro). El contenido de sólidos solubles totales (°Brix) se determinó mediante un refractómetro digital (Hanna Instruments®), mientras que la caracterización de los parámetros de color se realizó con un espectro-colorímetro portátil (3nh® Technology, China). Finalmente, la firmeza y resistencia mecánica de los frutos se evaluó utilizando un penetrómetro digital, expresando los resultados en Newtons (N) (Figura 14B)



Figura 14. Evaluación de variables pomológicas y de calidad en frutos de la variedad 'Aztek'. **A)** Cosecha de frutos en etapa de madurez comercial. **B)** Cuantificación de biomasa mediante báscula analítica de precisión. Determinación de sólidos solubles totales (grados Brix) utilizando un refractómetro digital. Evaluación de atributos de color mediante colorimetría triestímulo.

3.9. Preparación de extractos vegetales

Para la obtención de extractos se realizó mediante extracción asistida por ultrasonido (UAE). Para ello, se pesaron 30 mg de tejido seco y se suspendieron en 1 mL de metanol acuoso al 80%. Las muestras se extrajeron en ultrasonido durante 20 min. Después de la sonicación, las muestras se centrifugaron a 5,000 rpm durante 10 min. El sobrenadante se recuperó y se transfirió a tubos de 2 mL y fueron almacenados a 4 °C hasta su análisis.

3.9.1. Cuantificación de fenoles; método de Folin-Ciocalteu

La determinación de fenoles totales se realizó mediante el método de Folin-Ciocalteu (Singleton et al., 1999). Para ello, se colocaron 30 μ L de extracto y se añadieron 1570 μ L de agua destilada, 100 μ L de reactivo de Folin-Ciocalteu [1N], posteriormente la mezcla se agitó en vórtex y se dejó reposar durante 3 min; finalmente, se añadieron 300 μ L de Na_2CO_3 al 20 % (p/v) y la mezcla se agitó nuevamente en vórtex (Figura 21). Las muestras se incubaron durante 60 min en

oscuridad. Finalmente, la absorbancia se midió a 745 nm en un espectrofotómetro. El contenido de fenoles totales se cuantificó con una curva de calibración utilizando ácido gálico (AG) como estándar de referencia en concentraciones de 1000 a 0.97 µg/mL. Los datos fueron expresados como mg equivalentes AG/ g de peso seco.

3.9.2. Cuantificación de flavonoides totales

La cuantificación de flavonoides totales se realizó mediante el método de cloruro de aluminio (AlCl₃) (Chang et al., 2002). Para el desarrollo de la reacción, se adicionaron 100 µL de extracto vegetal, los cuales fueron mezclados con 2 mL de metanol al 80% y 200 µL de AlCl₃ [5%] y se agitaron en vórtex. Finalmente, se adicionaron 20 µL de acetato de sodio (CH₃COONa) [1 M]. Las muestras se incubaron por 40 min en oscuridad. Finalmente, se determinó la absorbancia de las muestras a 430 nm. El contenido de fenoles totales se cuantificó con una curva de calibración utilizando quercetina (Q) como estándar de referencia en concentraciones de 1000 a 0.97 µg/mL. Los datos fueron expresados como mg equivalentes Q/ g de peso seco.

3.9.3. Determinación de Potencial Antioxidante (DPPH·)

El potencial antioxidante se determinó mediante el ensayo modificado de reducción de 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo (DPPH·) (Brand-Williams et al., 1995). Para ello se preparó una solución metanólica de DPPH a 100 µM (20 mg del reactivo DPPH disuelto en 500 mL de metanol). Para el análisis, se utilizaron microtubos de plástico en los cuales se adicionaron 200 µL del extracto vegetal y 1800 µL de la solución de DPPH. La mezcla se homogenizó en un vórtex y se incubaron por 30 min en oscuridad. La absorbancia de las muestras se midió a 517 nm. Para determinar el potencial antioxidante, se utilizó la absorbancia de la solución de DPPH como referencia en la siguiente fórmula

$$PA = (Abs_m \times 100 / Abs_r) - 100$$

Donde PA = potencial antioxidante; Abs_m = Absorbancia de la muestra; Abs_r = Absorbancia de la solución de DPPH; 100 = constante que representa 100 % de la concentración de la solución de DPPH. Los resultados fueron expresados como porcentaje (%) de potencial antioxidante.

3.10 Resultados y discusión

La activación del TMV permitió la obtención de inóculo viral viable para realizar su inoculación en plantas de *Solanum lycopersicum* var. 'Aztek'. El establecimiento de la infección fue verificado mediante RT-PCR, la cual confirmó la presencia del virus en el tejido inoculado. Posteriormente, mediante electroforesis en gel de agarosa al 1.5 %, se observaron bandas de amplificación nítidas de aproximadamente 500 pb (Figura 15), correspondientes al tamaño esperado del fragmento diana de TMV. Estos resultados validaron el establecimiento exitoso de la infección viral y confirmaron la idoneidad del material vegetal empleado en los análisis morfológicos, fisiológicos y bioquímicos subsecuentes.

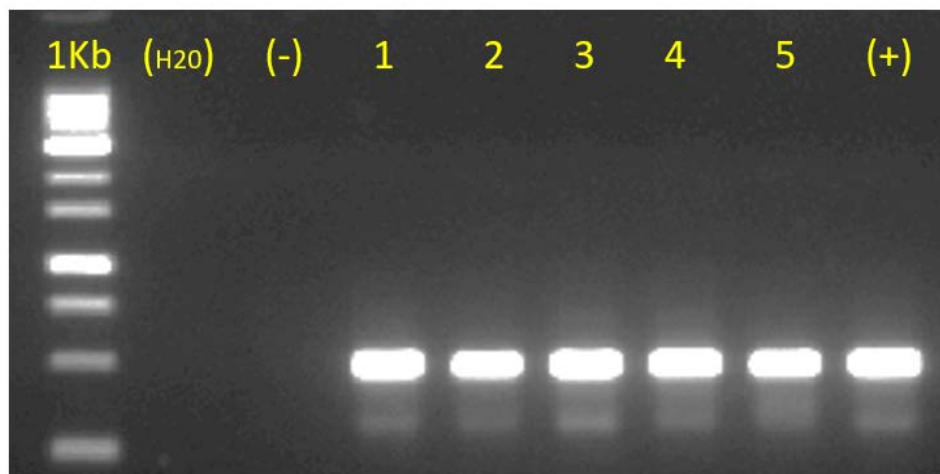


Figura 15. Electroforesis en gel de agarosa (1.5%) de productos de RT-PCR con peso esperado (500 pb). 1-5: Muestras de tomate sintomáticas en donde se reactivó el inóculo. Como control negativo de la reacción se utilizó agua destilada estéril, y como control absoluto (-) se utilizó RNA total de plantas sanas

(inoculadas solo con buffer de fosfatos). (+): control positivo de la reacción en donde se utilizó RNAtotal de planta infectada.

El análisis cualitativo mediante el registro fotográfico permitió identificar una respuesta fenotípica excepcional y contraintuitiva de la variedad 'Aztek'. A diferencia del patrón de crecimiento control, se observó que las plantas enfermas sometidas a los mayores intervalos de restricción hídrica (Tratamientos de 5 y 7 días de frecuencia de riego) presentaron fructificación, mientras que sus contrapartes sanas bajo el mismo régimen permanecieron en una fase predominantemente vegetativa sin presencia de frutos (Figura 16).



Figura 16. Comparación del desarrollo fenotípico de *Solanum lycopersicum* var. 'Aztek' bajo distintos regímenes de frecuencia de riego en plantas sanas (macetas verde y naranja) e infectadas (macetas vino, azul y rosa). Ambos tratamientos se mantuvieron con la misma frecuencia de riego. De izquierda a derecha: 1, 2, 5 y 7 días.

