



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA
COORDINACIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO**

**INTERACCIÓN ENTRE EL DÉFICIT DE PRESIÓN DE
VAPOR Y LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DE LA
SOLUCIÓN NUTRITIVA EN LA FISIOLOGÍA,
RENDIMIENTO Y CALIDAD DE TOMATE DE
INVERNADERO**

**TESIS PROFESIONAL
QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

PRESENTA

MISAEI SÁNCHEZ MANZO

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

DRA. ANA MARÍA CASTILLO GONZÁLEZ



APROBADA



CHAPINGO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO, MAYO DEL 2023

**INTERACCIÓN ENTRE EL DÉFICIT DE PRESIÓN DE VAPOR Y LA
CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA EN LA
FISIOLOGÍA, RENDIMIENTO Y CALIDAD DE TOMATE DE INVERNADERO**

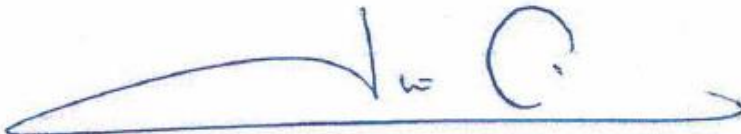
Tesis realizada por **MISAELE SÁNCHEZ MANZO** bajo la supervisión del comité asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

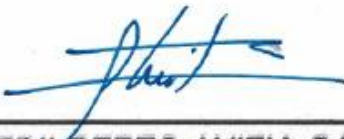
DIRECTOR:


DRA. ANA MARÍA CASTILLO GONZÁLEZ

CO-DIRECTOR:


DR. LUIS ALONSO VALDEZ AGUILAR

ASESOR:


DR. EDILBERTO AVITIA GARCÍA

AGRADECIMIENTOS

- A la Universidad Autónoma Chapingo por brindarme la oportunidad de adquirir nuevos conocimientos.
- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico brindado para la realización del presente trabajo.
- Al Departamento de Fitotecnia y al Instituto de Horticultura y a los Departamentos de Horticultura y Suelos de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en Saltillo Coahuila, por facilitar sus instalaciones y equipo necesario para la realización de este proyecto.
- Al Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar y a la Dra. Ana María Castillo González por su amistad, todo el tiempo y apoyo que me brindaron, además de su dedicación, consejos y gran ayuda durante la realización de este trabajo.
- Al Dr. Edilberto Avitia García, por su amistad, apoyo brindando en laboratorio y acertados comentarios durante la realización de este proyecto.
- A todos los profesores que durante los años de maestría me compartieron sus conocimientos que fueron de mucha ayuda para mi desarrollo personal y de este trabajo.

DATOS BIOGRAFICOS

Misael Sánchez Manzo es originario del poblado Emiliano Zapata, Villamar, Michoacán. Realizó sus estudios de nivel superior en la Facultad de Agrobiología “Presidente Juárez”, perteneciente a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. En el 2020, obtuvo el título de Ingeniero Agrónomo, número de cédula profesional 12330214, con la tesis “FERTILIZACIÓN MINERAL BALANCEADA Y USO DE FERTILIZANTE ORGÁNICO Y BIOLÓGICO EN EL RENDIMIENTO Y RENTABILIDAD DE MAÍZ (*Zea mays* L.) DE TEMPORAL”. Laboró como Auxiliar de supervisión y capacitador de productores suscritos a la Asociación de Productores y Empacadores de Aguacate de México (APEAM) en el sistema de reducción de riesgos contaminantes del 2018 al 2019. Laboró como asesor de productores y productor de granos y hortalizas en el estado de Michoacán de 2019 al 2021. Para continuar su formación académica, ingresó al Posgrado en Horticultura de la Universidad Autónoma Chapingo, para realizar sus estudios de Maestría de enero de 2021 a diciembre de 2022.

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	i
LISTA DE FIGURAS	ii
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	3
2.1 General:	3
2.2 Específicos:	3
III. HIPOTESIS	3
IV. REVISIÓN DE LITERATURA	4
4.1 Agricultura Protegida en México	4
4.1.1 Factores que impulsan la agricultura protegida en México	5
4.1.2 Principales cultivos y distribución de la agricultura protegida en México .	5
4.1.3 Caracterización de la tecnología en invernaderos de la agricultura protegida en México	6
4.2 Producción hidropónica bajo invernadero	6
4.2.1 Solución nutritiva	8
4.2.2 Conductividad eléctrica de la solución nutritiva	9
4.2.3 pH de la solución nutritiva	10
4.3 Déficit de presión de vapor (DPV)	11
4.3.1 Cálculo del déficit de presión de vapor	13
4.3.2 Déficit de presión de vapor óptimo	14
V MATERIALES Y MÉTODOS	15
5.1 Ubicación del experimento y condiciones culturales	15
5.2 Material biológico, sistema de producción, trasplante y densidad de plantación	15
5.3 Manejo de las plantas	15
5.4 Cámaras de cultivo y control de la HR	16
5.5 Temperatura, humedad relativa y radiación fotosintéticamente activa	16
5.6 Déficit de presión de vapor	17
5.7 Conductividad eléctrica de la solución nutritiva	18

5.8 Tratamientos, diseño y unidad experimental.....	19
5.9 Variables evaluadas.....	20
5.9.1 Planta.....	20
5.9.1.1 Altura y diámetro de tallo	20
5.9.1.2 Peso fresco de hojas y tallos	20
5.9.1.3 Peso seco de hojas y tallos	20
5.9.1.4 Potencial hídrico de la hoja.....	20
5.9.1.5 Intercambio gaseoso	21
5.9.1.6 Concentración nutrimental de hojas	21
5.9.1.7 Rendimiento promedio por planta.....	21
5.9.2 Fruto	22
5.9.2.1 Fenoles.....	22
5.9.2.2 Flavonoides	22
5.9.2.3 Capacidad antioxidante	23
5.9.2.4 Firmeza.....	23
5.9.2.5 Sólidos solubles totales	24
5.9.2.6 Acidez titulable	24
5.9.2.7 Licopeno	24
5.9.2.8 Azúcares totales	24
5.9.2.9 Azúcares reductores.....	25
5.9.2.10 Concentración nutrimental en frutos.....	25
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
6.1 Planta.....	26
6.1.1 Altura y diámetro del tallo	26
6.1.2 Peso fresco de hojas y tallos	27
6.1.3 Peso seco de hojas y tallos	28
6.1.4 Potencial hídrico de la hoja.....	29
6.1.5 Intercambio gaseoso.....	33
6.1.5.1 Tasa de asimilación neta	33
6.1.5.2 Conductancia estomática	34
6.1.5.3 Transpiración.....	35
6.1.5.4 Concentración intercelular de CO ₂	36

6.1.6 Rendimiento.....	37
6.1.7 Concentración nutrimental en hojas.....	40
6.1.7.1 Nitrógeno	40
6.1.7.2 Fósforo	40
6.1.7.3 Potasio.....	41
6.1.7.4 Calcio.....	42
6.1.7.5 Magnesio	43
6.1.7.6 Boro	44
6.2 Fruto.....	44
6.2.1 Contenido fenólico total	44
6.2.2 Flavonoides	45
6.2.3 Capacidad antioxidante en el fruto.....	45
6.2.4 Licopeno	47
6.2.5 Firmeza de fruto.....	49
6.2.6 Solidos solubles totales	51
6.2.7 Acidez titulable.....	52
7.2.8 Azúcares totales	53
6.2.9 Azúcares reductores	53
6.2.10 Concentración nutrimental en fruto	55
6.2.10.1 Nitrógeno	55
6.2.10.2 Fosforo	55
6.2.10.3 Potasio.....	55
6.2.10.4 Calcio.....	56
6.2.10.5 Magnesio	57
6.2.10.6 Boro	58
VII CONCLUSIONES	59
VIII LITERATURA CITADA.....	60

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Temperatura, humedad relativa (HR) y radiación fotosintéticamente activa (PAR) promedio, máxima y mínima registrada mensualmente en cada cámara de cultivo de tomate en hidroponía.	17
Cuadro 2. Déficit de presión de vapor promedio mensual y total de cada cámara de cultivo de tomate en hidroponía.	18
Cuadro 3. Análisis químico del agua utilizada para el riego del cultivo de tomate.	18
Cuadro 4. Concentración mineral de macronutrientes y conductividad eléctrica de las diferentes soluciones nutritivas utilizadas en el cultivo de tomate.	19
Cuadro 5. Tratamientos aplicados en el cultivo de tomate en hidroponía.	19
Cuadro 6. Altura de planta y diámetro final del tallo en tomate bajo la interacción de distintas condiciones de déficit de presión de vapor (DPV) y diferentes niveles de conductividad eléctrica (CE) en la solución nutritiva.	26
Cuadro 7. Tasa de asimilación neta (A), conductancia estomática (Gs) y transpiración (Tr) en hojas de tomate afectadas por el déficit de presión de vapor (DPV) y la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva.	35
Cuadro 8. Relación entre el déficit de presión de vapor (DPV) y la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva en la concentración nutrimental de nitrógeno (N), fósforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg) y boro (B) en hojas de tomate cultivado en hidroponía.	43
Cuadro 9. Relación entre el déficit de presión de vapor (DPV) y la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva, con los compuestos fenólicos y capacidad antioxidante por cada 100 g ⁻¹ de peso fresco (PF) en el fruto de tomate.	47
Cuadro 10. Relación entre el déficit de presión de vapor (DPV) y la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva con los sólidos solubles totales (SST), acidez titulable y azúcares totales en frutos de tomate.	52
Cuadro 11. Relación entre el DPV y la CE de la SN en la concentración nutrimental de fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y boro (B) en frutos de tomate cultivados en hidroponía.	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Peso fresco de hoja y tallo de la planta de tomate bajo distintos niveles de déficit de presión de vapor (DPV). Columnas con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey, $p < 0.05$). Las columnas incluyen el error estándar.	27
Figura 2. Peso seco de hoja y tallo de la planta de tomate bajo distintos niveles de déficit de presión de vapor (DPV). Columnas con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey, $p < 0.05$). Las columnas incluyen el error estándar.	28
Figura 3. Promedio de tres lecturas en el potencial hídrico foliar de tomate, medido bajo distintos niveles de déficit de presión de vapor (DPV) y conductividad eléctrica (CE) en horas tempranas (08:00). Columnas con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey, $p < 0.05$). Las columnas incluyen el error estándar.	30
Figura 4. Interacción entre los distintos niveles de déficit de presión de vapor (DPV) y conductividad eléctrica (CE) en el potencial hídrico foliar de tomate en hidroponía, medido en horas del mediodía (14:00). Los promedios incluyen el error estándar.	32
Figura 5. Interacción entre el déficit de presión de vapor (DPV) y la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva en la concentración intercelular (Ci) de CO ₂ en hoja. Los promedios incluyen el error estándar.	36
Figura 6. Interacción entre el déficit de presión de vapor (DPV) y la conductividad eléctrica (CE) en la solución nutritiva sobre el rendimiento de tomate. Los promedios incluyen el error estándar.	38
Figura 7. Interacción entre el déficit de presión de vapor (DPV) y la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva en la concentración de potasio (K) en hojas de tomate. Los promedios incluyen el error estándar.	41
Figura 8. Interacción entre el déficit de presión de vapor (DPV) y la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva en la capacidad antioxidante del fruto en peso	

fresco (P.F) mediante la prueba DPPH. Los promedios incluyen el error estándar.	46
Figura 9. Interacción entre el déficit de presión de vapor (DPV) y la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva en la acumulación de licopeno en el fruto de tomate. Los promedios incluyen el error estándar.....	48
Figura 10. Firmeza del fruto de tomate en relación con distintos niveles de déficit de presión de vapor (DPV). Tratamientos con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey, $p < 0.05$). Las barras incluyen el error estándar.....	50
Figura 11. Interacción entre el déficit de presión de vapor (DPV) y la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva, en la acumulación de azúcares reductores en el fruto de tomate. Los promedios incluyen el error estándar.....	54
Figura 12. Interacción entre el déficit de presión de vapor (DPV) y la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva en la acumulación de nitrógeno (N) en el fruto de tomate. Los promedios incluyen el error estándar.....	56

RESUMEN

Interacción entre el Déficit de Presión de Vapor y la Conductividad Eléctrica de la Solución Nutritiva en la Fisiología, Rendimiento y Calidad de Tomate de Invernadero

La producción de tomate sin suelo en invernadero permite un mejor control de parámetros ambientales, por lo que es importante su manejo y optimización. En este estudio se combinaron la temperatura y la humedad relativa para regular el déficit de presión de vapor (DPV) que, combinado con el adecuado aporte de concentraciones nutrimentales en la solución nutritiva (SN), pueden ser determinantes en el rendimiento y calidad de frutos. El objetivo del presente trabajo fue evaluar la respuesta del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) al DPV, bajo distintos niveles de conductividad eléctrica (CE) de la SN en un sistema de cultivo sin suelo en invernadero. Los tratamientos fueron la combinación de tres niveles promedio de DPV (0.5, 1.3 y 1.6 kPa) y tres niveles de CE en la SN (2.2, 2.8 y 3.4 dS m⁻¹). Con el DPV de 0.5 y 1.3 kPa, se obtuvieron los mayores crecimientos vegetativos. El potencial hídrico en hojas (ψ_w) medido al medio día, fue menos negativo con el tratamiento, 0.5 kPa x 3.4 dS m⁻¹, 0.5 kPa x 2.8 dS m⁻¹, 0.5 kPa x 2.2 dS m⁻¹ y 1.3 kPa x 2.2 dS m⁻¹. El intercambio gaseoso se vio beneficiado con la disminución del DPV a 0.5 kPa. El rendimiento de fruto más alto se obtuvo con el tratamiento 0.5 kPa x 2.8 dS m⁻¹, 1.3 kPa x 2.2 dS m⁻¹ y 1.6 kPa x 2.2 dS m⁻¹. La mayor concentración de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante en fruto se observó con el DPV de 1.3 y 1.6 kPa. La acumulación de nutrimentos en hojas y fruto fue principalmente afectada por el DPV.

Palabras clave: Antioxidantes, control de DPV, estado hídrico, fotosíntesis, hidroponía, salinidad, transpiración.

¹Tesis de Maestría en Ciencias en Horticultura, Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Misael Sánchez Manzo

Director de tesis: Dra. Ana María Castillo González

ABSTRACT

Interaction between Vapor Pressure Deficit and Electrical Conductivity of Nutrient Solution on Greenhouse Tomato Physiology, Yield and Quality

Soil-less tomato production in greenhouses allows better control of environmental parameters, so it is important to manage and optimize them. In this study, temperature and relative humidity were combined to regulate the vapor pressure deficit (VPD), which, combined with the adequate supply of nutrient concentrations in the nutrient solution (NS), can be determinant in yield and fruit quality. The objective of the present work was to evaluate the response of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) to VPD under different levels of electrical conductivity (EC) of the NS in a soilless greenhouse cropping system. The treatments were the combination of three average VPD levels (0.5, 1.3 and 1.6 kPa) and three NS EC levels (2.2, 2.8 and 3.4 dS m⁻¹). With the VPD of 0.5 and 1.3 kPa, the highest vegetative growth was obtained. Leaf water potential (ψ_w) measured at midday was less negative with the treatments 0.5 kPa x 3.4 dS m⁻¹, 0.5 kPa x 2.8 dS m⁻¹, 0.5 kPa x 2.2 dS m⁻¹ and 1.3 kPa x 2.2 dS m⁻¹. Gas exchange was benefited by decreasing DPV to 0.5 kPa. The highest fruit yield was obtained with the 0.5 kPa x 2.8 dS m⁻¹ treatment, 1.3 kPa x 2.2 dS m⁻¹ and 1.6 kPa x 2.2 dS m⁻¹. The highest concentration of phenolic compounds and antioxidant capacity in fruit was observed with the DPV of 1.3 and 1.6 kPa. Nutrient accumulation in leaves and fruit was mainly affected by DPV.

Keywords: Antioxidants, hydric status, hydroponic, photosynthesis, salinity, transpiration, VPD control.

¹Master thesis in Science in Horticulture, Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo

Author: Misael Sánchez Manzo

Advisor: Dra. Ana María Castillo González

I. INTRODUCCIÓN

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es la hortaliza con mayor volumen de producción (186.8 millones de toneladas) y la segunda en cuanto a extensión superficial a nivel mundial (5.05 millones de hectáreas). China es el principal productor (64.7 millones de toneladas) y consumidor de tomate, mientras que Estados Unidos, es el principal importador (1.86 millones de toneladas); México, ocupa el noveno lugar a nivel mundial, con una producción de 3.44 millones de toneladas, de las cuales 1.34 millones se produjeron bajo invernadero (FAOSTAT, 2020; SIAP, 2021). En México, el tomate, se cultiva para atender la demanda nacional e internacional, es el principal exportador en el mundo (1.69 millones de toneladas) y representa la actividad agroindustrial más importante; en el 2020 tuvo un valor de producción de más de 31 mil millones de pesos (Barron & Rello, 2000; SIAP, 2021).