Bajo las condiciones testigo negativo y positivo (sana y enferma) con riego cada 24 h (figura 17), ambas plantas mantuvieron un desarrollo adecuado; sin embargo, se observaron diferencias asociadas con la condición sanitaria. La planta inoculada con TMV presentó un mayor vigor vegetativo, reflejado en una mayor densidad foliar y un desarrollo aéreo más abundante en comparación con la planta sana (Figura 17). Asimismo, las plantas infectadas mostraron una mayor cantidad visible de frutos y una distribución más uniforme de estructuras reproductivas a lo largo de la planta. En contraste, la planta sana presentó un crecimiento más reducido y una menor carga de frutos bajo las mismas

condiciones de riego. Estos resultados sugieren que, en condiciones sin restricción hídrica, la presencia de TMV no limitó el desarrollo vegetativo ni reproductivo de la variedad *Solanum lycopersicum* var. 'Aztek', e incluso estuvo asociada con una mayor expresión de variables relacionadas con vigor y fructificación.



Figura 17. Comparación del crecimiento y desarrollo de *Solanum lycopersicum* var. 'Aztek' bajo condiciones testigo con riego cada 24 h. La planta inoculada con TMV (maceta vino) presentó mayor vigor vegetativo y mayor cantidad de frutos en comparación con la planta sana (maceta verde) bajo el mismo régimen de riego.

3.10.1. Análisis de crecimiento y respuesta bioquímica a la infección de virus del mosaico del tabaco y a diferentes frecuencias de riego

De forma coincidente con el análisis visual de los caracteres fenotípicos de plantas sanas e infectadas por el virus del mosaico del tabaco (TMV), el análisis cuantitativo de crecimiento y bioquímico mostro diferencias interesantes entre tratamientos y fueron dependientes de su estado de infección, el grado de restricción hídrica y el órgano analizada y la interacción de estos. En el caso de los órganos aéreos (hojas y tallos), se observó que la sequía afectó negativamente este parámetro conforme incrementaba el lapso de restricción

hídrica, especialmente en plantas sanas. Interesantemente, la infección viral ayudó a las plantas de jitomate a reducir dicho efecto y lograr estabilizar la producción de biomasa fresca en todos los lapsos de restricción hídrica (Figura 18A); este efecto benéfico se vio más claramente demostrado en datos de producción de biomasa seca (Figura 18A).

Por otro lado, la falta de diferencias generales en número de brotes (Figura 18C), número de hojas (Figura 18D) y longitud de tallos (Figura 18E) indicaron que las plantas con infecciones viral por TMV produjeron hojas de mayor tamaño o de mayor grosor, además de tallos más gruesos, lo cual explicaría las diferencias en peso fresco entre plantas sanas e infectadas. Estos efectos coinciden con los observados anteriormente en plantas de jitomate infectadas con el virus del rizado amarillo de la hoja del tomate o virus de la cuchara expuestas a estrés hídrico, las cuales mostraron que la infección con dicho virus incremento la producción de crecimiento vegetativo aéreo (Mishra et al., 2021; Ho et al., 2026).

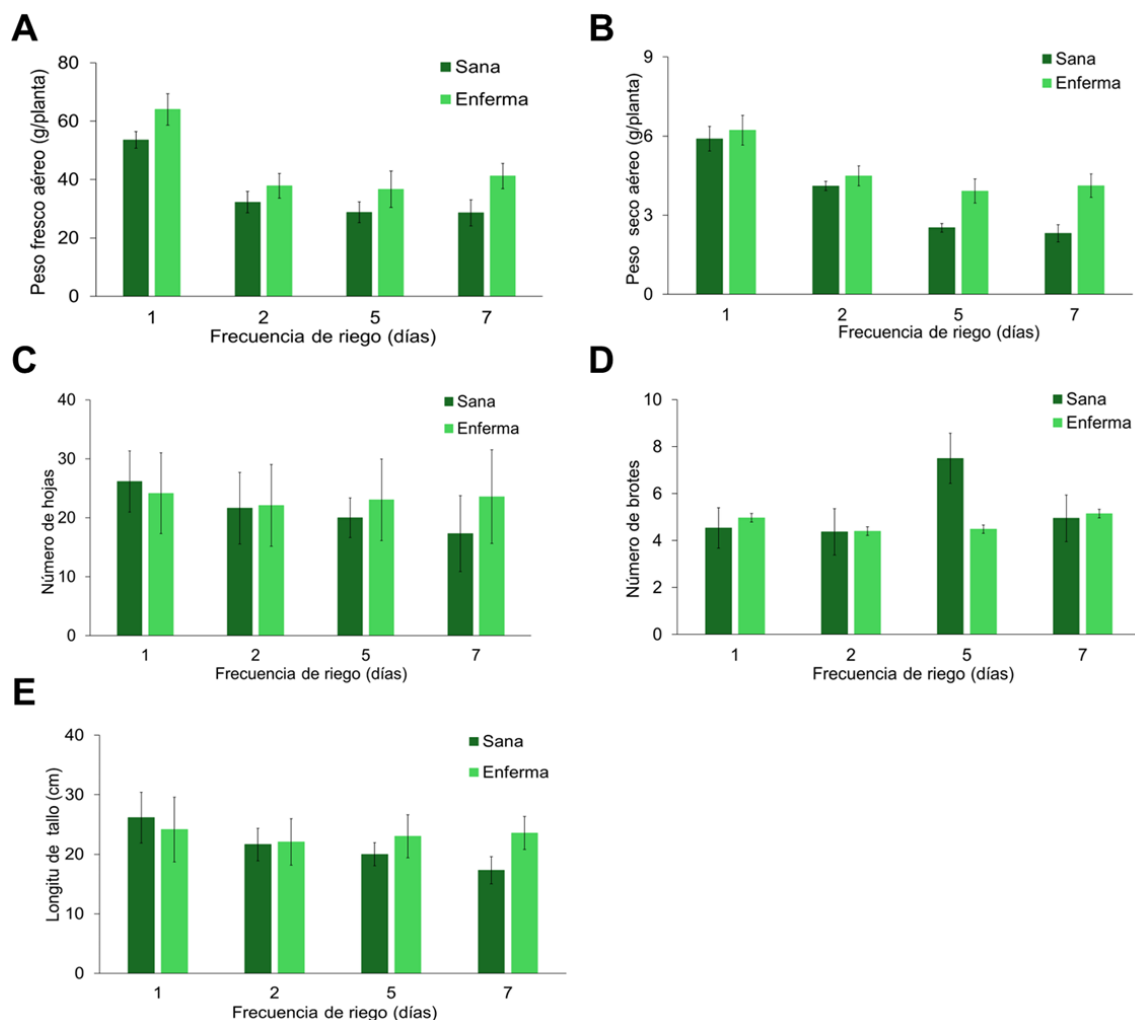


Figura 18. Respuesta de crecimiento de plantas sanas e infectadas por virus del mosaico del tabaco de jitomate var. Aztek sometidas a diferentes frecuencias de riego. A, Peso fresco de órganos aéreos; B, Pesos seco de órganos aéreos; C, Número de hojas; D, Número de brotes; E, Longitud de tallo. Los valores representan promedios ($n = 7$) $\pm$ error estándar.

En el caso de la raíz, la infección por TMV no ocasionó cambios en el peso fresco de este órgano, lo cual se observa al comparar los valores de peso fresco entre plantas testigo sanas e infectadas (Figura 19A). No obstante, la acumulación de peso fresco en raíz mostró una respuesta diferencial dependiendo de la frecuencia de riego. Las plantas con riego cada 48 h sin infección mostraron una disminución en su peso fresco, lo cual indicó su limitación para absorber agua bajo estrés hídrico, no obstante, las plantas con riego cada 5 y 7 días mostraron

una capacidad de adaptabilidad al absorber o retener más agua en sus tejidos y compensar su peso fresco en comparación al testigo y plantas infectadas (Figura 19A). Al complementar estos datos con los de peso seco se observó que las plantas infectadas con TMV acumularon mayor biomasa seca en comparación con las raíces de plantas sanas y esta diferencia se hizo más evidente conforme incrementó el periodo de frecuencia de riego (Figura 19B). Estos resultados sugieren fuertemente dos mecanismos de adaptación al estrés hídrico, el primero en plantas sanas, basado en mayor absorción y retención de agua en tejido radicular y el segundo, en plantas infectadas con TMV, basado en mayor producción de tejido radicular. Finalmente, la comparación del largo de raíz entre plantas sanas e infectadas no mostraron diferencias significativas entre estados de infección o frecuencias de riego (Figura 19C), lo cual indica que la mayor acumulación de peso seco en raíces de plantas infectadas se debe a un mayor número raíces en vez de raíces más largas. Ambas son estrategias generales de tolerancia a estrés hídrico en plantas (Zia et al., 2021; Seleiman et al., 2021), ambas como un mecanismo de evitación (Gu et al., 2024).

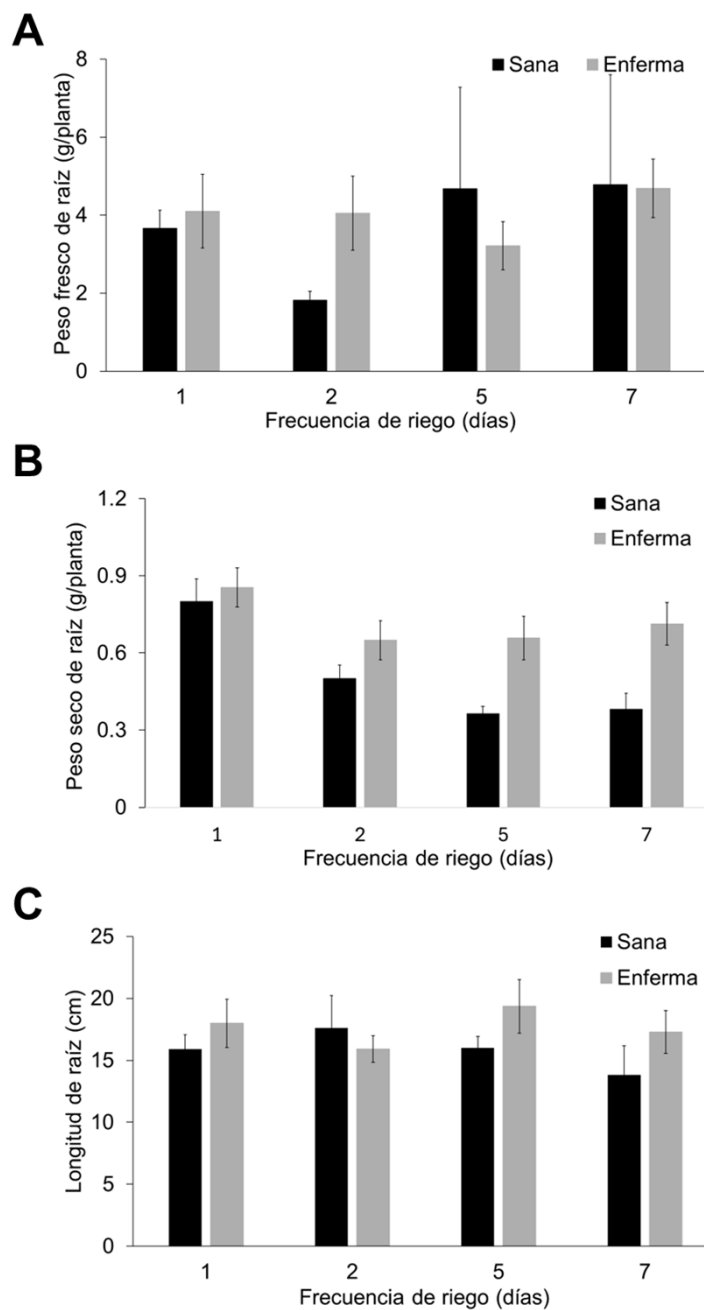


Figura 19. Respuesta de crecimiento en raíces de plantas sanas e infectadas por virus del mosaico del tabaco de jitomate var. Aztek sometidas a diferentes frecuencias de riego. A, Peso fresco de raíz; B, Peso seco de raíz; C, Longitud de raíz. Los valores representan promedios ($n = 7$) $\pm$ error estándar.

Las investigaciones realizadas en plantas bajo estrés hídrico beneficiadas por infecciones virales solo evalúan el crecimiento vegetativo de las plantas. No

obstante, para posibles aplicaciones agronómicas o biotecnológicas, es necesario evaluar el rendimiento y calidad de los órganos de interés comercial, en este caso, los frutos. Para comenzar la evaluación, se contabilizaron el número de racimos y de flores por plantas. Los datos mostraron que las plantas sanas disminuyeron el número de racimos por planta, pero incrementaron su número de flores en respuesta a al estrés hídrico, mientras que las plantas infectadas no mostraron cambios notables en ambos parámetros (Figura 20A y 20B). En el caso de las plantas sanas, el incremento de flores puede explicarse mediante un proceso conocido como “evasión”. En este contexto, las plantas pueden adoptar tres comportamientos ante el estrés, evasión, evitación y tolerancia. El primero sucede al acelerar o hacer más lento el proceso de reproducción, en este caso incremento de producción de flores, de tal manera que se asegure la producción de la progenie al asegurar una mayor subsistencia de frutos (Gu et al., 2024).

Estos resultados indicaron que potencialmente las plantas sanas producirían un mayor número de frutos, sin embargo, las flores de las plantas sanas cayeron de forma prematura, por lo cual produjeron un menor número de frutos que las plantas infectadas, las cuales lograron mantener su rendimiento frutal. Interesantemente, al evaluar el rendimiento de frutos por planta, se observó que, en frecuencia de riego de 5 y 7 días, las plantas sanas no lograron producir frutos maduros (Figura 20C), y aquellos frutos producidos en plantas con riego cada 5 días cayeron prematuramente antes de comenzar su maduración. Por otro lado, las plantas infectadas con TMV con el mismo intervalo de riego obtuvieron producción de frutos maduros e incluso las plantas con riego cada 7 días obtuvieron un rendimiento muy cercano al de las plantas sanas con riego cada 24 h (Figura 20D). Estos datos indican que el TMV ayuda a su hospedero no sólo a tolerar efectos de estrés hídrico, si no que los efectos positivos del TMV incrementan con forme el estrés hídrico es más severo. Finalmente, que las plantas sin infección no tienen la capacidad de desarrollar tolerancia por si solas.

Interesantemente, los frutos provenientes de plantas infectadas, específicamente aquellos provenientes de plantas con frecuencias de riego cada 5 y 7 días mostraron tener mayor firmeza y contenido de sólidos solubles totales (Figura 20E y 20F); adicionalmente, la infección mostró una tendencia de incremento de la luminosidad (L) y tono amarillo (B) evaluado en colorimetría de los frutos (Anexo I), lo cual demostró que la infección viral no sólo ayuda a su hospedero a tolerar el estrés hídrico y mantener su rendimiento, si no que incrementa la calidad de los frutos producidos.