La producción de tomate en sistemas sin suelo bajo invernadero, permite un mejor control de parámetros ambientales y biológicos, que, junto a una nutrición mineral adecuada, determinan el rendimiento y calidad de frutos (Fanasca et al., 2006; Salas-Rivera et al., 2020). Es importante optimizar y controlar el manejo de las condiciones ambientales (humedad relativa, temperatura y radiación), ya que son los principales factores meteorológicos que regulan los procesos ecofisiológicos y metabólicos en las plantas, además de limitar el rendimiento; adicionalmente, la conductividad eléctrica (CE) apropiada para la producción de tomate está muy relacionada con dichas condiciones ambientales (Lara, 1999; Murata, 2001; Ruiz et al., 2008).

La CE, indica la concentración de iones en la solución nutritiva (SN), a medida que ésta es más alta, mayor es la capacidad de conducir corriente eléctrica y por consiguiente, mayor es la concentración de iones (Helbel et al., 2008). La CE es uno de los factores que determina el crecimiento, desarrollo y producción del cultivo de tomate, el aumento de la salinidad (alta CE) mejora la calidad físico-química del fruto, pero puede reducir el rendimiento (Feltrin et al., 2012; Moya et al., 2017). La

pérdida en el rendimiento de la fruta se puede atribuir a respuestas activas y pasivas de la planta, en condiciones salinas se reduce la absorción de agua por la raíz, debido a la reducción del potencial osmótico del sustrato, esto representa una forma pasiva; por otro lado, la forma activa se representa con cambios hormonales, ya que el ácido abscísico (ABA) en la raíz, se incrementa con la salinidad, este ABA inducido por el estrés, provoca reacciones en la parte vegetativa y reproductiva de la planta; el cierre de estomas y la reducción del crecimiento de las hojas (Munns, 2002; Krauss et al., 2006).

El cultivo de tomate en invernaderos con ambiente semi controlado, implica que las plantas están expuestas a condiciones ambientales contrastantes, como ocurre con el déficit de presión de vapor (DPV) (Salas-Rivera et al., 2020). El DPV mide la deficiencia de humedad en la atmósfera, a una humedad relativa y temperatura determinadas, en comparación con la humedad que debería de tener si la atmósfera estuviera saturada (Prenger y Ling, 2001). Fisiológicamente, el DPV es la fuerza impulsora de la transpiración, ya que afecta la diferencia de presión de vapor entre el interior de la hoja y el aire exterior; un bajo DPV, está relacionado con una baja tasa transpiratoria, lo que a su vez causa un reducido flujo de savia en el xilema del tallo, por el contrario, un alto DPV, estimula mayor transpiración de las plantas (Sweaf & Steppe, 2010; Song et al., 2021). Se ha reportado que en presencia de un $DPV < 1.5 \text{ kPa}$, se incrementó la tasa de crecimiento diurno del fruto de tomate debido a un aumento de la acumulación neta de agua proveniente del xilema (Guichard et al., 2005); otro estudio demostró que mantener $DPV \leq 0.8 \text{ kPa}$ durante las horas más secas del día, aumentó la acumulación de materia seca en brotes e incrementó el rendimiento de fruto por planta (Lu et al., 2015). Altos DPV aumentan la necesidad de la planta de extraer más agua por su raíz, lo que aumenta la absorción de sales, pudiendo causar un daño a las plantas bajo condiciones salinas, lo que sugiere una interacción importante entre el DPV y la CE (Tack et al., 2015); sin embargo, no hay información acerca de la interacción entre la CE y el DPV en la fisiología, estado nutrimental y productividad del cultivo de tomate cultivado sin suelo bajo invernadero. Por tal motivo, en la presente investigación se plantearon los siguientes objetivos:

II. OBJETIVOS

2.1 General:

Evaluar la respuesta del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) al DPV, bajo distintos niveles de CE de la SN en un sistema de cultivo sin suelo en invernadero.

2.2 Específicos:

Determinar el efecto del DPV y la CE de la SN en:

- a) El intercambio de gases y estado hídrico.
- b) La acumulación de peso fresco, seco y rendimiento de tomate
- c) El estado nutrimental de la planta.
- d) La calidad del fruto

III. HIPOTESIS

La CE de la SN óptima estará en función del DPV, lo cual conducirá a un mayor crecimiento y productividad, afectando el estatus nutrimental y fisiología de plantas de tomate en un sistema de cultivo sin suelo.

IV. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1 Agricultura Protegida en México

La actividad agrícola, en gran parte ha contribuido a la degradación del ambiente, se estima que, en los próximos años las necesidades de alimentos se duplicarán por lo que el desafío de la humanidad será satisfacer las demandas de una mayor población con menos tierra agrícola y agua (Moreno et al., 2011). La agricultura protegida (AP) es un sistema de producción realizado bajo diversas estructuras (plásticas, metálicas y vidrios) con la finalidad de proteger a los cultivos, al minimizar las restricciones que el medio ambiente y/o la limitación de recursos (agua o superficie), imponen al desarrollo de las plantas; entre otras ventajas; la AP permite el desarrollo de cultivos agrícolas fuera de su ciclo natural y en menor tiempo, se enfrenta con éxito a plagas y enfermedades, se obtienen mejores rendimientos en menor espacio, los productos son sanos y con un mejor precio en los mercados, generando evidentemente, un mejor ingreso para los productores (Moreno et al., 2011).

Se han desarrollado varios tipos de estructuras para la protección de las plantas, las cuales plantean alternativas para generar condiciones ambientales óptimas para el desarrollo de cultivos, de acuerdo con los requerimientos climáticos de cada especie y en concordancia con los factores climáticos de cada región (Juárez-López et al., 2011). Habitualmente, la AP se segmenta en tres tipos: invernaderos, macrotúneles y malla sombra; las tres técnicas están en auge en México, pero el desarrollo de los invernaderos es el que ha marcado la pauta de la AP mexicana; la superficie destinada a la AP pasó de 132 ha en 2003 a 4,877 en 2009 y hacia el 2017 se habían alcanzado 42,515 ha (Bastida, 2017; Hernández-Suárez, 2021).

Derivado de lo anterior, la adopción de este tipo de sistemas posibilita incrementar los rendimientos entre tres y 10 veces más que en cielo abierto y al mismo tiempo permite utilizar eficientemente los recursos e insumos, con lo que se logra una agricultura sostenible basada en el conocimiento profundo de este sistema de producción, como un medio tecnológico viable para mejorar la productividad y

reducir la pobreza del sector, pese a reconocerse el alto grado de especialización que se requiere para su manejo (Vargas-Canales et al., 2014; Vargas-Canales et al., 2018).

4.1.1 Factores que impulsan la agricultura protegida en México

Son diversos los factores y elementos que han impulsado el desarrollo de la AP en México, tanto internos como externos, geográficos, climáticos, económicos y culturales; como primer punto está el alto rendimiento que se obtiene en los sistemas de AP; sin embargo, son varios los factores que se refieren a condiciones estratégicas para el desarrollo de la AP de México y que no tienen otras regiones del mundo, por citar algunas se encuentran: 1) el territorio nacional presenta condiciones climáticas apropiadas para obtener producción todo el año bajo condiciones protegidas, 2) vecindad con uno de los mercados más grandes y con mayor poder adquisitivo como son, Estados Unidos y Canadá, 3) los costos de producción son entre 20 % y 30 % más bajos que en dichos países (Moreno et al., 2011; Bastida, 2017).

4.1.2 Principales cultivos y distribución de la agricultura protegida en México

La AP se ha desarrollado en todo el territorio nacional, tanto en condiciones de clima templado como en zonas áridas y clima tropical, pero con mayor superficie instalada en el Noroeste, Occidente y Norte de México (Bastida, 2017). Actualmente, existen cerca de 59 mil hectáreas bajo AP en México: 34,000 de hortalizas, 22,000 de frutillas y 3,000 de ornamentales; de estas, 15,000 son de invernaderos con cubierta de plástico, 25,000 de mallas sombra, el sector de mayor crecimiento actualmente, y 19,000 de macrotúneles; el 70 % de la superficie de horticultura protegida está concentrada en los estados de Sinaloa (22 %), Jalisco (15 %), Baja California (12 %), Michoacán (12 %) y Guanajuato (9 %) (Horticultivos, 2021). Oficialmente, el SIAP/SADER (2021) reportó que los principales cultivos que se produjeron en el 2020 bajo AP fue tomate (50 %), chile verde (20.6 %), pepino (14.5 %) y fresa (10.16 %).

4.1.3 Caracterización de la tecnología en invernaderos de la agricultura protegida en México

La agricultura protegida en México generalmente divide a los invernaderos en tres categorías: baja tecnología, tecnología intermedia y alta tecnología (Pratt & Ortega, 2019). Se entiende por baja tecnología, a las estructuras que soportan una carga baja y que por lo tanto resultan económicas, la cubierta es esencialmente malla antiáfidos, capaz de impedir el paso de la mosquita blanca y paratrioza, insectos transmisores de virus y fitoplasmas; estas estructuras solo se usan durante los meses de baja o nula precipitación y de temperatura apropiada (Pratt & Ortega, 2019). Los invernaderos de tecnología intermedia disponen de un cierto tipo de automatización, apertura y cierre de cortinas, son semi climatizados, tienen control automático de los riegos y cuya producción puede ser en suelo o en sustrato (Pratt & Ortega, 2019) con este tipo de tecnología es posible modificar hasta cierto punto las condiciones medio ambientales, pero no de forma totalmente controlada.

Las instalaciones de alta tecnología consisten en invernaderos que originalmente eran de cristal; sin embargo, hoy en día la inmensa mayoría de la alta tecnología está conformada por cubierta de plástico con doble pared, de gran altura, que constan también de generadores de agua caliente y CO₂ y que se consideran de alto control climático, totalmente automatizados; en estos invernaderos el 100 % utiliza sustrato ya sea de lana de roca, turba o perlita y cuenta con un sistema perfectamente automatizado para controlar el riego bajo recirculación de la SN, se controla también la temperatura, la HR y en ocasiones hasta la radiación solar (Pratt & Ortega, 2019). Con relación al nivel de tecnificación de invernaderos en México, la mayoría de estos se considera de baja a mediana tecnología.

4.2 Producción hidropónica bajo invernadero

Actualmente la agricultura basada en el suelo enfrenta varios desafíos, como son la urbanización, los desastres naturales, el cambio climático, el uso indiscriminado de productos químicos y pesticidas que están agotando la fertilidad del suelo (Sharma et al., 2018). El suministro de alimentos tiene un impacto significativo en el medio

ambiente a través de las emisiones de gases de efecto invernadero, el agotamiento del fósforo, el uso ineficiente de la tierra y los recursos hídricos y la liberación de productos químicos al ambiente; además, debido a la creciente demanda de alimentos y la necesidad de ahorrar agua dulce, la agricultura se encuentra en la necesidad de aumentar la eficiencia en la producción de alimentos (Schmautz et al., 2016). Debido a lo mencionado anteriormente, muchos investigadores realizaron el esfuerzo de buscar alternativas para el desarrollo adecuado de las plantas, dando como resultado la hidroponía a nivel comercial, dichas técnicas hidropónicas han ganado popularidad debido al manejo eficiente de los recursos y la producción de alimentos de calidad (Lara, 1999; Sharma et al., 2018).

La hidroponía es una técnica de cultivo de plantas en SN (agua y nutrimentos), con o sin el uso de un medio inerte como grava, vermiculita, lana de roca, turba, aserrín, polvo de coco y fibra de coco entre otros materiales, que proporcionan soporte mecánico a la planta. Los sistemas hidropónicos han sido clasificados como abierto (una vez que la SN es aplicada a las raíces de las plantas, ésta no es reusada), o cerrado (la SN excedente es recuperada, regenerada y reciclada). La mayoría de los sistemas hidropónicos funcionan automáticamente para controlar la cantidad de agua y nutrimentos en función de los requerimientos de la especie, la variedad, la etapa fenológica y las condiciones ambientales; con esta técnica se pueden cultivar varios cultivos comerciales, incluidos vegetales de hoja, tomates, pepinos, pimientos, fresas y ornamentales, entre muchos otros (Lara, 1999; Sharma et al., 2018).

La mayoría de los sistemas hidropónicos se encuentran en invernadero, con el fin de controlar la temperatura, reducir la pérdida de agua por evaporación, controlar las infestaciones de plagas y enfermedades y proteger a los cultivos de factores del ambiente, como el viento y la lluvia, lo que permite cultivar durante todo el año y considerarse fuera de temporada; los sistemas hidropónicos comerciales se pueden operar automáticamente y se espera que reduzcan la mano de obra, la maleza es prácticamente inexistente y se pueden obtener mayores rendimientos ya que el

número de plantas por unidad es mayor en comparación con la agricultura convencional (Manzocco et al., 2011; Sharma et al., 2018).

El tomate es una de las especies hortícolas que más se produce en hidroponía, debido a su elevado potencial productivo (el cual no es explotado completamente en campo), a su demanda nacional y mundial, así como a su alto valor económico, principalmente cuando se produce en los periodos en que no se puede cultivar en campo; el aspecto más importante a considerar en la hidroponía es la SN, ya que de ella dependen la nutrición de las plantas y, por ende, la calidad y cantidad de la producción (Lara, 1999). Sin embargo, a diferencia del manejo de la SN que se puede modificar en gran medida en hidroponía, el control de las condiciones medio ambientales que se presentan dentro del invernadero es parcial, por lo que no es posible modificarlas a parámetros ideales en la mayoría de las estructuras establecidas en México, debido principalmente al nivel tecnológico con el que cuentan (Pratt & Ortega, 2019), por lo que este tipo de condiciones generan grandes variaciones en parámetros importantes en la producción, como lo son la temperatura, HR y radiación.

4.2.1 Solución nutritiva

La SN, consiste en agua con oxígeno y nutrimentos los cuales se deben de encontrar disueltos y en formas inorgánicas e iónicas; los 17 elementos esenciales para el crecimiento de las plantas se suministran mediante diferentes combinaciones de fertilizantes químicos (Sharma et al., 2018). En hidroponía, la cantidad de nutrimentos que requieren las plantas depende de la especie, la variedad, la etapa fenológica y las condiciones ambientales; cada especie vegetal requiere de una SN con características específicas (Lara, 1999). Las principales características que influyen en el desarrollo de los cultivos y sus productos de importancia económica son la concentración de nutrimentos (representada por la CE) y el pH de la SN, así como la relación mutua entre cationes y aniones, la relación $\text{NO}_3^- : \text{NH}_4^+$ y la temperatura de la SN (Steiner, 1984).

4.2.2 Conductividad eléctrica de la solución nutritiva

En cultivos hidropónicos es habitual evaluar el contenido de nutrimentos en la SN de forma indirecta, midiendo su CE, ya que la SN está compuesta en gran parte por elementos metálicos y el nivel estimado de concentración de estos nutrimentos se puede obtener midiendo la capacidad de la SN para conducir corriente eléctrica, es decir, cuanto mayor sea la concentración de nutrimentos, mayor será la capacidad de la SN para conducir corriente eléctrica (Helbel et al., 2008). La mejora de la calidad del fruto de tomate es un tema de gran importancia para los productores de invernadero que quieren satisfacer la demanda cada vez mayor de los consumidores en un mercado fresco altamente competitivo y el manejo de la CE constituye una herramienta estratégica importante, el ajuste de la CE generalmente permite a los productores de invernadero modificar la disponibilidad de agua para las plantas y mantener un equilibrio entre las partes vegetativa y reproductiva (Dorai et al., 2001).

El rango ideal de CE para hidroponía en la mayoría de los cultivos se encuentra entre 1.5 y 2.5 dS m⁻¹; el tomate es medianamente tolerante a la salinidad, diversos estudios y condiciones de crecimiento han obtenido los mejores resultados con CE en el rango de 2 a 4 dS m⁻¹; sin embargo, la CE adecuada para obtener el rendimiento y calidad óptima, a veces difieren y dependen de las interacciones entre genotipo, factores ambientales y prácticas culturales (Stanghellini et al., 1998; Dorai et al., 2001; Chinnusamy et al., 2005; Sharma et al., 2018).

Se acepta que una CE alta mejora la calidad organoléptica y dietética de la fruta (Dorai et al., 2001); se observó que el incremento de la CE en la SN (de 2.2 a 4.5 dS m⁻¹), aumentó significativamente la acidez titulable, los sólidos solubles totales (SST), el licopeno, ácido ascórbico, fenoles y la actividad antioxidante, pero redujo el tamaño y rendimiento total y comercial (Moya et al., 2017). Una CE más alta evitará la absorción de agua y nutrimentos debido a la presión osmótica; un nivel más bajo de lo ideal afectará severamente la salud y el rendimiento de la planta debido a las deficiencias nutrimentales que se pueden ocasionar, por lo tanto, el manejo adecuado de la CE en hidroponía puede brindar una herramienta efectiva

para mejorar el rendimiento y la calidad de los vegetales (Gruda, 2009). Como ejemplo, el rendimiento del tomate bajo un sistema hidropónico incrementó a medida que la CE de la SN aumentó de 0 a 3 dS m⁻¹ y disminuyó a medida que la CE aumentó de 3 a 5 dS m⁻¹ debido al aumento del estrés hídrico (Zhang et al., 2016).