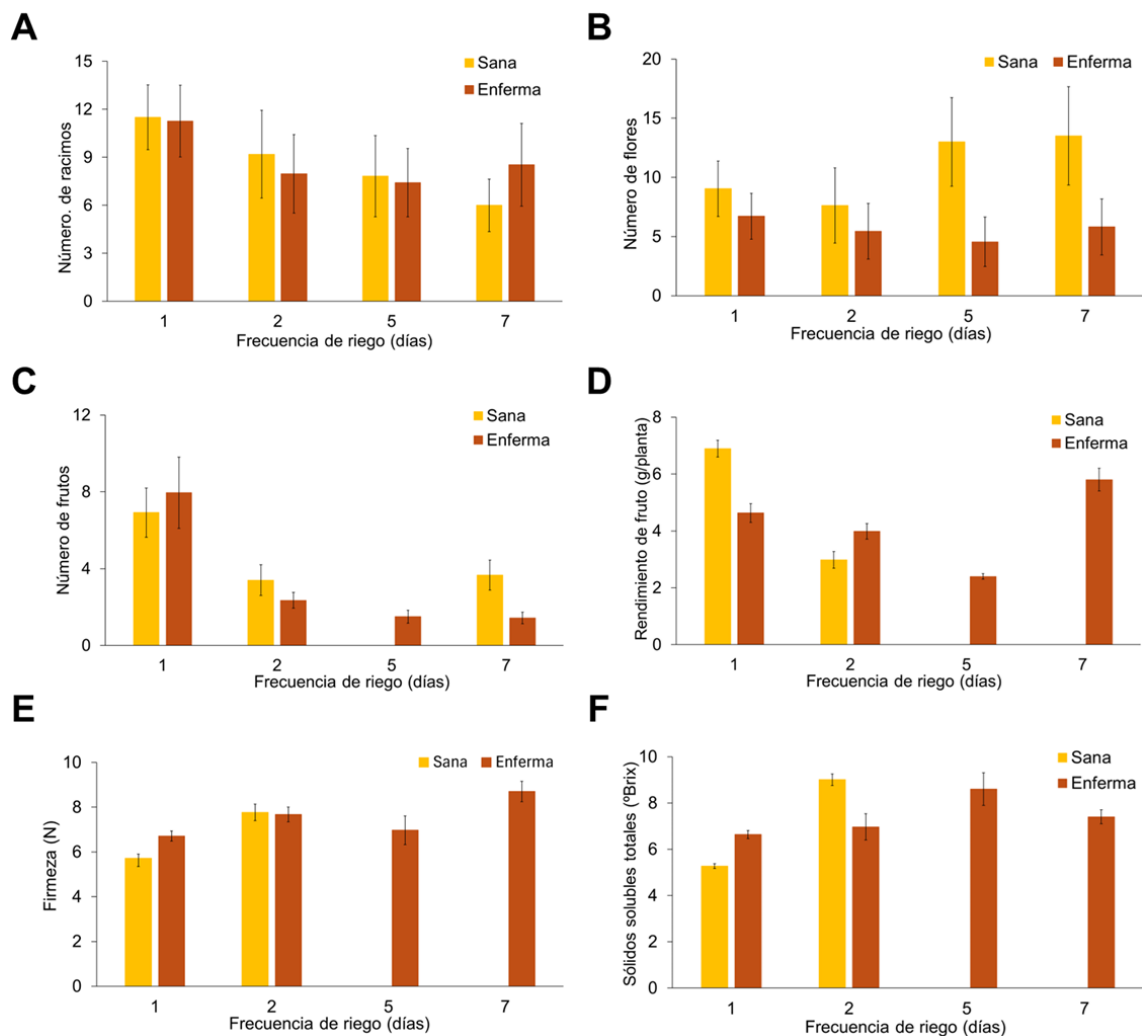


Figura 20. Respuesta de crecimiento de órganos reproductivos producidos por plantas sanas en infectadas por virus del mosaico del tabaco de jitomate var. Aztek sometidas a diferentes frecuencias de riego. A, Número de racimos; B,

Número de flores; C, Número de frutos; D, rendimiento total de frutos; E, Firmeza de fruto; F, Sólidos solubles totales. Los valores representan promedios ($n = 7$) $\pm$ error estándar.

Finalmente, los valores de fenoles totales también mostraron patrones diferenciales del contenido de este tipo de metabolitos, especialmente en frutos (Figura 21A). Interesantemente, en todos los regímenes de disponibilidad de agua, se observó un incremento en el contenido de fenoles totales en plantas infectadas sometidas a algún grado de estrés hídrico. Aunado a ello, los tallos de plantas sanas no produjeron flavonoides o al menos no por encima de la concentración más baja detectada en este estudio (Figura 21B). Aunado a ello, los frutos provenientes de plantas de sometidas a riego cada 5 y 7 días tampoco producen flavonoides (Figura 21B). Esto indica fuertemente que los compuestos fenólicos y especialmente los flavonoides podrían jugar un papel importante en el aseguramiento de la producción exitosa de frutos en plantas bajo estrés hídrico severo. Por ejemplo, en general, los frutos de plantas con infección mostraron tener un mayor potencial de estabilización de radicales, es decir un mayor potencial antioxidante para regular el estrés oxidativo (Figura 21C).

El incremento de compuestos fenólicos coincide con una de sus principales biológicas en plantas, la cual es la defensa vegetal (Kumar et al., 2020). Por ello, se observó un incremento del contenido de estos metabolitos en plantas infectadas incluidos con riego normal (cada 24 h) en respuesta a la infección viral por TMV. Interesantemente este incremento también se observó en hojas, tallos, raíces y frutos sanos e infectados. Esto puede deberse debido a que los polifenoles no sólo cumplen una función ecológica contra el estrés abiótico, sino que también son una de las primeras líneas de defensa contra el estrés oxidativo producido por déficit de agua (Kumar et al., 2020). Aún más interesante, un grupo específico de polifenoles, los flavonoides, mostraron acumularse específicamente en frutos infectados expuestos a grados más severos de estrés hídrico, lo cual resaltó su importancia como mecanismo de aseguramiento de la producción exitosa de frutos por el hospedero.

En este contexto, es sabido que, aunque en general los polifenoles son la principal línea de defensa antioxidante contra la sequía, los flavonoides destacan entre polifenoles en situaciones de estrés hídrico debido a su mayor capacidad antioxidante superior, otorgada por sus múltiples hidroxilos que les permiten reducir ROS, especies radicales que se incrementan durante eventos de estrés hídrico, dañando ADN y proteínas celulares (Mohagheghian et al., 2025). Aunado a ello, su acumulación citoplasmática y en cloroplastos les permite detoxificar de manera altamente eficiente moléculas oxidativas como el peróxido de hidrógeno protegiendo el aparato fotosintético (Ahmed et al., 2021).

Los flavonoides también son capaces de regular la producción de fitohormonas y el comportamiento estomático. Por ejemplo, las antocianinas y flavonoles modulan las vías de señalización celular de la planta, lo que influye en el cierre de los estomas y el ajuste osmótico para evitar la pérdida de agua (Sharma et al., 2019). Estudios científicos sobre la ruta biosintética de los fenilpropanoides (la cual activa la planta al detectar sequía) demuestran que la mayor concentración de flavonoides específicos, como quercetina o kaempferol, está estrechamente ligada a una mayor tolerancia a la falta de agua (Nayak, 2025). Esto se vio también reflejado en el mayor potencial antioxidante observado en frutos provenientes de plantas infectadas por TMV, puesto que los polifenoles son uno de los metabolitos con mayor capacidad antioxidante (Scalbert et al., 2005).