La pérdida en el rendimiento se puede atribuir a las respuestas pasivas y activas de la planta (Krauss et al., 2006), las plantas en condiciones de alta salinidad (CE alta) tienen una menor absorción de agua, por lo que acumulan menos agua en órganos como los frutos (Li et al., 2001), para mantener la absorción de agua, se lleva a cabo un ajuste osmótico para hacer frente al estrés hídrico o salino (Maggio et al., 2004). Sin embargo, la reducción de la absorción de agua como mecanismo pasivo, no puede servir como única explicación de la reducción en el rendimiento de la fruta, ya que la planta también reacciona activamente con cambios a nivel hormonal, ya que hay un incremento en la síntesis de ABA en condiciones de alta salinidad (Krauss et al., 2006). El ABA inducido por el estrés es un importante factor de señalización en la comunicación raíz – brote que provoca reacciones en la parte vegetativa y generativa de la planta; el cierre de estomas y la reducción del crecimiento de las hojas son respuestas activas a las altas concentraciones de sal en la zona de la raíz (Munns, 2002).

4.2.3 pH de la solución nutritiva

El pH de la SN es una propiedad inherente de la composición mineral que mide la acidez o alcalinidad de una solución, este valor indica la relación entre la concentración de iones libres H⁺ y OH⁻ presentes en una solución y oscila entre 0 y 14; el rango óptimo para el desarrollo de las plantas en cultivo sin suelo es de 5.5 – 6.0, de esta manera se logra regular el contenido de HCO₃⁻, solubilizar al H₂PO₄⁻ y evitar la precipitación de Fe⁺² y Mn⁺²; el cambio en el pH puede causar un desequilibrio de nutrimentos y la planta mostrará algunos síntomas de deficiencia o toxicidad, por lo tanto, se requiere especial cuidado para mantener un nivel óptimo de pH, CE y nutrimentos en la SN (De Reijck & Schrevens, 1998; Sharma et al., 2018).

4.3 Déficit de presión de vapor (DPV)

A nivel global, la temperatura se ha incrementado actualmente y se proyectan incrementos para el futuro (Edenhofer & Seyboth, 2013), lo cual inducirá grandes variaciones en el DPV inclusive si la HR permaneciera más o menos constante (Tack et al., 2015), como se ha observado en las últimas décadas en grandes escalas espaciales (Willett et al., 2007) y se prevé que cambie mínimamente en el futuro (Lobell & Gourdji, 2012).

Muchos productores cultivan hortalizas en un entorno controlado con más de 400,000 ha de invernadero dedicadas a la producción hortícola en todo el mundo (Baudoin et al., 2013). Sin embargo, las áreas áridas y semiáridas enfrentan el problema de un alto DPV en los invernaderos de cultivos durante la temporada de crecimiento de primavera-verano, lo que tiene un gran impacto en la producción de alta calidad y el uso adecuado de los recursos agrícolas (Song et al, 2021).

El DPV es un dato concreto que considera tanto la temperatura del aire como la HR, comúnmente se mide en unidades de presión (kPa) (Zhang et al., 2015) y representa la cantidad de agua en forma de vapor que se requiere en un momento dado, para saturar la atmósfera de agua a una temperatura y presión dadas; esto nos indica la diferencia entre el agua que tiene el aire (humedad) y la que se le puede suministrar (diferencial). El DPV es una forma valiosa de medir las condiciones climáticas del invernadero (Prenger y Ling, 2001; Sinclair et al., 2017), ya que es importante en los procesos involucrados en el metabolismo fisiológico de las plantas, debido a que es la fuerza impulsora de la transpiración, ya que afecta la diferencia de presión de vapor entre el interior de la hoja y el aire exterior, por lo que su impacto se puede reflejar en el estado de crecimiento de las plantas (Song et al., 2021). Se ha sugerido que el efecto de la humedad se expresa mejor en términos de DPV entre la hoja y el aire atmosférico, siendo una variable más apropiada para describir las respuestas fisiológicas de las plantas a la humedad (Aphalo & Jarvis, 1991; Bunce, 1997).

Un aumento en el DPV que resulte en un aumento de la transpiración debe ir acompañado del transporte de agua a las hojas, o las hojas se deshidratarán y envejecerán rápidamente, ya que las hojas de los cultivos tienen una capacidad de almacenamiento de agua muy pequeña (Sinclair et al., 2017). Una opción crítica que las plantas utilizan para mantener las hojas hidratadas, es restringir la transpiración cuando el DPV es alto mediante el cierre parcial de los estomas, de modo que la transpiración se reduzca para igualar el flujo de agua en la hoja, en aquellos casos en los que existe tal regulación, se puede identificar un umbral de DPV en el que aumentos adicionales de DPV dan como resultado un aumento mínimo o nulo de transpiración, que generalmente refleja la capacidad de transporte de agua en el sistema suelo-planta (Bunce, 1981; Turner et al., 1984).

Al regular la apertura de los estomas y, por lo tanto, la pérdida de agua por transpiración, la planta puede intentar minimizar el déficit de agua; esta regulación tiene un significado adaptativo para proteger el sistema vascular de las plantas de la disfunción, pero la reducción en la apertura estomática también se acompaña de una disminución de la conductancia estomática para la difusión de CO₂, lo que lleva a una fuerte disminución de la tasa fotosintética (Koch et al., 1994; Katsoulas et al., 2001; Tucci et al., 2010). La inhibición de la fotosíntesis causada por la alta temperatura y la baja HR (alto DPV) puede limitar el crecimiento de las plantas y la acumulación de materia seca y, por lo tanto, reducir el rendimiento, el cual ya se ha convertido en una limitación importante para la producción sostenible de hortalizas en invernaderos (Jie et al., 2008).

Se ha demostrado que manejar entornos con DPV menores a 1.5 kPa en invernadero, mejoró la capacidad de transporte de agua a las hojas y al mismo tiempo se evitó el cierre de estomas y mantuvo una alta tasa fotosintética, por lo que se incrementó el rendimiento de melón y pepino en un 21.57 % y 18.05 %, respectivamente, en comparación con el tratamiento manejado con DPV altos (>1.5 kPa) (Song et al., 2021). En tomate se reportó que mantener un DPV menor a 0.5 kPa en el verano utilizando micronebulización, logró disminuir eficazmente el estrés ocasionado por altas temperaturas consiguiendo mantener un ambiente

fisiológicamente adecuado para el cultivo, ya que se incrementó el rendimiento en 12.3 % en comparación con el testigo sin control ambiental (Zhang et al., 2015).

De particular interés es la exposición de plantas a un DPV alto ya que, hasta cierto límite, aumenta la necesidad de las plantas de extraer más agua a través de sus raíces lo que induce una mayor absorción de nutrimentos y el daño subsiguiente que puede suceder en condiciones de elevada salinidad, produciendo una acumulación excesiva de sales en el tejido de la planta y un crecimiento y desarrollo anormal (Jagadish et al., 2012). Si los niveles más altos de DPV impulsados por el calentamiento global se materializan, junto con el aumento del nivel del mar y la caída a los niveles freáticos que conducen al incremento de la salinidad del agua, esta interacción se convierte en un predictor importante y necesario de las pérdidas de rendimiento esperadas (Tack et al., 2015).

4.3.1 Cálculo del déficit de presión de vapor

El cálculo del DPV se puede realizar mediante dos procedimientos: utilizando un cuadro psicrométrico que relaciona la temperatura del aire y HR o utilizando distintas ecuaciones (Prenger y Ling, 2001). Algunas de las ecuaciones que se pueden utilizar para realizar este cálculo son descritas por Campbell y Norman (2000), quienes mencionaron que primero se debe de calcular la presión de vapor de saturación (pvsat) en función de la temperatura mediante la ecuación de Tetens la cual describe el valor de la presión de vapor máxima:

$$pvsat \text{ (kPa)} = a \times \exp \left(\frac{bxT}{T+c} \right)$$

donde:

T: Temperatura (°C)

a = 0.611

b = 17.502

c = 240.97

Posteriormente se calcula la presión de vapor actual del aire (pvaire) a través de la siguiente ecuación:

$$P_{vaire} \text{ (kPa)} = p_{vsat} \times \frac{H.R.}{100}$$

Finalmente, se calcula el DPV en kPa mediante la diferencia de la presión de vapor de saturación (pvsat) menos la presión de vapor actual del aire (pvaire): $DPV = p_{vsat} - p_{vaire}$

4.3.2 Déficit de presión de vapor óptimo

Se considera un DPV óptimo en un valor comprendido entre 0.7 y 2.5 kPa en la mayoría de cultivos (Song et al., 2021). En tomate un bajo DPV (<0.5 kPa) se traduce en niveles de baja transpiración, un alto DPV (>1.2 kPa) se traduce en una muy alta transpiración, aunque hay que tener en cuenta que las plantas no son capaces de reemplazar el agua rápidamente por lo que unos parámetros de DPV muy altos durante largos periodos de tiempo pueden ocasionar problemas en las plantas y ocasionar el cierre parcial o total de los estomas (Zhang et al, 2015); en general el DPV aumenta con la temperatura y disminuye con el aumento de la H.R. sin embargo; en el cultivo de tomate, diversos estudios han encontrado valores óptimos del DPV en rangos que van de 0.5 a 1.2 kPa con efectos positivos en la productividad, conforme se elevan los valores del DPV, el aire tendrá un mayor poder evaporante, lo que afecta la apertura estomática de las hojas. (Guichard et al., 2005; Lu et al., 2015; Zhang et al, 2015)

V MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Ubicación del experimento y condiciones culturales

El experimento se realizó en un invernadero ubicado en el Departamento de Horticultura de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en Saltillo, Coahuila, México (25° 21' 24.37" N, 101° 02' 05.45" O, 1762 m de altitud). El invernadero es considerado de tecnología media, cuenta con cubierta de polietileno blanco translucido de baja densidad, sistema de enfriamiento por muro húmedo y extractor, calefacción y malla anti-áfidos.

5.2 Material biológico, sistema de producción, trasplante y densidad de plantación

Se utilizaron plántulas de tomate de crecimiento indeterminado cv. Merlice, procedentes del estado de Guanajuato. El trasplante se efectuó el 26 de marzo de 2021 en bolsas de polietileno negro de 10 L. El cultivo se estableció en un sistema hidropónico abierto donde se usó una mezcla de turba ácida (*Sphagnum moss*, PREMIERE, Canadá) y fibra de coco en proporción 50:50 (v/v). El pH y CE inicial del sustrato fue de 6.1 y 0.134 dS m⁻¹, respectivamente, el cual fue medido con un medidor de bolsillo genérico de pH y CE previamente calibrado, utilizando una proporción 2:1 v/v de agua destilada y sustrato respectivamente. Las plantas se establecieron en hileras sencillas con una distancia de 1 m entre hilera y 0.40 m entre planta y planta.

5.3 Manejo de las plantas

Se realizó poda de formación a un solo tallo 15 días después del trasplante (ddt) y la plantación se condujo de esta manera durante todo el ciclo. Se realizó poda de hojas, siendo eliminadas aquellas que estaban por debajo del racimo próximo a cosechar. La maduración de los frutos en el racimo para decidir el momento de la poda de hojas se determinó tomando como referencia el cambio de coloración de manera visual en un 80 %, aproximadamente, en la superficie del fruto hacia tonalidades rojo claro. En todas las plantas se realizó un aclareo dejando cinco

frutos por racimo, posterior al cuaje de los mismos. La cosecha de frutos se realizó del 9 de junio al 21 de agosto (75 ddt a 148 ddt).

5.4 Cámaras de cultivo y control de la HR

Se construyeron tres cámaras de cultivo con plástico transparente y medidas de 2 m de ancho, 4 m de largo y 4 m de altura y un volumen aproximado de 32 m³ cada una, para conservar distintos niveles de HR. Cada cámara representó un nivel de HR distinto, 70 %, 50 % y testigo.

Para mantener la HR en las cámaras de 70 % y 50 %, se utilizaron humidificadores ultrasónicos genéricos de 10 cabezas con capacidad de 4.5 kg de agua hora⁻¹, los cuales fueron programados mediante un higrostató Inkbird Tech modelo IHC-200, por lo que estos se encendían y apagaban cuando la humedad era de ± 5 % a la programada; dentro de cada una de las cámaras, se colocaron cuatro ventiladores de 6" Macillux que encendían y apagaban a la par de los humidificadores para homogeneizar la humedad generada en toda la cámara; en la cámara testigo, la HR se generó a partir de la evapotranspiración del cultivo y de la HR ocasionada por el muro húmedo del invernadero, ya que dicha cámara contaba con ventanas de circulación del aire.

5.5 Temperatura, humedad relativa y radiación fotosintéticamente activa

En cada cámara de cultivo se registró la temperatura (°C), HR (%) y PAR ($\mu\text{M m}^{-2} \text{s}^{-1}$), cada 15 min, de mayo a agosto de 2021 (35 a 152 ddt), con un datalogger Watch Dog series modelo 1650 con sensor interno de temperatura y HR, además a cada datalogger, se adicionó un micro sensor de temperatura externo y un sensor de luz quantum. De los datos obtenidos se calculó el valor promedio, máximo y mínimo de la temperatura y HR y valor promedio de la PAR de cada una de las cámaras (Cuadro 1).

Cuadro 1. Temperatura, humedad relativa (HR) y radiación fotosintéticamente activa (PAR) promedio, máxima y mínima registrada mensualmente en cada cámara de cultivo de tomate en hidroponía.

Cámara	Mes	Temp. (°C)			HR (%)			PAR ($\mu\text{M m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	
		Promedio	Max	Min	Promedio	Max	Min	Promedio	
Testigo	Mayo	22.4 ± 0.2^z	34.1 ± 0.6^z	15.6 ± 0.3^z	47.2 ± 0.4^z	65.0 ± 3.7^z	29.7 ± 2.1^z	329 ± 16^z	
	Junio	21.5 ± 0.1	31.4 ± 0.4	14.5 ± 0.3	43.3 ± 0.1	52.0 ± 1.1	34.0 ± 0.9	325 ± 17	
	Julio	22.1 ± 0.1	32.8 ± 0.4	15.6 ± 0.2	47.6 ± 0.1	54.9 ± 1.1	25.6 ± 1.0	289 ± 18	
	Agosto	22.3 ± 0.1	34.5 ± 0.4	15.6 ± 0.2	35.8 ± 0.3	43.4 ± 3.0	28.5 ± 2.7	313 ± 18	
50 %	Mayo	22.3 ± 0.1	35.3 ± 0.4	14.5 ± 0.3	57.1 ± 1.7	74.1 ± 1.7	39.3 ± 1.7	357 ± 15	
	Junio	22.1 ± 0.1	33.4 ± 0.4	14.5 ± 0.3	57.9 ± 0.3	75.8 ± 1.6	38.8 ± 1.5	338 ± 18	
	Julio	22.9 ± 0.1	35.5 ± 0.5	15.8 ± 0.2	62.1 ± 0.3	79.8 ± 1.0	38.7 ± 1.2	300 ± 18	
	Agosto	23.2 ± 0.1	36.6 ± 0.3	15.9 ± 0.2	62.5 ± 0.3	78.8 ± 1.0	38.8 ± 1.0	323 ± 19	
70 %	Mayo	22.3 ± 0.1	34.8 ± 0.3	14.5 ± 0.3	76.0 ± 0.3	92.4 ± 2.1	56.8 ± 2.7	333 ± 14	
	Junio	21.6 ± 0.1	31.3 ± 0.4	14.7 ± 0.3	85.1 ± 0.2	96.8 ± 0.8	69.1 ± 1.7	311 ± 17	
	Julio	21.9 ± 0.1	32.1 ± 0.3	15.7 ± 0.2	87.4 ± 0.2	98.5 ± 0.5	69.1 ± 1.3	251 ± 16	
	Agosto	22.0 ± 0.1	33.2 ± 0.2	12.9 ± 0.2	87.5 ± 0.2	99.3 ± 0.2	67.1 ± 1.1	296 ± 15	

^z Los datos son el promedio del total de lecturas diarias mensuales $\pm$ error estándar.

5.6 Déficit de presión de vapor

A partir de los datos de temperatura y HR diarios, se calculó el DPV promedio mensual en cada una de las cámaras y se determinó el DPV promedio del total de los meses de mayo a agosto (35 a 117 ddt) (Cuadro 2), utilizando las fórmulas descritas en el apartado “Cálculo del déficit de presión de vapor” de la literatura citada.

Cuadro 2. Déficit de presión de vapor promedio mensual y total de cada cámara de cultivo de tomate en hidroponía.

Cámara	DPV (kPa)				Promedio total DPV (kPa)
	Mayo	Junio	Julio	Agosto	
Testigo	1.69 ± 0.1 ^z	1.57 ± 0.1 ^z	1.48 ± 0.1 ^z	1.85 ± 0.1 ^z	1.6 ± 0.1 ^z
H.R. 50 %	1.37 ± 0.1	1.33 ± 0.1	1.3 ± 0.1	1.33 ± 0.1	1.3 ± 0.01
H.R. 70 %	0.82 ± 0.1	0.46 ± 0.1	0.41 ± 0.1	0.46 ± 0.1	0.5 ± 0.1

^z Los datos son el promedio del total de lecturas diarias mensuales ± error estándar.

5.7 Conductividad eléctrica de la solución nutritiva

Para elaborar las soluciones nutritivas, se tomó en cuenta el análisis químico del agua de riego a utilizar (Cuadro 3), así como el balance de aniones y cationes considerados en las relaciones iónicas de Hernández- Pérez et al. (2020). El pH del agua se ajustó en un rango de 5.5 a 6.0. De acuerdo con el tratamiento, se emplearon tres distintas soluciones nutritivas con diferente concentración mineral y CE (Cuadro 4), los micronutrientes se agregaron a las distintas soluciones nutritivas, a través de un complejo de micronutrientes quelatados Ultrasol micro® (Fe 6 %, Zn 1.3 %, Mn 2.4 %, B 0.85 %, Cu 0.25 %, Mo 0.25 %) en una concentración de 70 mg L⁻¹. La SN se aplicó de manera manual y se llevó a cabo cuando el sustrato registró a través de un tensiómetro Irrometer modelo SR con punta de cerámica azul, una tensión de 8 a 10 kPa, a una profundidad de 15 cm; el volumen de SN aplicado fue el suficiente para mantener una fracción de lixiviación del 25 % al 30 %. Los primeros 15 ddt se irrigaron todas las plantas de todos los tratamientos con la SN 2, diluida al 50 %, a partir de los 16 ddt se aplicó la SN correspondiente a cada tratamiento.

Cuadro 3. Análisis químico del agua utilizada para el riego del cultivo de tomate.

pH	CE (dS m ⁻¹)	meq L ⁻¹							
		Ca ⁺⁺	Mg ⁺	Na ⁺	K ⁺	CO ₃ ⁼	HCO ₃ ⁼	SO ₄ ⁼	Cl ⁻
8.01	0.93	3.88	1.95	3.71	0.15	^z ND	6.05	1.67	1.22

^zND = No detectado por el método empleado

Cuadro 4. Concentración mineral de macronutrientes y conductividad eléctrica de las diferentes soluciones nutritivas utilizadas en el cultivo de tomate.

Solución nutritiva	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ⁼	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	^z CE
		-----	meq L ⁻¹	-----			dS m ⁻¹
1	8.8	1.6	7.2	7.2	8.8	2.4	2.2
2	11	2	9	9	11	3	2.8
3	13.2	2.4	10.8	10.8	13.2	3.6	3.4

^zCE: Conductividad eléctrica

5.8 Tratamientos, diseño y unidad experimental

Se utilizó un diseño bifactorial (factores DPV y CE) en bloques completos al azar con nueve tratamientos (Cuadro 5) y cinco repeticiones. Como unidad experimental se consideraron dos plantas por cada repetición, de cada tratamiento. Los datos se analizaron mediante análisis de varianza empleando el paquete estadístico SAS y en caso de significancia se aplicó la prueba de comparación de medias de Tukey con $p < 0.05$.

Cuadro 5. Tratamientos aplicados en el cultivo de tomate en hidroponía.

Tratamiento	^z DPV (kPa)	^z CE (dS m ⁻¹)
1	0.5	2.2
2	0.5	2.8
3	0.5	3.4
4	1.3	2.2
5	1.3	2.8
6	1.3	3.4
7	1.6	2.2
8	1.6	2.8
9	1.6	3.4

^zDPV: Déficit de Presión de Vapor, CE: Conductividad Eléctrica.

5.9 Variables evaluadas

5.9.1 Planta

5.9.1.1 Altura y diámetro de tallo

Al término del experimento se midió en cada unidad experimental, la altura de las plantas desde la base del tallo hasta la parte apical con un flexómetro, el diámetro se midió con un vernier digital GENERAL® No. 143 en la base del cuello del tallo.

5.9.1.2 Peso fresco de hojas y tallos

Se separaron las hojas y tallo de la planta de tomate y se determinó el peso fresco de cada unidad experimental con una balanza digital SARO STORE modelo I-2000.

5.9.1.3 Peso seco de hojas y tallos

Para determinar el peso seco, se colocaron en una bolsa de papel de manera individual las hojas y tallos de cada planta de cada unidad experimental, y se pusieron a secar dentro del invernadero a temperatura del mismo, hasta peso constante de las bolsas. Una vez alcanzado el peso constante en cada muestra, se procedió a pesar con una balanza digital SARO STORE modelo I-2000.

5.9.1.4 Potencial hídrico de la hoja

Se realizó la medición del potencial hídrico del xilema de las hojas con ayuda de una bomba manual de Scholander PMS Instrument Company, modelo Pump-Up Chamber, en tres bloques de fechas distintas: 61-63, 101-103 y 137-139 ddt. En cada bloque de fechas se realizó la medición del potencial hídrico en una cámara diferente por día, en dos horarios distintos, 8:00 a 10:00 am y de 2:00 a 4:00 pm. Se seleccionó aleatoriamente el foliolo apical de una hoja de reciente maduración, de cada unidad experimental, el cual fue envuelto en una bolsa de polietileno aluminizada durante 15 min, para mantenerla en oscurecimiento antes de ser cortada, posteriormente para su análisis, se bombeo aire para subir la presión

dentro de la cámara, y se detuvo el bombeo de aire hasta que la base del peciolo mostro expulsión de savia. Para el análisis estadístico se promediaron los valores obtenidos en todas las mediciones de cada bloque de fechas por cámara de tratamiento para ambos horarios.

5.9.1.5 Intercambio gaseoso

Se evaluó el intercambio gaseoso (tasa de asimilación neta, conductancia estomática, transpiración y concentración intercelular de CO₂) de un foliolo lateral seleccionado aleatoriamente de hojas de reciente maduración en cada unidad experimental; para esto se utilizó el IRGA portátil LI COR modelo LI-6400XT. La radiación que se utilizó durante la medición fue de 1200 μ M, la [CO₂] se fijó en 400 $\pm$ 10 μ mol mol⁻¹ y se realizó una medición (115 ddt), la cual fue tomada en horario de 1:00 a 3:00 pm.

5.9.1.6 Concentración nutrimental de hojas

Se formó una muestra compuesta de hojas de reciente maduración al término del experimento de cada unidad experimental, las hojas fueron lavadas dos veces con agua destilada, secadas y molidas. Posteriormente se hizo la determinación nutrimental en cada unidad experimental. Se determinó la concentración de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y boro (B). Para ello se usaron 0.25 g de materia seca, que se sometieron a una digestión húmeda con una mezcla de solución diácida: ácido sulfúrico (H₂SO₄) y ácido perclórico (HClO₄) en relación 2:1 y peróxido de hidrógeno (H₂O₂) al 30 %. La determinación de N se realizó por el método de microkjeldahl y el resto de elementos por espectrometría de emisión atómica de inducción con plasma acoplado ICP modelo 725-ES de Agilent®, siguiendo la metodología descrita por Alcántar y Sandoval (1999).

5.9.1.7 Rendimiento promedio por planta

El momento de cosecha de los frutos fue cuando estos se encontraban en madurez comercial (color rojo brillante) y se pesaron los frutos de cada racimo y planta, en

cada unidad experimental con una balanza digital SARO STORE modelo I-2000. Se registró el rendimiento por racimo y el rendimiento total acumulado por planta, considerando la suma de la cosecha de ocho racimos.

5.9.2 Fruto

5.9.2.1 Fenoles

La concentración de fenoles totales se realizó conforme el método de Folin-Ciocalteu (Margraf et al., 2015), se homogenizaron 1 g de tejido vegetal de la pulpa (mesocarpio) con semilla del tomate y se agregaron 12 mL de agua desionizada, se homogenizó con un Ultra Turrax (IKA®, USA) durante 20 segundos, se pasó a través de un papel filtro, se recuperó la solución y posteriormente se centrifugó a 4,000 rpm. Del extracto anterior, se tomó 1 mL, se agregaron 2.5 mL del reactivo Folin Ciocalteu (1:10) y después de 5 min y antes de 8 min, se adicionaron 2 mL de carbonato de sodio (7.5 % p/v), se dejaron incubar en luz difusa por 2 horas. Una vez transcurrido el tiempo se realizaron lecturas en un espectrofotómetro de luz visible (HACH DR 5000; USA) a una longitud de onda de 760 nm. Los resultados se expresaron como mg equivalentes de ácido gálico (EAG) 100 g⁻¹ peso fresco.

5.9.2.2 Flavonoides

Los flavonoides se determinaron de acuerdo con el método descrito por Woisky y Salatino (1998), pesando 1 g de tejido del fruto y con 10 mL de metanol absoluto, se homogenizó con un Ultra Turrax (IKA®, USA) durante 20 segundos y posteriormente se filtró. De la solución filtrada se tomaron 2 mL de muestra y se mezclaron con 2 mL de tricloruro de aluminio al 2 % p/v, se dejó reposar durante 15 min en la oscuridad. Se realizaron las lecturas de absorbancia a 415 nm en un espectrofotómetro de luz visible (HACH DR 5000®, USA). Los resultados se expresaron como mg equivalentes de Quercetina (EQ) g⁻¹ de peso fresco.

5.9.2.3 Capacidad antioxidante

La capacidad antioxidante total en el fruto se midió mediante la prueba DPPH con el método descrito por Brand-Williams (1995) y la prueba FRAP con el método descrito por Benzie y Strain (1996). En el caso de la prueba DPPH, se realizó un extracto tomando 1 g de tejido vegetal del tomate y se agregaron 10 mL de agua desionizada, se homogenizó con un Ultra Turrax (IKA®, USA) durante 20 s, se filtró, se recuperó la solución y posteriormente se centrifugó a 4,000 rpm. Posteriormente se colocaron en una celda de cuarzo, 100 µL del extracto anterior y se agregaron 3 mL de la solución de DPPH metanólica 6.1×10^{-5} M (Sigma Aldrich, USA), la mezcla se dejó reposar en la oscuridad durante 30 minutos y se leyó a 517 nm el cambio de absorbancia. Los resultados se expresaron en mg equivalentes de ácido ascórbico (EAA) en 100 de peso fresco.

En cuanto a la prueba FRAP, se realizó un extracto con 1 g del tomate y se agregaron 10 mL de agua desionizada, se homogenizó con un Ultra Turrax por 20 segundos, se pasó a través de un papel filtro, se recuperó la solución y posteriormente, se centrifugó a 4,000 rpm por 15 min. Se preparó el reactivo de FRAP (TPTZ, FeCl_3 y amortiguador de acetato), se mezcló 1.9 de FRAP con 100 µL del extracto, se dejaron reaccionar por 10 min a 37 °C, se leyó a una absorbancia de 593 nm. Los resultados se expresaron en mg equivalentes de ácido ascórbico (EAA) en 100 g de peso fresco.

5.9.2.4 Firmeza

Para determinar la fuerza requerida para penetrar el mesocarpio del fruto, se empleó un penetrómetro Qa SUPPLIES® modelo FT O2 equipado con una punta cónica de 8 mm de grosor. La determinación se realizó en el diámetro ecuatorial de 2 frutos por racimo de cada planta de cada unidad experimental de los racimos 4 al 8. Los resultados fueron expresados en kg cm^{-2}

5.9.2.5 Solidos solubles totales

La concentración de solidos solubles totales (SST) expresada en °Brix, se registró en 2 frutos por racimo de cada planta de cada unidad experimental, de los racimos 4 al 8 en el mismo estado de maduración (rojo brillante), se empleó un refractómetro óptico de mano Euromex modelo RF.5190. Para esta determinación el refractómetro se calibró a 20°C con agua destilada y posteriormente se procedió a realizar las lecturas con una gota del jugo de los frutos.

5.9.2.6 Acidez titulable

La acidez titulable (AT) se determinó según la metodología descrita por AOAC (1990) pesando 1 g de tejido del fruto y se le agregaron 10 mL de agua desionizada, se homogenizó con un Ultra Turrax (IKA®, USA) durante 20 segundos y se filtró, de esta solución se tomó una alícuota de 5 mL, se le agregaron tres gotas de fenolftaleína (1 %) y posteriormente se tituló con NaOH al 0.1 N. Los resultados se reportaron en porcentaje de acidez titulable expresada en términos de ácido cítrico.

5.9.2.7 Licopeno

La concentración de licopeno en fruto se determinó de acuerdo con el procedimiento descrito por Fish et al. (2002). Se realizó un extracto, con 3 g de tejido de fruto de tomate y se agregaron 5 mL de buffer fosfato, se homogenizó con un Ultra turrax por 20 segundos, se filtró y se centrifugó durante 30 min a 4500 rpm. Del extracto se tomaron 2 mL y se le agregaron 4 mL de la mezcla de hexanos - acetona, se volvió a centrifugar a 4500 rpm por 10 minutos; se leyó a una absorbancia de 502 nm.

5.9.2.8 Azúcares totales

Para la determinación de azúcares totales, se utilizó la metodología descrita por Witham et al. (1971) se tomó 1 g del fruto de tomate y se le agregaron 40 mL de alcohol etílico al 80 %, se dejó incubar por 15 días, una vez transcurrido el tiempo requerido se tomó 1 mL de la solución alcohólica, se llevó a evaporación y se

recuperó con 25 mL de agua destilada, posteriormente, para la reacción se tomó 1.5 mL, se adicionaron 3 ml de ácido sulfúrico con antrona, se colocaron en baño maría por 5 minutos y posteriormente se leyeron a una absorbancia de 600 nm.

5.9.2.9 Azúcares reductores

Para la determinación de azúcares reductores se siguió la metodología descrita por Somogyi (1952), se tomó 1 g del fruto de tomate y se le agregaron 40 mL de alcohol etílico al 80 %, se dejó incubar por 15 días; una vez transcurrido el tiempo requerido, para la reacción se tomó 1 mL, se adicionaron 1 mL del reactivo de Nelson, se colocaron en baño maría por 20 min a 60 °C, se dejaron enfriar a temperatura ambiente, y se les adiciono 1 mL del reactivo de arsenomolibdato más 7 mL de agua destilada, y posteriormente se leyó a una absorbancia de 540 nm.

5.9.2.10 Concentración nutrimental en frutos

Se seleccionaron dos frutos de cada unidad experimental, del octavo racimo, los cuales fueron cortados, secados y molidos, posteriormente se realizó la misma metodología descrita en la determinación nutrimental de hojas.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Planta

6.1.1 Altura y diámetro del tallo

La altura final de la planta, fue significativamente mayor ($p < 0.001$) en los tratamientos donde las plantas se encontraron bajo condiciones de DPV controlado (0.5 kPa y 1.3 kPa), sin tener efecto la CE ni la interacción de ambos factores (Cuadro 6). Al disminuir el DPV de 1.6 kPa a 1.3 y 0.5 kPa, se incrementó la altura en un 6 % y 5 %, respectivamente, mientras que, en el diámetro final del tallo, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos (Cuadro 6).

Cuadro 6. Altura de planta y diámetro final del tallo en tomate bajo la interacción de distintas condiciones de déficit de presión de vapor (DPV) y diferentes niveles de conductividad eléctrica (CE) en la solución nutritiva.

DPV (kPa)	Altura planta (cm)	Diámetro tallo (mm)
0.5	332.9 ^{az} ± 2.3	18.2 ± 0.5
1.3	336.9 ^a ± 2.5	18.8 ± 0.4
1.6	317.2 ^b ± 2.1	19.1 ± 0.3
CE (dS m ⁻¹)		
2.2	329.3 ± 2.8	19.0 ± 0.4
2.8	329.2 ± 3.5	19.2 ± 0.3
3.4	328.4 ± 3.4	18.0 ± 0.5
DPV (kPa)	***	NS
CE (dS m ⁻¹)	NS	NS
DPV x CE	NS	NS

^zLetras distintas en la misma columna son estadísticamente diferentes (Tukey $p < 0.05$), ± error estándar. * significativo a $p < 0.05$, ** significativo a $p < 0.01$, *** significativo a $p < 0.001$. NS: no significativo.

Los resultados observados son similares a los reportados en otras investigaciones por Zhang et al. (2015) y Xiao-Cong et al. (2019), quienes encontraron un aumento significativo en la altura final de la planta y un resultado no significativo en el diámetro final del tallo, al cultivar tomate en invernadero bajo niveles de DPV bajo y alto. Los cambios morfológicos en las plantas, reflejan directamente la adaptabilidad al entorno del cultivo (Schlichting, 1986), por lo que el DPV puede desempeñar un

papel eficaz en el aumento de la altura de diferentes especies de plantas, incluido el tomate (Song et al., 2022).

6.1.2 Peso fresco de hojas y tallos

El peso fresco acumulado de tallo y hoja, mostró diferencia significativa ($p < 0.001$) solo por efecto del DPV (Figura 1), mientras que no hubo efecto significativo en la CE ni en la interacción de ambos factores.