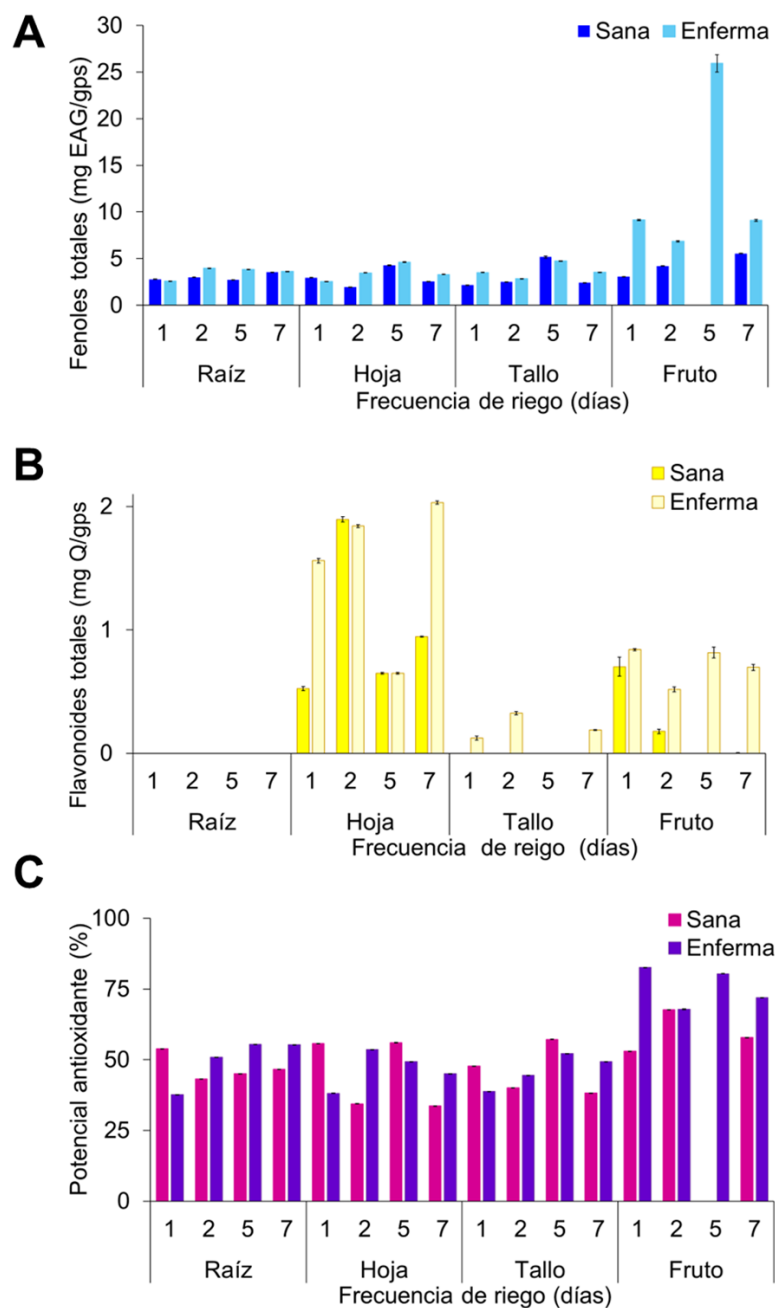


Figura 21. Variabilidad de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante en órganos de plantas sanas e infectadas por virus del mosaico del tabaco de jitomate var. Aztek sometidas a diferentes frecuencias de riego. A, Número de racimos; B, Número de flores; C, Número de frutos; D, rendimiento total de frutos; E, Firmeza de fruto; F, Sólidos solubles totales. Los valores representan promedios ($n = 7$) $\pm$ error estándar. EAG = equivalentes a ácido gálico; Q = equivalentes a quercetina; gps = gramos de pesos seco.

3.10.2. Análisis de Componentes Principales (PCA)

El análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés) se utilizó como una herramienta de reducción de dimensionalidad para simplificar la interpretación visual de la variación multivariada de las variables fisiológicas y bioquímicas evaluadas. Este análisis permitió identificar patrones de agrupamiento, además de asociaciones entre agrupaciones y variables. El modelo produjo 10 componentes principales (PCs), los cuales explicaron el 81.4 % de la variabilidad total del modelo. El PC1 capturó el 20.5 % de la variabilidad del modelo, mientras que el PC2 capturó el 15.5 %. El modelo evidencio tendencias de agrupamiento dictadas por los factores infección y intervalo de riego (restricción hídrica) (Figura 22).

El PCA mostró una diferenciación general entre plantas sanas e infectadas con TMV, principalmente a lo largo del PC1 (Figura 22A), mientras que el PC2 mostró separación parcial dictada por la restricción hídrica de los tratamientos (Figura 22B). La separación mostró que la infección viral modificó las características morfométricas, de peso y contenido de polifenoles de las plantas infectadas. En cuanto a la frecuencia de riego, el “score plot” mostró que las plantas con riego cada 24 h (testigo) se diferenciaron claramente de las que sufrieron restricción hídrica. Por ejemplo, las plantas con riego cada 48 h se separaron de las plantas testigo, lo cual significa que la restricción hídrica también modificó los parámetros morfométricos y contenido de polifenoles. No obstante, el PCA indicó que las características vegetales evaluadas eran prácticamente iguales entre plantas regadas cada 120 y 168 h, lo cual indicó que una restricción de 120 h de riego produjo el mayor estrés antes del punto de marchitez permanente.

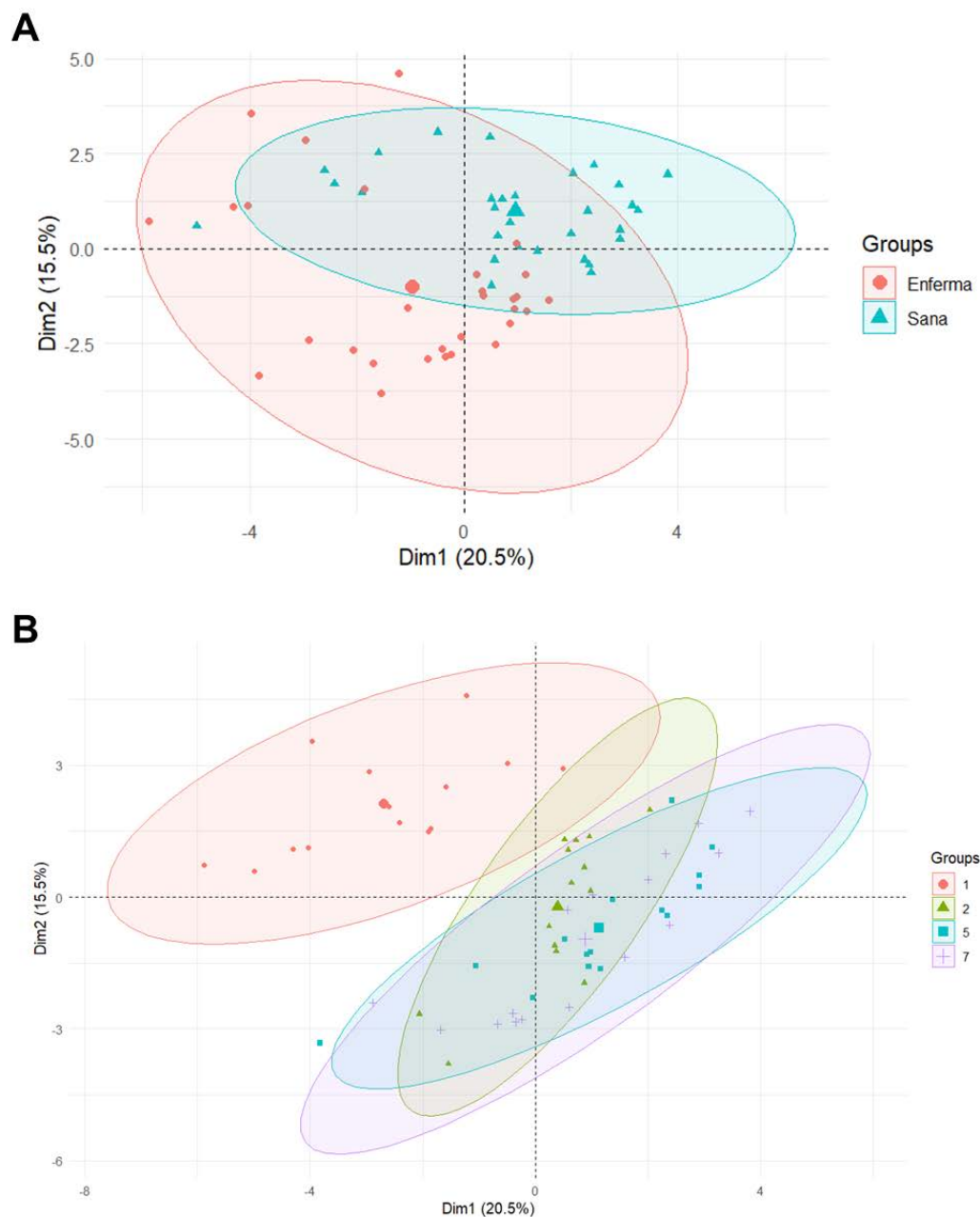


Figura 22. Análisis de Componentes Principales de variables morfológicas, peso y bioquímicas agrupadas por (A) estado de infección y (B) frecuencia de riego. 1 = riego cada 24 h, 2 = riego cada 48 h, 5 = riego cada 120 h y 7 = riego cada 168 h.