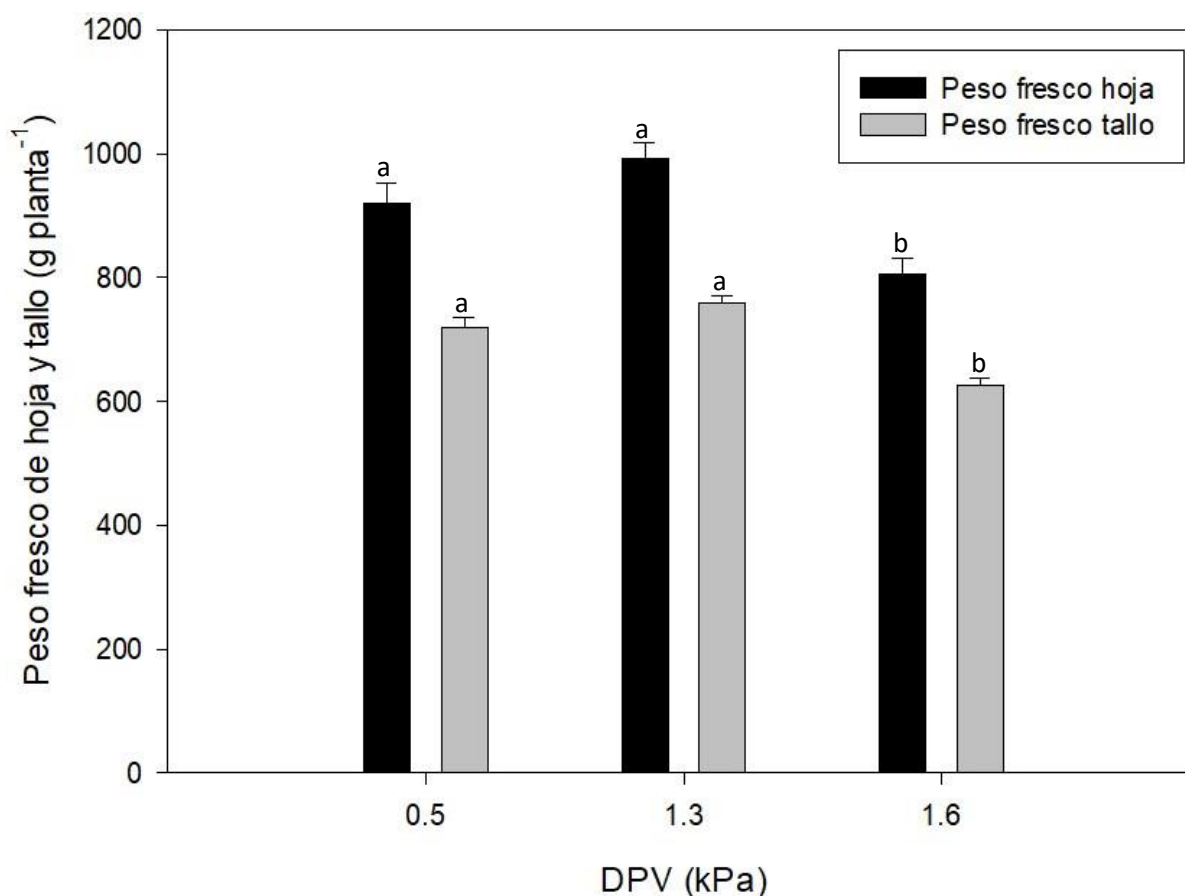


Figura 1. Peso fresco de hoja y tallo de la planta de tomate bajo distintos niveles de déficit de presión de vapor (DPV). Columnas con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey, $p < 0.05$). Las columnas incluyen el error estándar.

En este caso se observó, que los tratamientos bajo niveles de DPV de 0.5 y 1.3 kPa, tuvieron un incremento en peso acumulado (hoja + tallo) de un 14 % y 22 %, respectivamente, en comparación con los tratamientos con DPV de 1.6 kPa (Figura 1). La disminución en peso fresco de las hojas y tallos al encontrarse a un nivel de

DPV de 1.6 kPa, puede explicarse debido a la disminución en el contenido relativo de agua (CRA), ya que se ha observado, que las plantas de tomate cultivadas en invernadero en condiciones de alta humedad ambiental (bajo DPV), aumentó significativamente el CRA en hojas, ocasionado en parte, por la reducción de la transpiración excesiva que llega a ocurrir bajo condiciones de DPV elevados (Xiao-Cong et al., 2019; Song et al., 2022).

6.1.3 Peso seco de hojas y tallos

El peso seco de hojas y tallos al final del experimento fue significativamente mayor ($p < 0.001$) en condiciones con DPV a niveles de 0.5 y 1.3 kPa (Figura 2), no se observó efecto significativo por parte de la CE, ni hubo interacción de ambos factores.

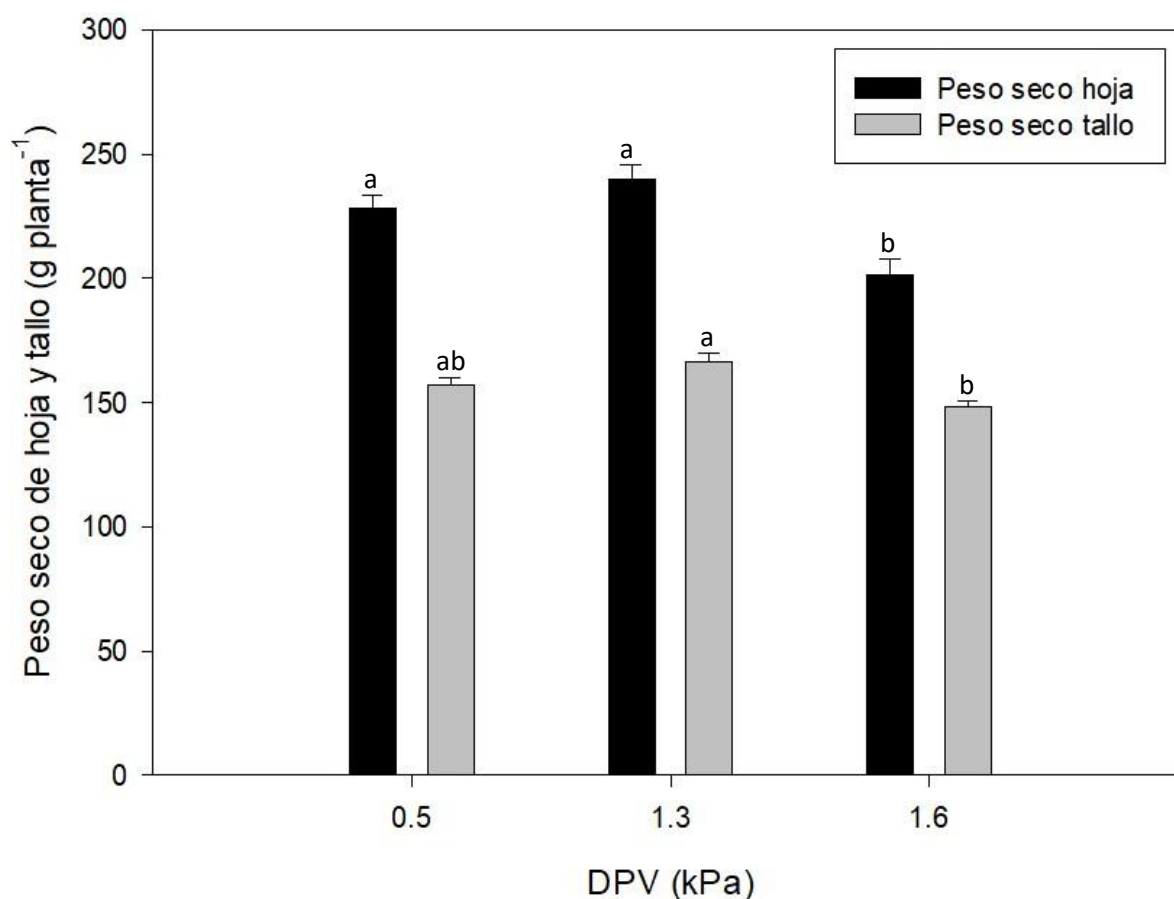


Figura 2. Peso seco de hoja y tallo de la planta de tomate bajo distintos niveles de déficit de presión de vapor (DPV). Columnas con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey, $p < 0.05$). Las columnas incluyen el error estándar.

Al disminuir DPV de 1.6 kPa a 1.3 y 0.5 kPa, se observó un incremento en la acumulación de materia seca (hoja + tallo) en un 16 % y 10 % respectivamente (Figura 2). Estos resultados coinciden con lo reportado en diversas investigaciones, donde observaron que las plantas que se mantienen en condiciones de bajo DPV, se promovió la acumulación de biomasa seca, en comparación con aquellas plantas en condiciones de ambiente más seco (DPV alto) (Zhang et al., 2015; Lu et al., 2015; Xiao-Cong et al., 2019).

El tallo y las hojas, al estar directamente expuestos al aire, la estructura de sus tejidos es más susceptible a los cambios ambientales y por lo tanto puede reflejar cambios en su tamaño y morfología (Song et al., 2021). Los cambios en los factores ambientales, como la reducción en el DPV, puede incrementar la materia fresca y seca de la planta, principalmente al aumentar la expansión de la hoja (Zhang et al., 2015; Xiao-Cong et al., 2019).

6.1.4 Potencial hídrico de la hoja

Los factores micro ambientales difirieron en cada cámara de cultivo para ambos horarios de medición (08:00 y 14:00). En la medición realizada en horas tempranas (08:00), el DPV promedio fue de 0.7 y 1.5 kPa, para las cámaras de DPV bajo e intermedio (0.5 y 1.3 kPa) y valores de 1.9 kPa en la cámara testigo (1.6 kPa). Se observaron efectos significativos en el factor DPV ($p < 0.001$), así como en el factor CE ($p < 0.05$) en el ψ_w foliar, aunque en este último factor, la prueba de medias utilizada (Tukey, $p < 0.05$) no mostró diferencias significativas entre los tratamientos; tampoco se observó significancia entre la interacción de ambos factores (Figura 3).

Los resultados mostraron que en la lectura a las 08:00 las plantas que se encontraron en la cámara bajo condiciones de DPV de 1.6 kPa, el ψ_w foliar fue 57 % más negativo en comparación con las cámaras donde el DPV fue bajo e intermedio (Figura 3). Estos resultados podrían deberse a un estrés acumulado en las plantas en DPV de 1.6 kPa, donde el flujo de agua y la conductancia hidráulica se vieron afectados, tal como fue reportado por Zhang et al. (2017), lo cual

provocaría que las hojas al amanecer no lograron recuperar completamente el estado de hidratación.

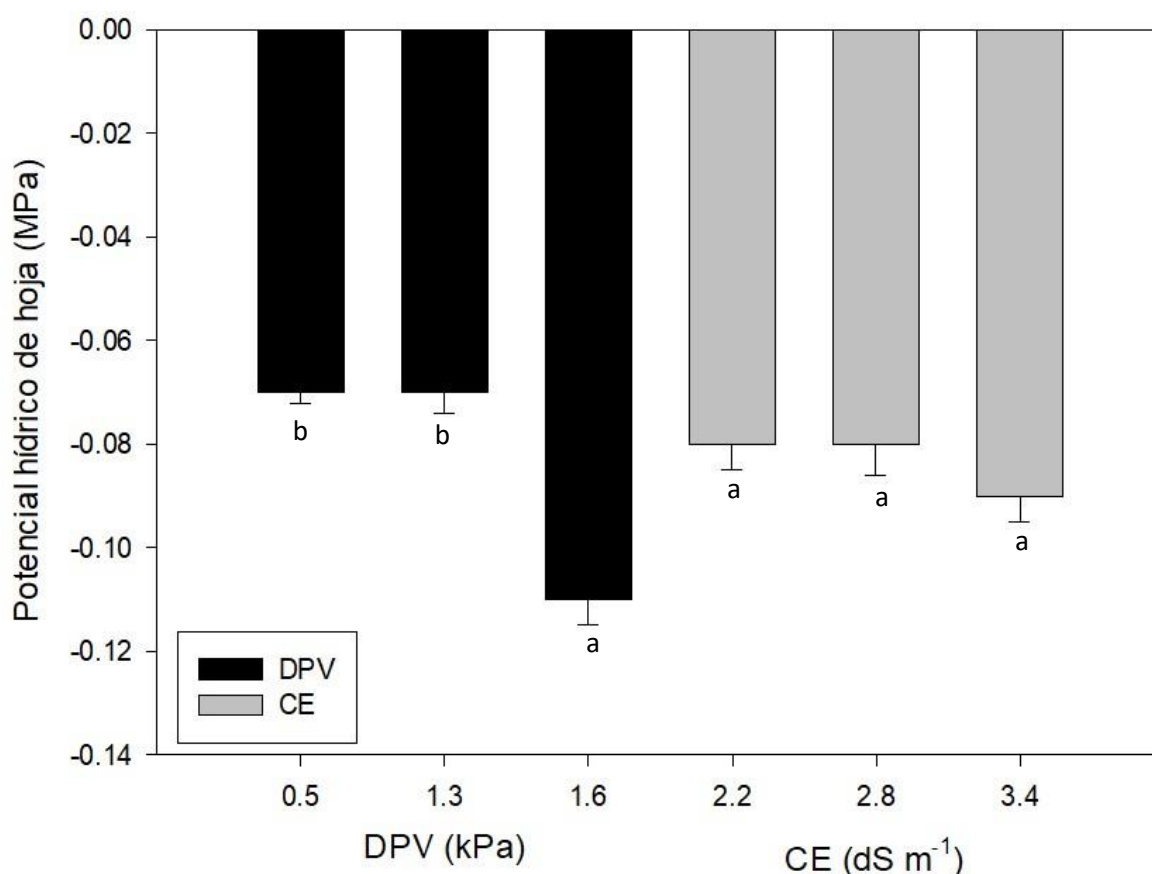


Figura 3. Promedio de tres lecturas en el potencial hídrico foliar de tomate, medido bajo distintos niveles de déficit de presión de vapor (DPV) y conductividad eléctrica (CE) en horas tempranas (08:00). Columnas con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey, $p < 0.05$). Las columnas incluyen el error estándar.

La no significancia por efecto de la CE (Figura 3), probablemente se debió a las condiciones atmosféricas que prevalecieron en las distintas cámaras de cultivo durante la toma de datos, ya que diversos estudios han reportado que mantener plantas de tomate en condiciones de bajo DPV, pudo compensar el efecto negativo de la salinidad en el suelo, principalmente al disminuir la transpiración, ya que, tanto la CE como la transpiración, tienen efectos similares sobre el ψ_w de la planta (Li et al., 2001; Dorai et al., 2001). En este caso, el DPV se mantuvo por debajo de los 2 kPa en todas las cámaras, lo cual es considerado adecuado para el crecimiento de tomate, debido a que, bajo esas condiciones, se reduce la transpiración excesiva y

en consecuencia, el estrés hídrico de la planta (Shamshiri et al., 2018; Xiao-Cong et al., 2019).

Al momento de las mediciones realizadas en horas del mediodía (14:00), el DPV promedio, aumentó en comparación con el medido en horas tempranas, observándose valores de 1.3 y 2 kPa, para las cámaras donde se controló el DPV a niveles bajo e intermedio (0.5 y 1.3 kPa, respectivamente), y un valor promedio de 2.7 kPa en la cámara testigo (1.6 kPa). En esta toma de datos, se encontraron diferencias significativas en ambos factores de estudio ($p < 0.001$), así como en la interacción DPV x CE ($p < 0.001$) (Figura 4).

Los datos mostraron, que en condiciones de bajo DPV (0.5 kPa), el ψ_w foliar fue menos negativo que lo observado en las cámaras donde las condiciones atmosféricas fueron de 1.3 y 1.6 kPa (Figura 4), y al igual que como se observó en la lectura a las 08:00, la CE de la SN no tuvo efecto significativo en el ψ_w foliar, posiblemente debido a que el DPV es muy bajo para que una alta CE ocasione efectos sobre la pérdida de agua por transpiración.

Sin embargo, a medida que se incrementó el DPV a condiciones atmosféricas más secas (cámara 1.3 y 1.6 kPa), el ψ_w foliar se volvió más negativo y el efecto de la CE fue más importante; ya que, bajo dichas condiciones atmosféricas si se observaron diferencias significativas. En general, el ψ_w disminuyó (se hizo más negativo), conforme se incrementaron el DPV y la CE (Figura 4). La tendencia en el ψ_w foliar observado, coincide con lo reportado por Xiao-Cong et al. (2019), quienes observaron ψ_w foliares entre -0.10 MPa y -0.95 MPa en plantas de tomate cultivadas bajo condiciones de DPV controlado (< 2 kPa) y sin control (DPV alto) respectivamente.

Las variaciones en el ψ_w foliar, son ocasionadas principalmente por los déficits hídricos presentes en la atmósfera y en el suelo (Martínez et al., 2014). El DPV, refleja el estado de humedad atmosférica y se considera la principal fuerza impulsora del movimiento del agua en el sistema vascular de las plantas (Du et al., 2019); el aumento en el DPV conduce a una transpiración excesiva, debido a la sequía del aire (Song et al., 2021), lo cual provoca que se pierda el equilibrio entre

el suministro de agua y la transpiración, causando deshidratación de la hoja y estrés hídrico (Xiao-Cong et al., 2019). Por otro lado, el aumento en la CE de la SN, puede llegar a dificultar la absorción de agua por las raíces, debido a la reducción del potencial osmótico e hídrico del sustrato (Schossler et al., 2012), lo cual se observa en el presente estudio ya que cuando el DPV fue mayor, el efecto de una alta CE sobre la reducción del ψ_w foliar se hizo más evidente (Figura 4).

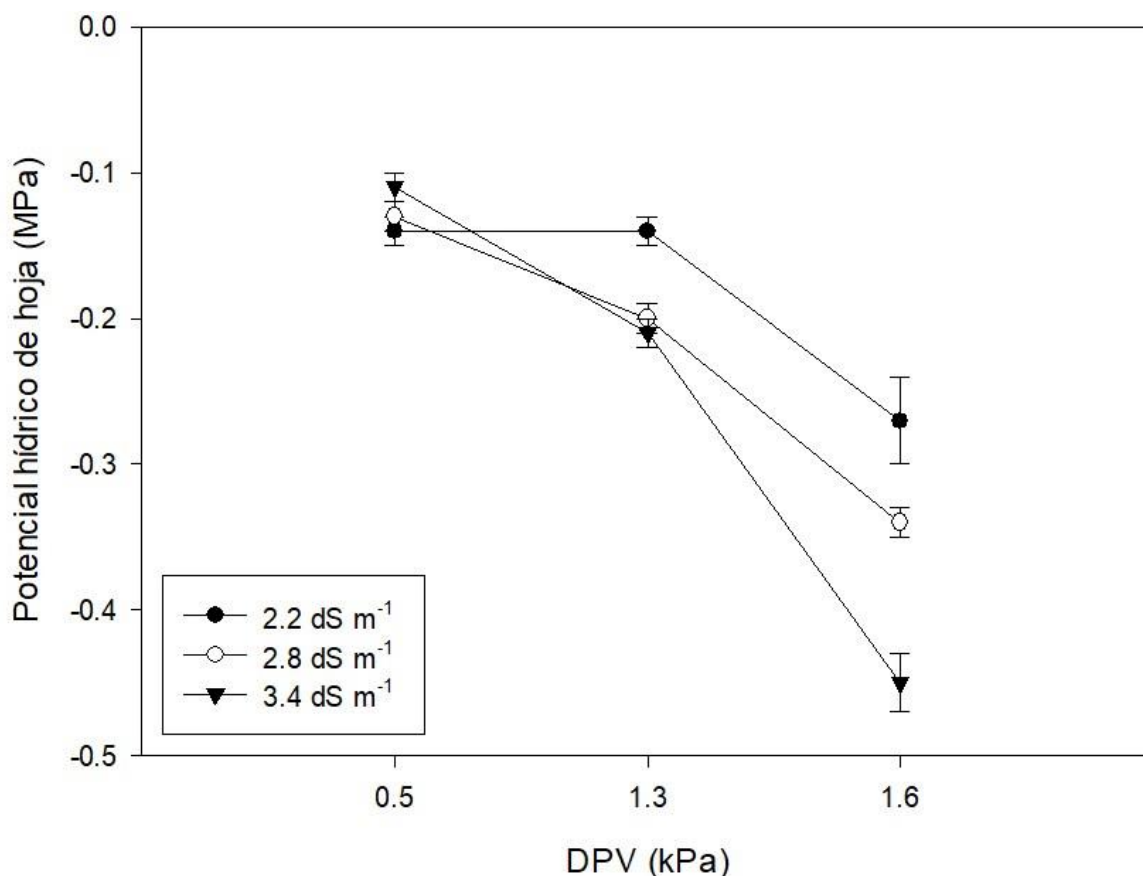


Figura 4. Interacción entre los distintos niveles de déficit de presión de vapor (DPV) y conductividad eléctrica (CE) en el potencial hídrico foliar de tomate en hidroponía, medido en horas del mediodía (14:00). Los promedios incluyen el error estándar.

Li et al. (2001) demostraron que tanto la CE como la transpiración, afectan la misma variable de estado hídrico de la planta (contenido de agua de la planta o potencial hídrico), donde dependiendo de las condiciones ambientales y salinidad en el suelo, un factor puede actuar como dominante y otro como modulador. En nuestros resultados, parece ser que la transpiración, regulada a través del DPV, actuó como

factor dominante. El DPV en horas del mediodía, contribuye al exceso de presiones negativas en la atmósfera, causando que la fuerza motriz atmosférica, sea mucho mayor que el gradiente de potencial hídrico entre el suelo y la hoja (Zhang et al., 2017), mientras que la CE, aparentemente, actuó como un factor modulador, posiblemente por la tolerancia intermedia que las plantas de tomate tienen a la salinidad.

6.1.5 Intercambio gaseoso

6.1.5.1 Tasa de asimilación neta

La tasa de asimilación neta (A), mostró efecto significativo tanto en el factor DPV ($p < 0.05$) como en el factor CE ($p < 0.001$); sin embargo; no se observó significancia en la interacción de ambos factores (Cuadro 7).

En condiciones atmosféricas secas durante el día en el invernadero, el DPV, influye de manera considerable sobre la capacidad fotosintética de las plantas (Grossiord et al., 2020). A pesar de que las medias observadas en los diferentes niveles de DPV fueron estadísticamente iguales bajo la prueba realizada (Tukey, $p < 0.05$), el efecto principal, mostró una ligera tendencia de incremento en la A a medida que el DPV fue menor (Cuadro 7). Estos resultados concuerdan con lo observado por Song et al. (2022), quienes reportaron en plantas de tomate a los 30 días ddt, tasas fotosintéticas similares entre sí, pero con tendencia a incrementar en condiciones de bajo DPV, ya que obtuvieron tasas promedio de $16 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para tratamientos donde el DPV no fue controlado (3 a 6 kPa) y $18 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ donde si fue controlado (1.5 a 2.5 kPa), considerando en ambos casos un nivel de humedad en el suelo del 60 % de la capacidad de campo.

Los tratamientos donde la CE fue intermedia (2.8 dS m^{-1}) y alta (3.4 dS m^{-1}), la A fue un 17 % y 15 % mayor respectivamente, en comparación con lo observado en los tratamientos donde la CE fue baja (Cuadro 7). Xu et al. (1995) observaron un incremento en la A en hojas de tomate al utilizar una CE de 4 dS m^{-1} , en comparación con el testigo (2 dS m^{-1}), en sistemas de lana de roca y NFT, mientras

que Wu y Kubota (2008), encontraron que la respuesta en la tasa fotosintética, utilizando distintos niveles de CE en la SN, fue específica del cultivar utilizado y de la etapa de crecimiento, donde hubo cultivares que mostraron la máxima tasa fotosintética al utilizar una CE de intermedia a alta. En nuestro caso, la máxima tasa fotosintética se encontró en las CE intermedia y alta, lo que sugiere que los niveles óptimos de CE para la mejora en el crecimiento del cultivar utilizado, pueda estar cerca de dichas conductividades.

6.1.5.2 Conductancia estomática

La conductancia estomática (G_s) solo mostró efecto significativo al DPV ($p < 0.05$), no se observó efecto significativo de la CE, ni de la interacción de ambos factores (Cuadro 7). Cuando el DPV se mantuvo en el nivel más bajo, se observó un mayor G_s , ya que superó en un 21 % y 11 % los resultados obtenidos con niveles de DPV intermedio y alto, respectivamente (Cuadro 7). Lo anterior sugiere que se presenta un cierre parcial de los estomas causado por la mayor transpiración promovida en altos niveles de DPV. Resultados similares fueron reportados por Xiao-Cong et al. (2019), quienes observaron en mediciones realizadas a los 40 ddt, que hojas de plantas de tomate en condiciones de DPV bajo, la G_s incrementó en un 32 % en comparación con hojas de plantas en condiciones de DPV sin controlar (alto), en ambos casos con una $[CO_2]$ natural del ambiente. En otros cultivos se ha observado la misma tendencia, ya que en condiciones de DPV bajo, la G_s se incrementó en 15.6 % para melón y en 14.6 % para pepino en comparación con DPV alto (Song et al., 2021). La G_s juega un papel importante en el intercambio de gases de la hoja (Xiong et al., 2018), dicho intercambio está vinculado con la asimilación neta de carbono fotosintético (Song et al., 2022). Una mayor G_s sugiere que los estomas tienden a estar más abierto de tal manera que el flujo de gases se facilita; esto explicaría por qué la mayor tasa de fotosíntesis se presentó también cuando el DPV fue el más bajo (Cuadro 7).

6.1.5.3 Transpiración

La transpiración (Tr), igual que la Gs, sólo mostró efecto significativo por el DPV ($p < 0.05$) y no mostró efecto significativo por la CE, ni en la interacción de ambos factores (Cuadro 7). Se observó una tendencia muy similar a lo visto en la Gs, ya que, en condiciones de bajo DPV la Tr fue mayor en un 19 % y 20 %, en comparación con las plantas en condiciones de DPV intermedio y alto (Cuadro 7); esto sugiere que la reducción en la Tr, se asoció con la disminución de la Gs.

Cuadro 7. Tasa de asimilación neta (A), conductancia estomática (Gs) y transpiración (Tr) en hojas de tomate afectadas por el déficit de presión de vapor (DPV) y la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva.

DPV (kPa)	Parámetro		
	A $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	Gs $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	Tr $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
0.5	$16.70^{\text{az}} \pm 0.43$	$0.47^{\text{az}} \pm 0.03$	$10.64^{\text{az}} \pm 0.47$
1.3	$15.49^{\text{a}} \pm 0.39$	$0.37^{\text{b}} \pm 0.03$	$8.95^{\text{b}} \pm 0.36$
1.6	$15.32^{\text{a}} \pm 0.66$	$0.42^{\text{ab}} \pm 0.02$	$8.85^{\text{b}} \pm 0.45$
CE (dS m^{-1})			
2.2	$14.29^{\text{b}} \pm 0.56$	0.37 ± 0.03	9.11 ± 0.40
2.8	$16.75^{\text{a}} \pm 0.40$	0.45 ± 0.03	9.46 ± 0.57
3.4	$16.47^{\text{a}} \pm 0.34$	0.33 ± 0.05	9.86 ± 0.43
DPV (kPa)	*	*	*
CE (dS m^{-1})	**	NS	NS
DPV x CE	NS	NS	NS

^zLetras distintas en la misma columna son estadísticamente diferentes (Tukey $p < 0.05$), $\pm$ error estándar. * significativo a $p < 0.05$, ** significativo a $p < 0.01$, *** significativo a $p < 0.001$. NS: no significativo.

La tendencia en los resultados es similar a lo reportado por Song et al. (2022), quienes observaron en días diferentes, un incremento en la Tr en hojas de tomate, cuando las plantas se encontraron en condiciones de DPV bajo, independientemente si la humedad del suelo se encontró al 60 % de la capacidad de campo o al 100 %. Además, se ha observado que, en condiciones de bajo DPV, se optimiza el estado de transferencia del agua y la conductividad hidráulica de la planta, lo que puede promover, tasas de transpiración apropiadas (Song et al., 2021).

6.1.5.4 Concentración intercelular de CO₂

La concentración intercelular de CO₂ (Ci), solo mostró efecto significativo en la interacción de ambos factores ($P \leq 0.05$) (Figura 5).

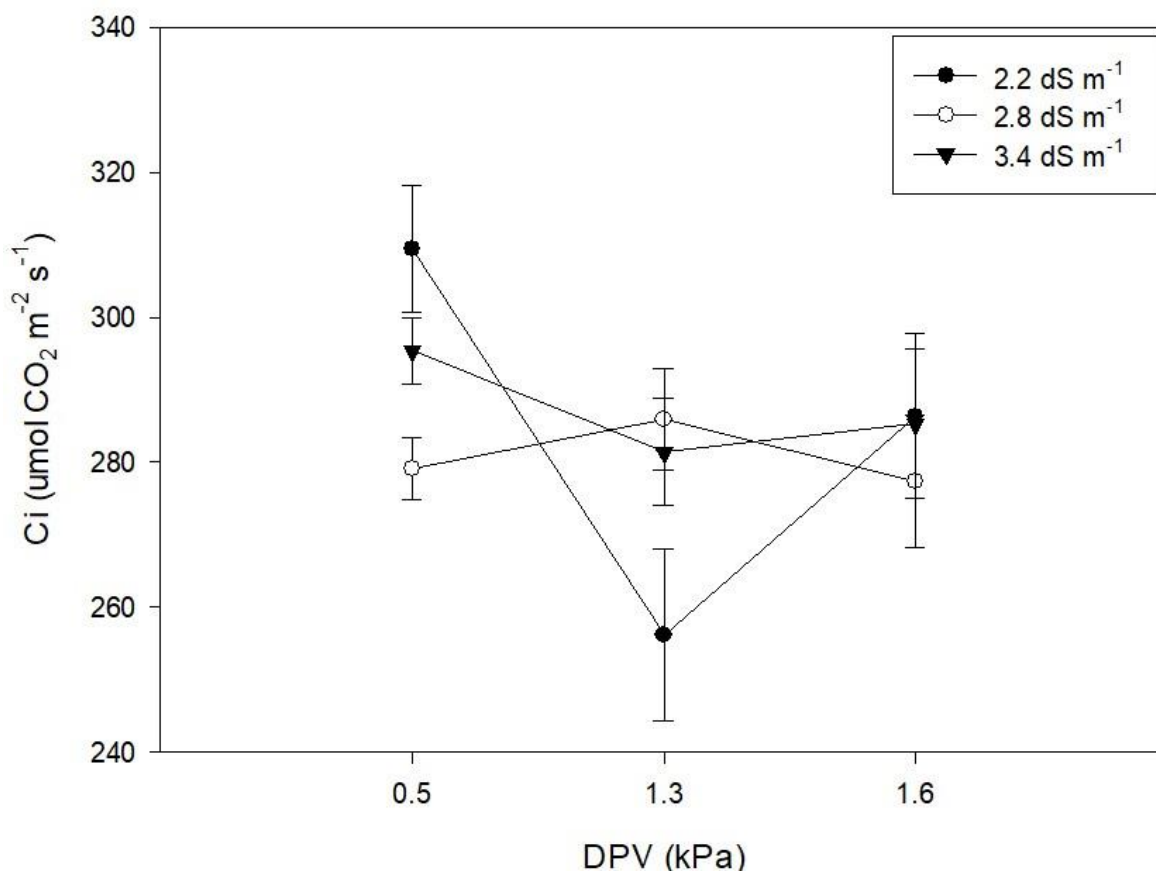


Figura 5. Interacción entre el déficit de presión de vapor (DPV) y la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva en la concentración intercelular (Ci) de CO₂ en hoja. Los promedios incluyen el error estándar.

El tratamiento 0.5 kPa x 2.2 dS m⁻¹, fue el que significativamente mostró la mayor Ci de todos los tratamientos, seguido del tratamiento 0.5 kPa x 3.4 dS m⁻¹, los cuales fueron de un 6 % – 11 %, superiores al resto de tratamientos (Figura 5). La tendencia en los resultados es similar a lo reportado por (Song et al., 2022), quienes observaron en días diferentes y cuando la humedad del suelo se encontraba al 60 % de la capacidad de campo, un incremento en la Ci en hojas de tomate, cuando las plantas se encontraron en condiciones de DPV bajo, en comparación con lo observado en DPV alto.

La respuesta al DPV en los distintos parámetros de intercambio gaseoso de las hojas, se pueden atribuir a una alteración en el funcionamiento y características estomáticas, ya que los estomas son puertas importantes para el intercambio de gases (CO_2 y O_2) y para evitar la pérdida excesiva de agua a través de la transpiración (Aliniaiefard et al., 2014; Song et al., 2021). Arve et al. (2017), descubrieron que, durante el periodo de luz, la apertura estomática fue un 25 % menor bajo una HR baja en comparación con una HR alta y continua, mientras que otros autores han reportado una mayor área de intercambio de gases entre las hojas y el ambiente exterior, debido a un incremento en la densidad, longitud y ancho de los estomas de las hojas de tomate, cuando estas se encontraron en condiciones continuas de DPV bajo (HR alta) (Zhang et al., 2015; Xiao-Cong et al., 2019). La ausencia de diferencias significativas entre los parámetros de intercambio gaseoso y la CE posiblemente fue debido a un ajuste osmótico que las plantas normalmente realizan, tras una exposición prolongada a una CE alta, tal como lo reportaron Wu y Kubota (2008), quienes no encontraron diferencias significativas en la etapa de crecimiento reproductivo, entre la G_s y la T_r al comparar una CE intermedia (4.8 dS m^{-1}) contra una CE alta y una baja (8.4 y 2.3 dS m^{-1} , respectivamente).

6.1.6 Rendimiento

El rendimiento (kg planta^{-1}) estuvo influenciado por la interacción entre el DPV y la CE, ya que se detectó efecto significativo ($p < 0.01$) (Figura 6). En este caso, se observó que el tratamiento de $0.5 \text{ kPa} \times 2.8 \text{ dS m}^{-1}$ fue el que produjo el mayor rendimiento, sin embargo; con CE de 2.8 dS m^{-1} pero en condiciones de DPV de 1.3 y 1.6 kPa el rendimiento disminuyó en un 12 %. En contraste, la SN con CE de 2.2 dS m^{-1} , en condiciones de DPV de 0.5 kPa mostró un bajo rendimiento, pero, al incrementar el DPV a 1.3 y 1.6 kPa , la SN con CE de 2.2 dS m^{-1} , el rendimiento incrementó en aproximadamente un 9 %, observándose un rendimiento muy similar al obtenido con el tratamiento 0.5 kPa con 2.8 dS m^{-1} . Las plantas tratadas con una CE de 3.4 dS m^{-1} , mostraron el rendimiento más bajo, independientemente de las condiciones de humedad ambiental.