Para obtener más información sobre el modelo y las variables, los PCs retenidos fueron sometidos a análisis de ANOVA. Este análisis confirmó que la mayor parte de la variación de la población analizada fue explicada por los primeros componentes. En el PC1 se detectaron efectos significativos tanto del grado de

restricción hídrica como del estado de infección, no obstante, la interacción de estos factores no fue significativa para este PC, indicando que este componente respondió de manera independiente a cada factor. En contraste, se determinaron efectos significativos del intervalo de riego, la condición sanitaria y su interacción en el PC2, lo cual indicó que el estado de infección (sano o infectado) afectó diferencialmente la respuesta fisiológica y bioquímica de las plantas de jitomate a cada frecuencia de riego.

En cuanto a los otros componentes, el PC3 mostró efectos significativos asociados al estado de infección, mientras que el PC4 presentó efectos significativos del intervalo de riego, estado de infección y su interacción. El PC5 mostró efectos significativos del intervalo de riego y de la interacción, aunque no del estado de infección. Por otro lado, los componentes del PC6 al PC9 no presentaron efectos significativos, sugiriendo que capturaron principalmente variación residual no asociada con los factores evaluados. Finalmente, el PC10 mostró una interacción significativa, aunque debido al bajo porcentaje de variabilidad explicada por este PC, este resultado debe interpretarse con cautela.

Posteriormente, para entender las relaciones entre las agrupaciones observadas en el PCA y las variables que dictaron la separación de dichas agrupaciones, se construyó un Biplot al sobreponer el “score plot” y el “loading plot” del modelo; en dicho modelo se integraron simultáneamente las observaciones, los grupos correspondientes a la interacción intervalo de riego $\times$ condición sanitaria y las variables morfológicas, biomasa y compuestos bioquímicos evaluados.

Debido a los factores y sus grados de variabilidad el PCA resultó en un alto grado de solapamiento entre grupos. No obstante, cabe resaltar que los grupos de plantas sanas e infectadas con TMV se separaron del resto de tratamientos y se asociaron a cambios en peso fresco y seco de órganos aéreos y raíz, así como caracteres de los frutos, mientras que las variables más asociadas a los grupos de los otros tratamientos estuvieron más relacionadas con producción de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante, posiblemente como mecanismos de adaptación a el estrés causado por el estrés hídrico y la interacción con su

estado de infección (Figura 23). a

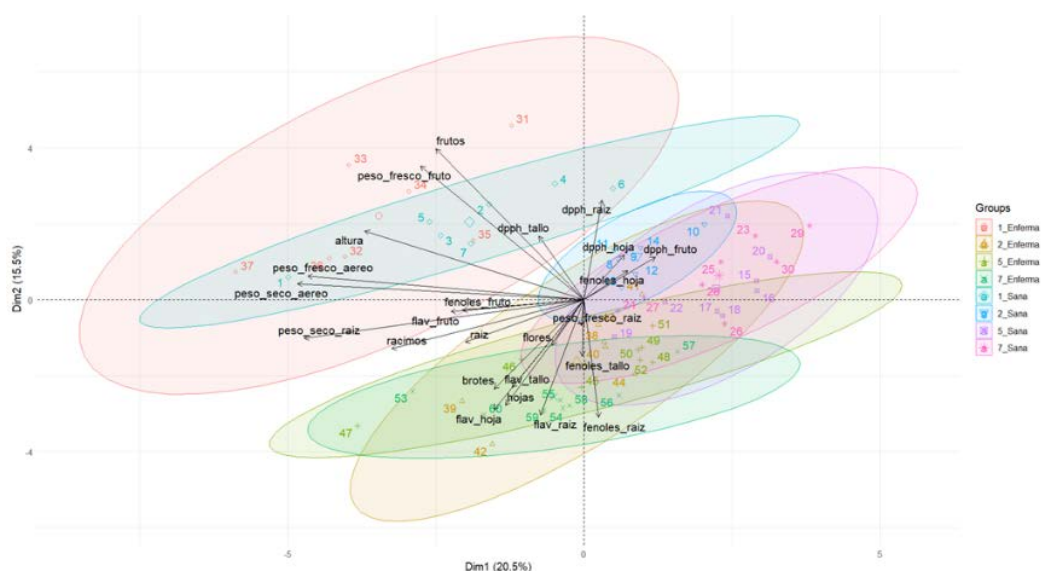


Figura 23. Biplot del Análisis de Componentes Principales (PCA) para variables morfológicas y bioquímicas en jitomate var. 'Aztek' sanas e infectadas con TMV en diferentes intervalos de riego; 1 = riego cada 24 h, 2 = riego cada 48 h, 5 = riego cada 120 h y 7 = riego cada 168 h.

Para confirmar diferencias estadísticamente significativas entre grupos de muestras predefinidos en el PCA, se realizó una prueba de análisis de varianza multivariante permutacional (PERMANOVA), basada en distancia euclidiana. Esta prueba confirmó efectos significativos de los factores intervalo de riego, estado de infección y de su interacción sobre el conjunto de variables morfológicas, de biomasa y bioquímicas evaluadas y los grupos asociados a dichas variables. El intervalo de riego fue el factor que explicó la mayor proporción de la variación multivariada total (20.9 %), mostrando un efecto significativo ($F = 6.075$, $p = 0.001$). Por su parte, el estado de infección explicó el 11.0 % de la variación total ($F = 9.583$, $p = 0.001$). Asimismo, la interacción intervalo de riego $\times$ condición sanitaria resultó significativa ($F = 2.431$, $p = 0.001$), explicando únicamente el 8.4 % de la variación. El resto de la variabilidad fue atribuida a factores biológicos desconocidos.

Estos resultados indican que tanto el déficit hídrico como la presencia de TMV modificaron significativamente la respuesta multivariada de las plantas y que el efecto del intervalo de riego dependió del estado fitosanitario. Esto confirma que

la interacción entre estrés abiótico y biótico influyó de manera importante en los patrones morfológicos, productivos y bioquímicos observados en *Solanum lycopersicum* var. 'Aztek'.

La prueba de homogeneidad de dispersión multivariada no detectó diferencias significativas entre los grupos definidos por la interacción intervalo de riego × condición sanitaria ($F = 1.595$, $p = 0.158$). Estos resultados indican que la variabilidad interna entre grupos fue estadísticamente homogénea, cumpliéndose así el supuesto de dispersión similar requerido para la interpretación de la PERMANOVA. Esto refuerza la evidencia de que el intervalo de riego, la condición sanitaria y su interacción modificaron de manera significativa la respuesta morfológica, productiva y bioquímica de *Solanum lycopersicum* var. 'Aztek'.

Adicionalmente, la ordenación de la dispersión multivariada basada en distancia euclidiana mostró una separación más definida en un análisis de coordenadas principales (PCoA, por sus siglas en inglés) que el del PCA (Figura 24). En el gráfico de visualización de este análisis se logró diferenciar claramente el grupo de plantas sanas e infectadas con TMV con frecuencias de riego mayores a 48 h.