De acuerdo con algunos estudios, el rendimiento de tomate disminuye con el incremento de la salinidad (Krauss et al., 2006; Moya et al., 2017). Sin embargo, la CE óptima depende de las interacciones entre cultivares, factores ambientales y prácticas culturales (Dorai et al., 2001), ya que como se observó en este estudio, la CE óptima para obtener el mayor rendimiento, fue dependiente de las condiciones atmosféricas.

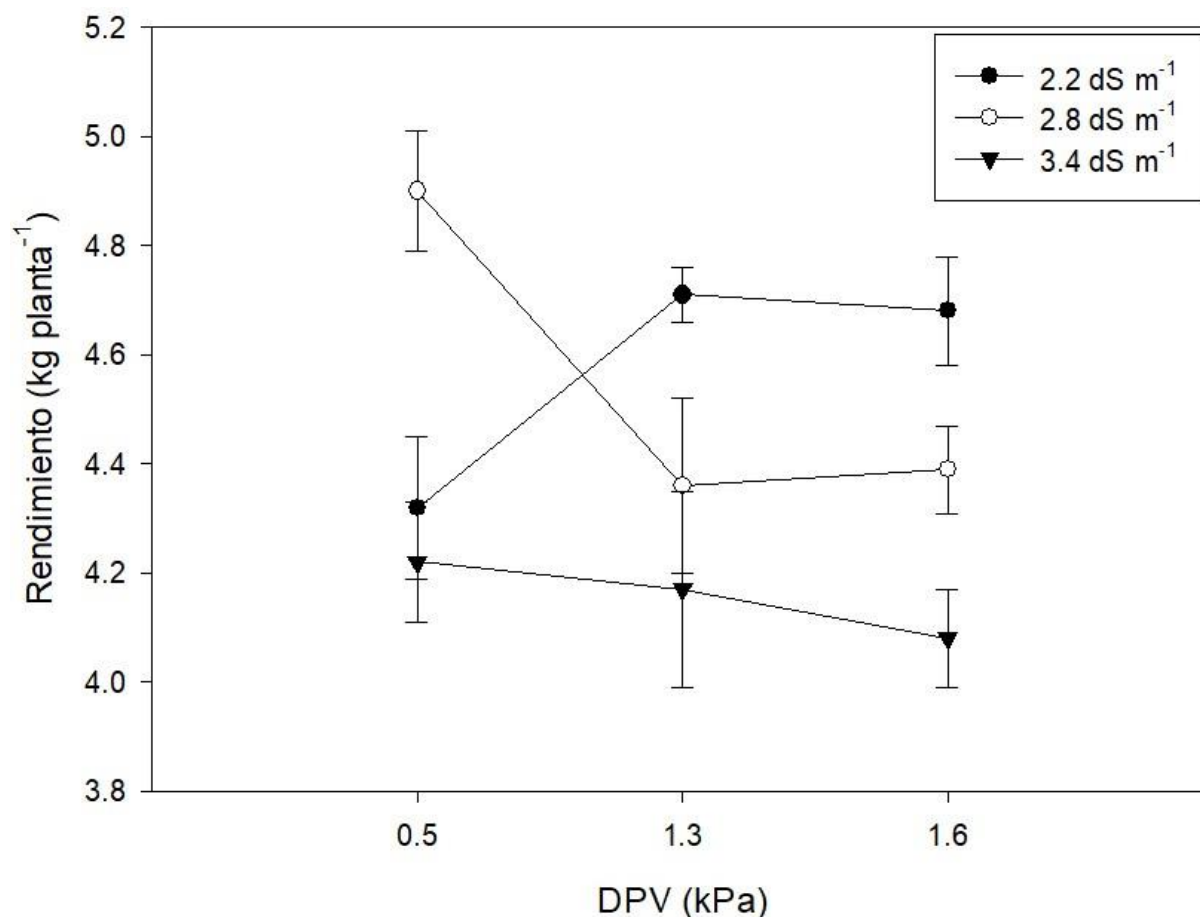


Figura 6. Interacción entre el déficit de presión de vapor (DPV) y la conductividad eléctrica (CE) en la solución nutritiva sobre el rendimiento de tomate. Los promedios incluyen el error estándar.

Basado en el modelo de Maas y Hoffman (1977), Saranga et al. (1992) encontraron que una CE de 2 y 2.5 dS m⁻¹, en la zona radicular, representa el umbral por encima del cual, se registra una disminución en el rendimiento de un 9 % - 10 % por cada aumento en 1 dS m⁻¹ sobre el umbral; esta tendencia se observó en los tratamientos donde la CE de la SN fue de 2.8 dS m⁻¹ (CE en sustrato = 2.6 ± 0.22 dS m⁻¹) y de

3.4 dS m⁻¹ (CE en sustrato = 3.1 ± 0.17 dS m⁻¹) y las condiciones ambientales de DPV fueron de 1.3 kPa (CE en sustrato = 2.8 ± 0.20 dS m⁻¹) y 1.6 kPa (CE en sustrato = 3.2 ± 0.14 dS m⁻¹), ya que la CE en el sustrato en dichos tratamientos se mantuvo por encima de los 2.5 dS m⁻¹.

Por otro lado, el tratamiento de 0.5 kPa x 2.8 dS m⁻¹, fue el tratamiento con mayor rendimiento, debido a que posiblemente dicha CE en la SN fue la óptima para el cultivar utilizado, ya que a pesar haberse encontrado ligeramente por encima del umbral de disminución, el efecto negativo que podría haber ocasionado esa CE, probablemente fue reducido, por el control de la transpiración de las hojas al estar en condiciones de bajo DPV (0.5 kPa). Resultados similares reportaron Li et al. (2001), quienes observaron que al reducir la transpiración de las plantas a través del incremento de la HR (< DPV), lograron reducir significativamente el efecto negativo de una CE alta. La CE de 2.2 dS m⁻¹ en condiciones de DPV de 1.3 y 1.6 kPa, probablemente mostró el mejor rendimiento, debido a que, en dichas condiciones de baja humedad ambiental, la planta posiblemente sufrió menos estrés hídrico, ya que dicha SN fue la que tuvo una menor CE en el sustrato (2.2 ± 0.3 y 2.8 ± 0.3 dS m⁻¹ respectivamente) comparado con las CE de la SN intermedia y alta en las mismas condiciones ambientales, donde la CE en el sustrato promedio osciló entre 3.1 ± 0.2 y 3.5 ± 0.1 dS m⁻¹.

Debido a que tanto la transpiración de las plantas, regulada por el DPV, como la CE en la rizosfera, tienen hasta cierto punto, efectos similares sobre el estado hídrico de la planta (Li et al., 2001), posiblemente la reducción del rendimiento en los tratamientos de mayor estrés hídrico, se debió a la disminución del peso de los frutos, ya que por un lado, la CE alta, puede disminuir el transporte de agua al fruto al afectarse la absorción de agua por parte de las raíces (disminución del potencial osmótico) (Li et al., 2001; Krauss et al., 2006; Moya et al., 2017). Por otro lado, condiciones de alto DPV, pueden incrementar la transpiración del fruto y disminuir el flujo de agua al mismo, a través del xilema (Guichard et al., 2005).

6.1.7 Concentración nutrimental en hojas

6.1.7.1 Nitrógeno

En este experimento, los factores DPV, CE y la interacción de ambos factores, no tuvieron efecto significativo sobre el abasto de N en las hojas (Cuadro 8), ya que en todos los tratamientos fue estadísticamente similar. Los niveles de N fueron similares a lo reportado en tomate por Godoy-Hernández et al. (2009). Estos resultados indicarían que el N no fue un elemento limitante en el crecimiento y desarrollo del cultivo de tomate, bajo las condiciones ambientales y las soluciones nutritivas utilizadas en este experimento.

6.1.7.2 Fósforo

El P, sólo mostró efecto significativo por el DPV ($p < 0.05$), sin detectarse efecto en la CE ni en la interacción de ambos factores (Cuadro 8). En este caso, cuando las condiciones de DPV fueron de 0.5 y 1.3 kPa, se observó una mayor acumulación de P en un 30 % y 21 %, respectivamente, comparado con las plantas que se encontraron en DPV de 1.6 kPa (Cuadro 8).

Esto indicaría que en condiciones donde se reguló el DPV a la baja (0.5 y 1.3 kPa), mejoraría significativamente la absorción y acumulación de P en hojas. Esto podría tener relación con la mayor acumulación de materia seca y fresca en dichas condiciones ambientales (Figura 1 y 2), debido a que se ha observado una relación entre el contenido de P y el peso fresco y seco de brotes (Zhang et al., 2019), ya que el P es esencial para el crecimiento de las plantas, la homeostasis en la energía celular (ATP), la formación de ácidos nucleicos y la fosforilación reversible de proteínas (Maathuis, 2009).

6.1.7.3 Potasio

La concentración de K en hojas, se vio afectada por la interacción de ambos factores de estudio (DPV y CE), ya que se observó efecto significativo ($p < 0.001$) (Figura 7). Cuando el DPV fue de 0.5 y 1.3 kPa y la CE de la SN de 2.8 y 3.4 dS m^{-1} , se observó una mayor acumulación de K en hojas, superior entre 19 % y 22 % comparado con la CE de 2.2 dS m^{-1} , bajo las mismas condiciones ambientales mencionadas anteriormente. Sin embargo, cuando el DPV fue de 1.6 kPa, con la CE de 2.2 dS m^{-1} , la acumulación de K en las hojas se incrementó en 36 % comparado con el resto de soluciones nutritivas con CE de 2.8 y 3.4 dS m^{-1} en cualquier condición ambiental (Figura 7).

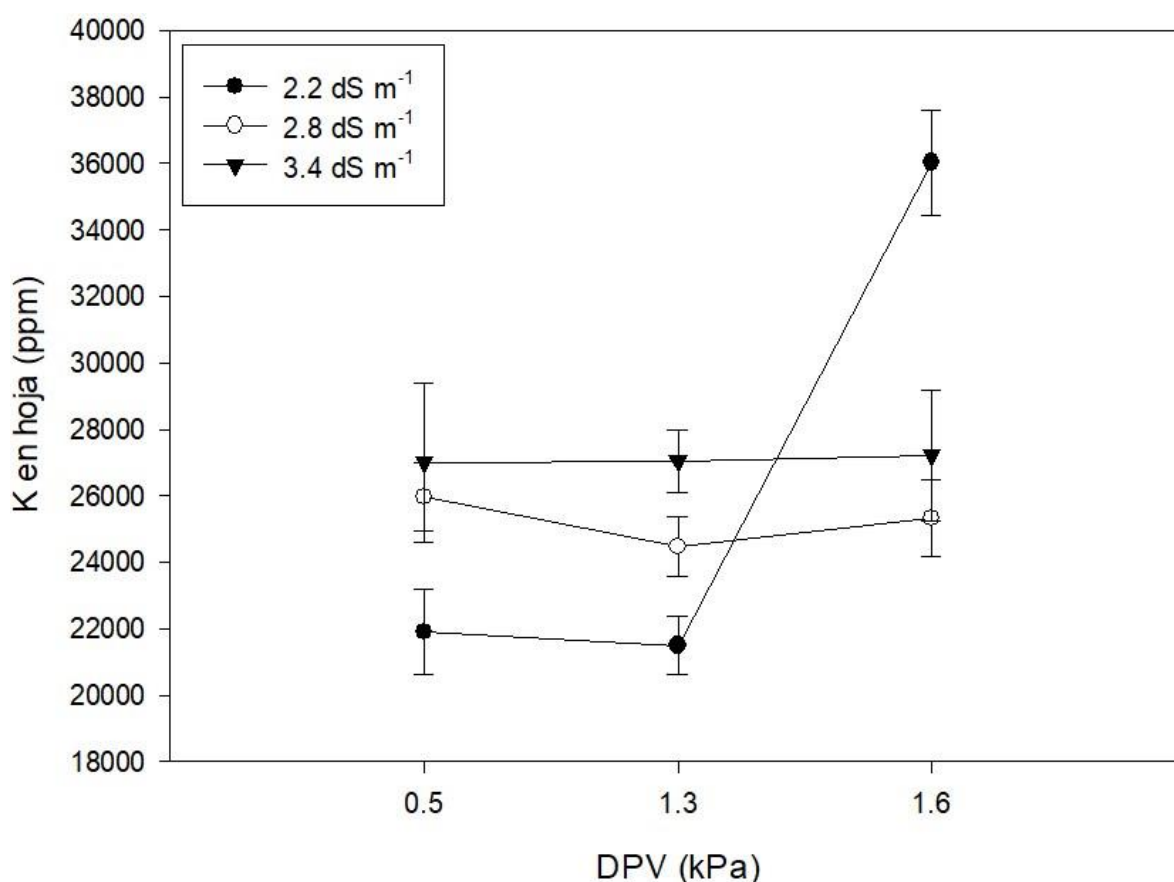


Figura 7. Interacción entre el déficit de presión de vapor (DPV) y la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva en la concentración de potasio (K) en hojas de tomate. Los promedios incluyen el error estándar.

Lo anterior indicaría que en condiciones de transpiración baja (0.5 y 1.3 kPa), se puede ver favorecida la acumulación de K en hojas con CE en la SN de 2.8 y 3.4 dS m⁻¹, pero en condiciones de transpiración excesiva (1.6 kPa), la CE baja (2.2 dS m⁻¹), mejoraría la absorción y acumulación de K en hojas ya que como se ha mencionado anteriormente, el DPV y la CE afectan el potencial hídrico de la planta, por lo que una CE alta y alto DPV, podría afectar la absorción de K.

En nuestro experimento, a mayor CE en la SN, la concentración de K en la SN se incrementó (Cuadro 4), por lo que los resultados observados en esta variable, están en concordancia con lo reportado por Zhang et al. (2021), quienes observaron una mayor acumulación de K en las hojas de plántula de tomate, al utilizar soluciones nutritivas donde la concentración de K se incrementó de 2 mmol L⁻¹ a 4 y 8 mmol L⁻¹, probablemente por la mayor presencia de K disponible en la SN.

6.1.7.4 Calcio

La concentración de Ca en hojas solo mostró significancia con el factor DPV ($p < 0.001$) (Cuadro 8). En este caso se observó, que bajo condiciones de DPV de 0.5 y 1.3 kPa, la acumulación de Ca en hojas fue superior de 15 % a 18 %, comparado con la acumulación de Ca bajo condiciones de DPV de 1.6 kPa (Cuadro 8). La modificación del DPV es importante para mejorar el movimiento pasivo del agua (Shamshiri et al., 2018) y de esta manera, poder incrementar la absorción de agua y Ca del suelo. Estudios previos, indicaron que las principales razones que dificultan la acumulación de Ca en las hojas son la densidad de venas principales, la tasa de asimilación neta (A) y la conductancia estomática (Gs), observándose que en condiciones donde el DPV fue bajo, la densidad de venas principales, la A y Gs se incrementaron, relacionándose positivamente con un incremento en el contenido de Ca foliar (Yu et al., 2022). Lo anterior podría servir de explicación en la mayor acumulación de Ca observada en nuestro experimento cuando las condiciones de DPV fueron de 0.5 y 1.3 kPa, ya que la A y la Gs igualmente, se vieron beneficiadas en condiciones donde el DPV fue bajo (Cuadro 7).

6.1.7.5 Magnesio

El Mg acumulado en las hojas, solo tuvo efecto significativo ($p < 0.01$) en el factor CE, sin embargo; se observó una tendencia de mayor concentración en hoja, a medida que el DPV fue más bajo (Cuadro 8). En este caso se observó que cuando la CE de la SN fue de 2.2 dS m^{-1} , la acumulación de Mg en las hojas fue superior en 9 % y 10 %, comparado con las CE más concentradas (2.8 y 3.4 dS m^{-1}) (Cuadro 8). Esta mayor acumulación de Mg en hojas donde la CE fue de 2.2 dS m^{-1} , pudo deberse a mayor absorción de agua por parte de las raíces de la planta y, en consecuencia, mayor absorción de Mg, ya que al ser una CE baja el potencial osmótico fue menos negativo. Estudios han reportado que la absorción de macronutrientes como el Mg en cultivos hidropónicos, en general se rigen por la tasa de absorción de agua (Weerakkody et al., 2011).

Cuadro 8. Relación entre el déficit de presión de vapor (DPV) y la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva en la concentración nutrimental de nitrógeno (N), fósforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg) y boro (B) en hojas de tomate cultivado en hidroponía.