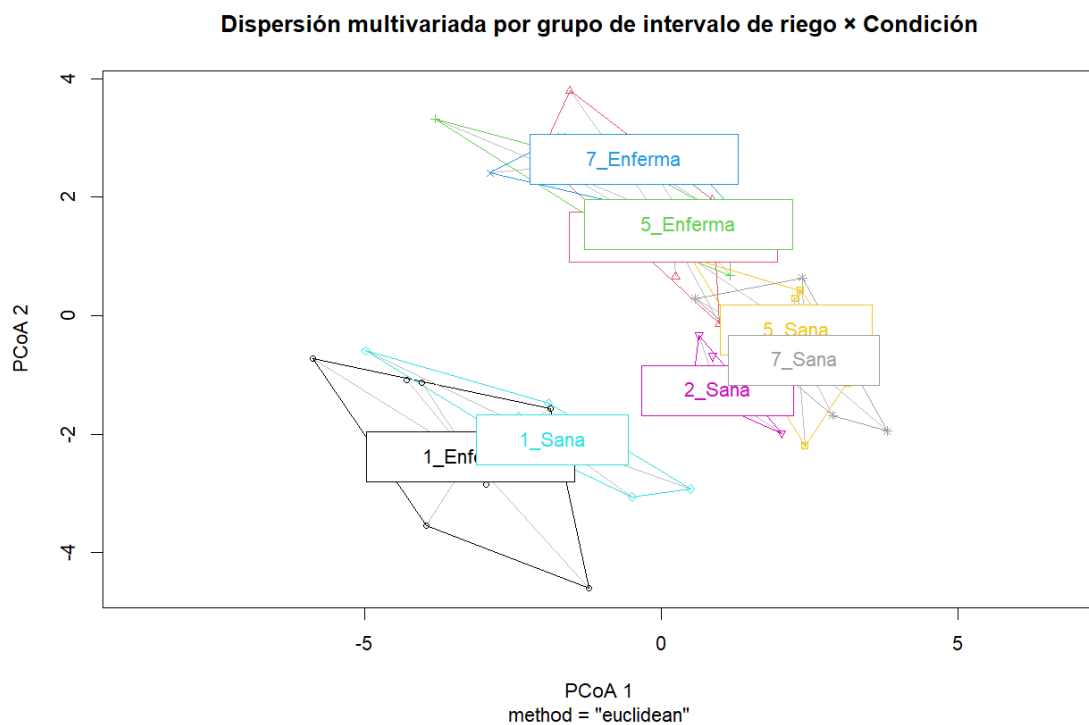


Figura 18. Dispersión multivariada basada en el Análisis de Coordenadas Principales (PCoA) para los grupos de intervalo de riego y condición sanitaria.



Figura 25. Contraste de crecimiento en *S. lycopersicum* var. 'Aztek' (165 días). Se compara una planta inoculada con TMV (maceta rosa, T2, riego cada 48 h), la cual presentó mayor vigor foliar y crecimiento vegetativo, frente a una planta sana (maceta verde) sometida al mismo intervalo de riego, que mostró una menor tasa de crecimiento.

Finalmente, con el objetivo de clarificar y comprobar la separación, especialmente entre los grupos con frecuencia de riego mayor a 48 h, se realizó un análisis discriminante lineal (LDA). El modelo mostró una separación más clara entre los grupos definidos por la interacción intervalo de riego $\times$ estado de infección (Figura 26). El eje discriminante 1 (LD1) separó principalmente a los tratamientos correspondientes al intervalo de riego, mientras que el LD2 separó a los grupos con base en su estado de infección, plantas sanas e infectadas. No obstante, además de la clarificación de la separación de grupos, lo interesante de este análisis es que, a pesar de ser un análisis dirigido, los grupos con frecuencias de riego de 48, 120 y 168 h de riego infectados por TMV no fueron separados entre sí, lo cual confirma que la infección viral ayudó a reducir los efectos del estrés hídrico sobre los parámetros morfológicos, fisiológicos y bioquímicos de estos tratamientos, resultando en su traslapamiento en el “score plot”. Lo anterior demuestra la capacidad del TMV para ayudar a su hospedero a tolerar los efectos del estrés hídrico.

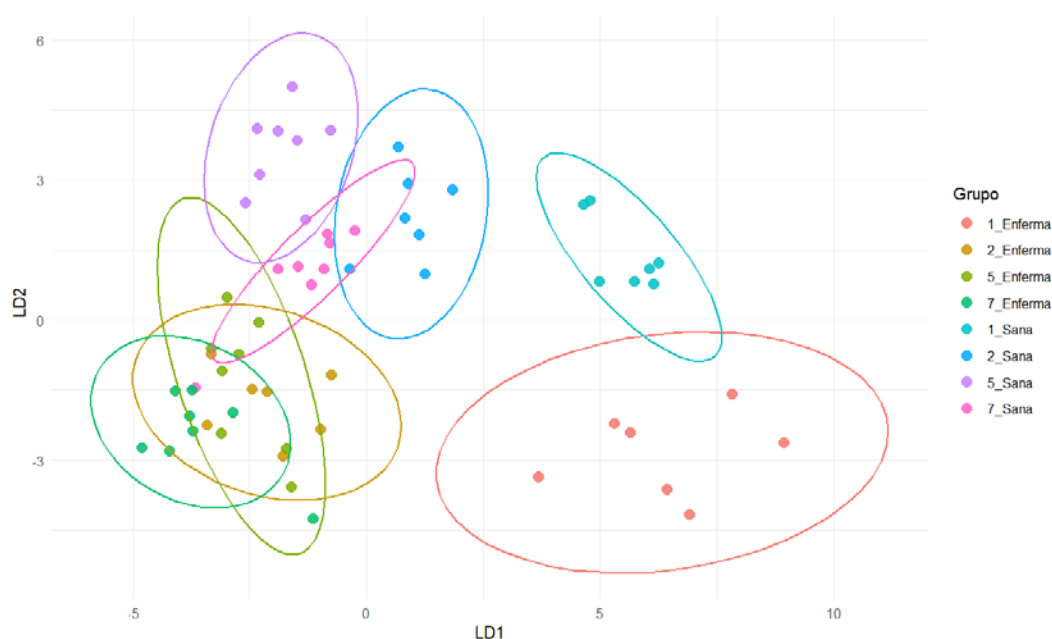


Figura 26. Análisis Discriminante Lineal (LDA) para la separación dirigida de grupos por intervalo de riego y estado de infección.

Los ANOVA univariados con corrección de Benjamini–Hochberg permitieron identificar las variables individuales que contribuyeron a las diferencias

multivariadas observadas entre tratamientos y condiciones sanitarias. La condición sanitaria presentó efectos significativos principalmente sobre variables bioquímicas y de biomasa, destacando el contenido de flavonoides totales en hojas, en raíz y en tallo, el peso seco de raíz, la capacidad antioxidante del fruto, el peso fresco y seco de órganos aéreos, el contenido de fenoles totales en raíz y frutos. Entre ellas, el contenido total de flavonoides en hojas mostró el efecto más marcado asociado con la infección por TMV, seguida por las mismas variables en raíz y tallo, lo que evidencia una fuerte respuesta especializada del metabolismo de polifenoles ante la presencia de TMV en el hospedero.

Por otra parte, el intervalo de riego presentó un efecto significativo principalmente sobre variables relacionadas con productividad, destacando la variable frutos, la cual mostró diferencias importantes entre los distintos niveles de restricción hídrica.

3.11. CONCLUSIONES

La interacción entre el déficit hídrico y la condición sanitaria modificó significativamente la respuesta morfofisiológica, productiva y bioquímica de *Solanum lycopersicum* var. 'Aztek'. La infección por TMV beneficia la supervivencia de las plantas de jitomate evaluadas frente al estrés hídrico y permite la producción de frutos. Lo anterior se logra mediante modificaciones de relaciones fuente-demanda que impactan todos los órganos de la planta. Aunado a ello, la plasticidad metabólica observada en compuestos fenólicos, específicamente flavonoides, se asocia a la capacidad de formar frutos en plantas infectadas con TMV bajo condiciones de estrés hídrico severo, posiblemente confiriéndoles mayor capacidad de manejo de estrés oxidativo causado por la restricción hídrica. Esta investigación representa la primera prueba de que el uso de virus de baja agresividad son una herramienta útil para conferir tolerancia a sequía no sólo en tejidos vegetativos, si no que permiten obtener producción de frutos de alta calidad para consumo humano.