DPV (kPa)	N (%)	P (ppm)	Ca (ppm)	Mg (ppm)	B (ppm)
0.5	2.5 ± 0.1	$5676^{az} \pm 326$	$29022^{az} \pm 809$	5653 ± 101	$57.9^{cz} \pm 1.5$
1.3	2.4 ± 0.1	$5260^{ab} \pm 327$	$28371^a \pm 743$	5388 ± 133	$66.5^b \pm 1.5$
1.6	2.5 ± 0.1	$4359^b \pm 255$	$24617^b \pm 822$	5342 ± 116	$76.3^a \pm 2.6$
CE (dS m^{-1})					
2.2	2.4 ± 0.1	5122 ± 360	27679 ± 1286	$5764^a \pm 61$	64.7 ± 2.5
2.8	2.4 ± 0.1	5175 ± 376	26814 ± 858	$5333^b \pm 132$	67.1 ± 2.2
3.4	2.5 ± 0.1	4997 ± 265	27516 ± 519	$5286^b \pm 119$	68.9 ± 3.4
DPV (kPa)	NS	*	***	NS	***
CE (dS m^{-1})	NS	NS	NS	**	NS
DPV x CE	NS	NS	NS	NS	NS

^zLetras distintas en la misma columna son estadísticamente diferentes (Tukey $p < 0.05$), $\pm$ error estándar. * significativo a $p < 0.05$, ** significativo a $p < 0.01$, *** significativo a $p < 0.001$. NS: no significativo.

6.1.7.6 Boro

La acumulación de B en hojas solo mostró significancia en el factor DPV ($p < 0.001$) (Cuadro 8). Bajo condiciones de DPV de 1.6 y 1.3 kPa, se acumuló mayor cantidad de B, siendo superior en un 32 % y 15 %, respectivamente, comparado con la acumulación de B observada en condiciones de DPV de 0.5 kPa (Cuadro 8). Alpaslan y Gunes (2001), sugieren que la absorción de B está fuertemente controlada por el flujo de transpiración en el tomate, ya que se realiza mediante transporte pasivo, debido a que se acumula en los sitios de alta transpiración como los márgenes de las hojas maduras. Sin embargo; los resultados observados fueron contrarios a lo anteriormente descrito, ya que la mayor transpiración se dio en condiciones de bajo DPV (0.5 kPa), donde el resto de los nutrimentos (P, Ca, Mg) se acumularon en mayor concentración al mejorar el transporte pasivo de agua.

6.2 Fruto

6.2.1 Contenido fenólico total

El contenido total de fenoles mostró efecto significativo ($p < 0.01$) (Cuadro 9) con el DPV y efecto significativo con la CE ($p < 0.05$), pero no se observó interacción significativa entre ambos factores (Cuadro 9). Los datos mostraron un incremento en el contenido de fenoles en un 13 %, cuando las condiciones de DPV aumentaron a niveles de 1.3 y 1.6 kPa (Cuadro 9). Por otro lado, cuando la CE de la SN fue de 2.8 y 3.4 dS m⁻¹, el contenido fenólico del fruto incrementó en 9 %, comparado con la CE de la SN de 2.2 dS m⁻¹ (Cuadro 9). Resultados similares fueron reportados por Moya et al. (2017), quienes observaron un aumento del 8.1 %, en el contenido total de fenoles en frutos de tomate, cuando la CE de la SN fue alta, comparado con CE en la SN baja. Este incremento en la síntesis de fenoles pudo haber sido una respuesta de defensa contra el aumento de especies reactivas de oxígeno, provocado por las condiciones de estrés hídrico de la salinidad (Krauss et al., 2006) y baja humedad ambiental (Leyva et al., 2014).

6.2.2 Flavonoides

Los flavonoides en fruto solo mostraron efecto significativo por el DPV ($p < 0.001$) (Cuadro 9). De acuerdo con los datos observados, la mayor concentración de flavonoides en fruto se encontró en aquellos que se mantuvieron en condiciones de DPV de 1.3 y 1.6 kPa y fue superior en un 25 % y 21 %, respectivamente, en comparación con los tratamientos que se encontraron en condiciones de DPV de 0.5 kPa (Cuadro 9).

Con relación a los fenoles y flavonoides, aunque el perfil genético representa el principal factor que determina su acumulación en los distintos órganos vegetales, los factores medioambientales pueden jugar un papel importante en la acumulación de dichos compuestos (Dumas et al., 2003). Torres et al. (2006), reportaron una mayor incidencia de flavonoides en el epicarpio de tomates que estuvieron expuestos a alta radiación solar, como un mecanismo de respuesta fisiológica, ya que los flavonoides son capaces de absorber la radiación y reducir la quemadura solar y el daño oxidativo. En este estudio, durante los meses de julio y agosto, se registró una mayor radiación solar promedio en las cámaras donde la HR no se controló y donde fue controlada al 50 % (DPV 1.6 y 1.3 kPa) (Cuadro 1). Por tanto, la mayor radiación solar y DPV más elevado, pudieron haber sido los principales factores responsables del aumento en el contenido de fenoles y flavonoides, tal como fue reportado por Rosales et al. (2011), quienes observaron una mayor acumulación de fenoles totales, flavonoides y antocianinas en tomate cherry, ocasionado por una alta radiación solar y DPV.

6.2.3 Capacidad antioxidante en el fruto

En este experimento, se determinó la capacidad antioxidante mediante las pruebas DPPH y FRAP. La capacidad antioxidante con la prueba DPPH, tuvo efecto significativo en la interacción de ambos factores ($p < 0.05$) (Cuadro 9). Los valores más altos se observaron en todos los tratamientos que se encontraron en condiciones de DPV de 1.6 y 1.3 kPa donde la capacidad antioxidante fue de 13 %

a 49 % superior, comparado con los tratamientos que se encontraron bajo condiciones de DPV de 0.5 kPa (Figura 8).

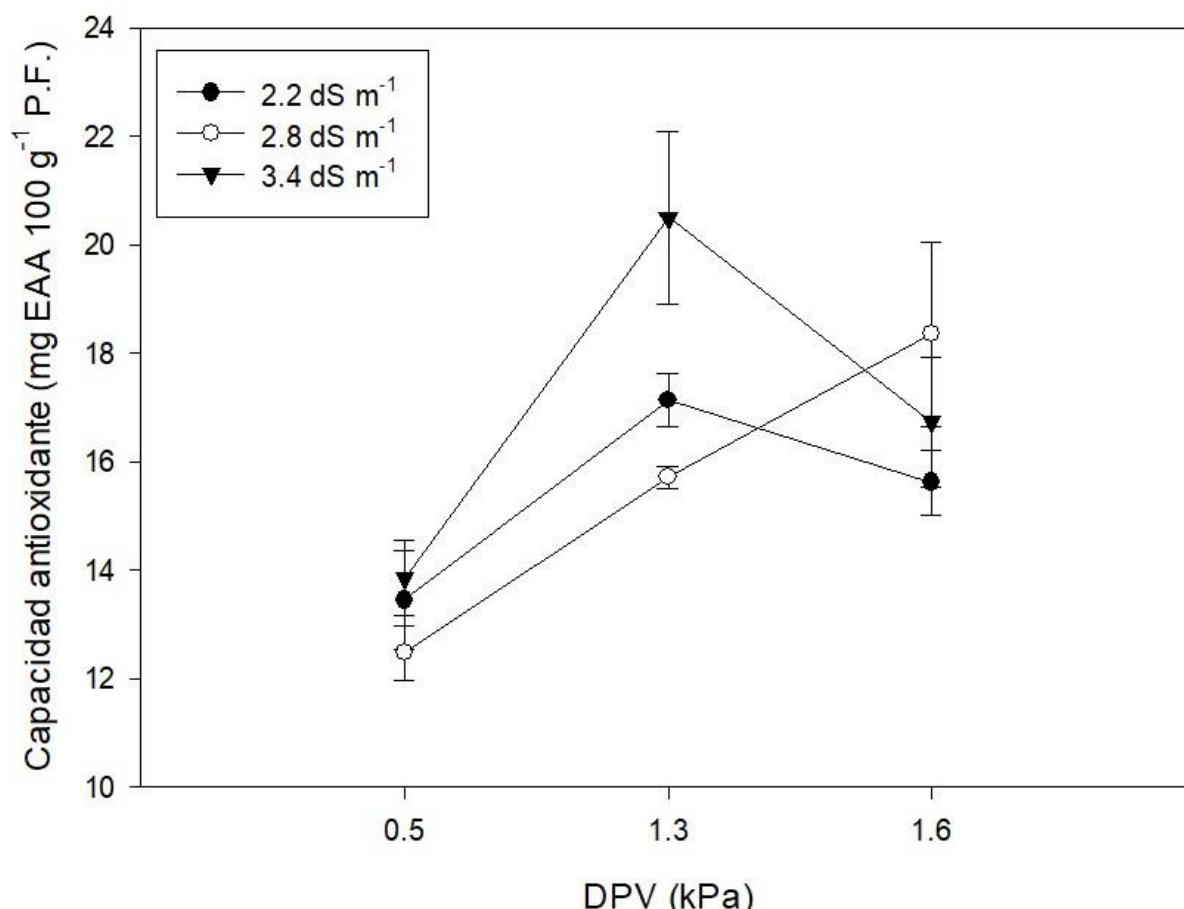


Figura 8. Interacción entre el déficit de presión de vapor (DPV) y la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva en la capacidad antioxidante del fruto en peso fresco (P.F) mediante la prueba DPPH. Los promedios incluyen el error estándar.

Por otro lado, con la prueba FRAP, se observó un efecto igualmente significativo ($p < 0.01$) del factor DPV; en este caso, no se observó efecto significativo de la CE ni la interacción de ambos factores (Cuadro 9). Sin embargo, la tendencia fue similar a lo observado en la prueba DPPH, ya que los valores más altos, se obtuvieron los tratamientos que se encontraron bajo condiciones de DPV de 1.6 y 1.3 kPa, siendo superior en un 43 % y 34 %, respectivamente, comparado con los tratamientos en condiciones de DPV de 0.5 kPa.

Cuadro 9. Relación entre el déficit de presión de vapor (DPV) y la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva, con los compuestos fenólicos y capacidad antioxidante por cada 100 g⁻¹ de peso fresco (PF) en el fruto de tomate.

DPV (kPa)	Fenoles mg eq (EAG) 100 g ⁻¹ PF	Flavonoides mg eq (EQ) 100 g ⁻¹ PF	Capacidad antioxidante	
			DPPH mg eq (EAA) 100 g ⁻¹ PF	FRAP mg eq (EAA) 100 g ⁻¹ PF
0.5	65.35 ^{bz} ± 0.91	7.27 ^b ± 0.31	13.26 ^b ± 0.42	5.77 ^b ± 0.36
1.3	73.96 ^a ± 1.83	9.12 ^a ± 0.39	17.78 ^a ± 0.74	7.72 ^a ± 0.44
1.6	73.78 ^a ± 2.45	8.79 ^a ± 0.31	16.90 ^a ± 0.73	8.27 ^a ± 0.42
CE (dS m ⁻¹)				
2.2	66.91 ^b ± 1.56	8.40 ± 0.40	15.40 ± 0.45	7.20 ± 0.56
2.8	73.13 ^a ± 2.54	8.60 ± 0.46	15.52 ± 0.85	6.91 ± 0.40
3.4	73.05 ^a ± 1.72	8.18 ± 0.32	17.03 ± 0.97	7.66 ± 0.50
DPV (kPa)	**	**	**	**
CE (dS m ⁻¹)	*	NS	NS	NS
DPV x CE	NS	NS	*	NS

^zLetras distintas en la misma columna son estadísticamente diferentes (Tukey p <0.05), ± error estándar. * significativo a p <0.05, ** significativo a p <0.01, *** significativo a p <0.001. NS: no significativo.

Estos resultados indican una mayor capacidad antioxidante en frutos que se encontraron bajo mayor condición de estrés hídrico, ocasionado principalmente por el DPV más elevado y en menor medida, por el incremento de la CE en la SN, por lo que concuerdan con lo reportado en otras investigaciones (Rosales et al., 2011; Leyva et al., 2014), donde se observó una mayor capacidad antioxidante en frutos de tomate, en periodos de estrés causados por una mayor temperatura, radiación solar y DPV, además de que al igual que en nuestra investigación, dicha capacidad antioxidante del fruto, coincidió con el incremento de otros parámetros antioxidantes como fenoles totales y flavonoides (Cuadro 9).

6.2.4 Licopeno

De acuerdo con los resultados, se observó efecto significativo de la interacción de ambos factores (p <0.05) (Figura 9). La mayor concentración de licopeno en fruto, se encontró con el tratamiento 0.5 kPa x 2.8 dS m⁻¹ seguido del tratamiento 0.5 kPa

x 3.4 dS m^{-1} , dichos tratamientos, fueron superiores en un 15 % y 133 % al resto de tratamientos (Figura 9). La menor acumulación de licopeno en los frutos bajo tratamientos que se encontraron en condiciones de DPV más elevado (1.3 y 1.6 kPa), pudo deberse en parte, causado por un estrés hídrico, ya que se ha reportado, que los compuestos bioactivos como el licopeno, puede verse afectado por el suministro de agua, (Bogale et al., 2016).

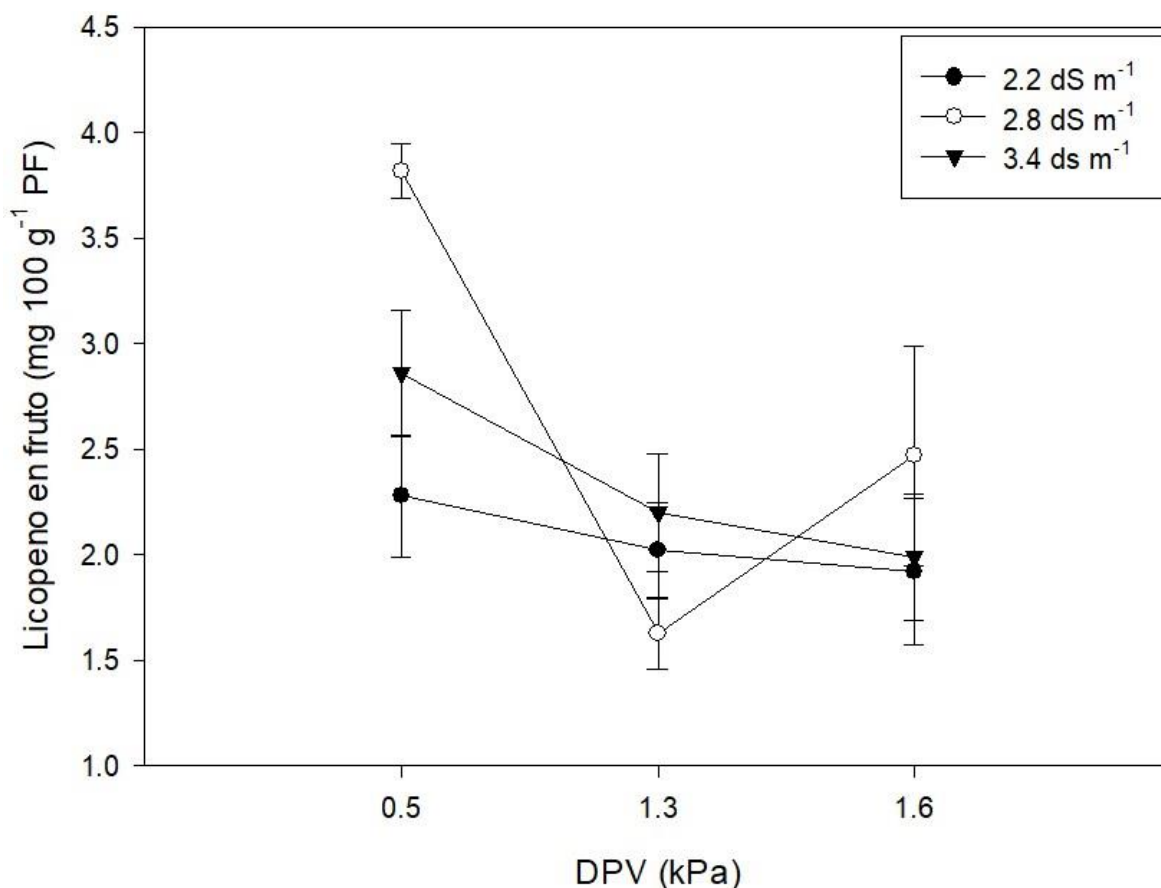


Figura 9. Interacción entre el déficit de presión de vapor (DPV) y la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva en la acumulación de licopeno en el fruto de tomate. Los promedios incluyen el error estándar.

Otra posible respuesta a esta diferencia de concentración de licopeno, pudo deberse a la mayor radiación que recibieron las cámaras donde la HR se reguló al 50 % (1.3 kPa) y donde no se reguló (1.6 kPa) (Cuadro 1), ya que la mayor radiación solar puede estimular la oxidación del licopeno a β -caroteno (Rosales et al., 2011). Estos resultados están en concordancia con lo reportado por diversas investigaciones (Rosales et al., 2011; Leyva et al., 2014), donde observaron una

disminución en el contenido de licopeno en frutos de tomate, cuando estos se encontraron en condiciones de estrés oxidativo provocados por mayores temperaturas, radiación solar y DPV.

En cuanto al efecto de la CE, en condiciones de menor estrés ambiental (0.5 kPa), las CE más