3.12. LITERATURA CITADA

- Ahmed, U., Rao, M. J., Qi, C., Xie, Q., Noushahi, H. A., Yaseen, M., ... & Zheng, B. (2021). Expression profiling of flavonoid biosynthesis genes and secondary metabolites accumulation in *Populus* under drought stress. *Molecules*, 26(18), 5546. <https://doi.org/10.3390/molecules26185546>
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT – Food Science and Technology*, 28(1), 25–30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
- Chang, C., Yang, M., Wen, H., & Chern, J. (2002). Estimation of total flavonoid content in propolis by two complementary colorimetric methods. *Journal of Food and Drug Analysis*, 10(3), 178–182. *Journal of Food and Drug Analysis*
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2024). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos: Texcoco, México*. INEGI PDF
- Kumar, S., Abedin, M. M., Singh, A. K., & Das, S. (2020). Role of phenolic compounds in plant-defensive mechanisms. In A. Kumar & V. K. Tripathi (Eds.), *Plant phenolics in sustainable agriculture* (Vol. 1, pp. 517–532). Springer
- Liu, W., Liu, K., Chen, D., Zhang, Z., Li, B., El Mogy, M. M., Tian, S., & Chen, T. (2022). *Solanum lycopersicum*, a model plant for the studies in development biology, stress biology and food science. *Foods*, 11(16), 2402. <https://doi.org/10.3390/foods11162402>
- Mohagheghian, B., Saeidi, G., & Arzani, A. (2025). Phenolic compounds, antioxidant enzymes, and oxidative stress in barley (*Hordeum vulgare* L.) genotypes under field drought-stress conditions. *BMC Plant Biology*, 25(1), 709. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-05964-7>

- Nayak, J. K., Mohanty, D., Mahapatra, D., Mondal, S., Mohanty, A., Sangeeta, S., ... & Panda, B. (2025). Flavonoids: A natural shield of plants under drought stress. In *Plant Secondary Metabolites—Occurrence, Structure and Role*. IntechOpen
- Pandey, P., Irulappan, V., Bagavathiannan, M. V., & Senthil-Kumar, M. (2017). Impact of combined abiotic and biotic stresses on plant growth and avenues for crop improvement by exploiting physio-morphological traits. *Frontiers in Plant Science*, 8, 537. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00537>
- Sandoval-Ceballos, M. G., Andwe, N., Charles, J. H., Martínez-Guerra, G., Ramírez-Ramírez, I., Maldonado-Peralta, R., Marshall, L., Bosch, C., Cruz-Huerta, N., Gonzalez-Santos, R., León, P., Chávez-Servia, J. L., González-Hernández, V. A., Phelps, J., & Toledo-Ortiz, G. (2021). The importance of conserving Mexico's tomato agrobiodiversity to research plant biochemistry under different climates. *Plants, People, Planet*, 3, 703–709. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10218>
- Scalbert, A., Johnson, I. T., & Saltmarsh, M. (2005). Polyphenols: Antioxidants and beyond. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 81(1), 215S–217S. <https://doi.org/10.1093/ajcn/81.1.215S>
- Seleiman, M. F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., ... & Battaglia, M. L. (2021). Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants*, 10(2), 259. <https://doi.org/10.3390/plants10020259>
- Sharma, A., Shahzad, B., Rehman, A., Bhardwaj, R., Landi, M., & Zheng, B. (2019). Response of phenylpropanoid pathway and the role of polyphenols in plants under abiotic stress. *Molecules*, 24(13), 2452. <https://doi.org/10.3390/molecules24132452>
- Singleton, V. L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventós, R. M. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-

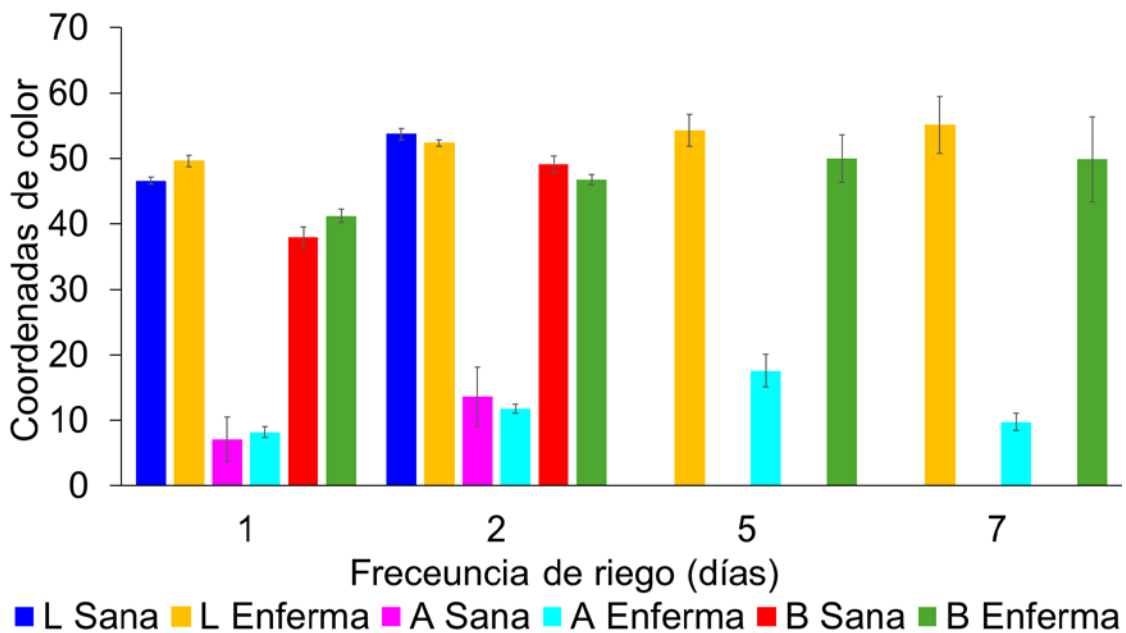
- Ciocalteu reagent. In *Methods in Enzymology* (Vol. 299, pp. 152–178). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(99\)99017-1](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(99)99017-1)
- Suzuki, N., Rivero, R. M., Shulaev, V., Blumwald, E., & Mittler, R. (2015). Combinations of abiotic and biotic stress. *New Phytologist*, 203(1), 32–43. <https://doi.org/10.1111/nph.12797>
- Vázquez-García, J. J., Jerez-Mompanié, E., & Martín-Martín, R. (2017). Respuesta del crecimiento y rendimiento del cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) a diferentes regímenes de temperatura. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(6), 1335–1346. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i6.296>
- Weather Spark. (2026). *El clima promedio en Texcoco, México, durante todo el año*. Weather Spark
- Zamora-Macorra, E. J., Aviña-Padilla, K., Hammond, R. W., & Ochoa-Martínez, D. L. (2023a). Comparación de protocolos moleculares para la detección del virus del fruto rugoso marrón del jitomate en hospedantes solanáceos. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 41(5), 1–17. <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2023-5>
- Zia, R., Nawaz, M. S., Siddique, M. J., Hakim, S., & Imran, A. (2021). Plant survival under drought stress: Implications, adaptive responses, and integrated rhizosphere management strategy for stress mitigation. *Microbiological Research*, 242, 126626. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126626>

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES GENERALES

La presente investigación permitió concluir que, la respuesta fisiológica y bioquímica de *Solanum lycopersicum* var. 'Aztek' estuvieron determinados por una interacción significativa entre el régimen hídrico y el estado fitosanitario de las plantas. Los resultados demostraron que la infección por el Virus del Mosaico del Tabaco (TMV) resultó ser benéfica ante el estrés hídrico causado por las diferentes frecuencias de riego al incrementar la producción de biomasa aérea, radicular y permitir la obtención de frutos de alta calidad bajo condiciones severas de estrés hídrico. Aunado a ello, el mayor contenido de compuestos polifénolicos, como flavonoides, no sólo tiene implicaciones de tolerancia a estrés hídrico, si no desde el punto de vista comercial, estos frutos son de mayor valor nutracéutico para el consumidor. Por lo anterior, el uso de virus de baja agresividad, en este caso el TMV, representa una estrategia innovadora con potencial como medida de combate al cambio climático en zonas con acceso limitado al agua. No obstante, otras pruebas deben de realizarse, por ejemplo, la detección del virus en frutos provenientes de plantas inoculadas y la respuesta al restablecimiento del riego normal después de un déficit hídrico severo, condiciones en las que el TMV produce sus mejores efectos sobre el crecimiento vegetal.

4.1. Anexos

Anexo I. Análisis colorimétrico de frutos provenientes de plantas de tomate var. Aztek sanas e infectadas con virus del mosaico del tabaco sometidas a riego cada 1, 2, 5 y 7 días.



Las barras representan valores promedios $\pm$ error estándar de los canales de colores L*A*B en la escala de la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE).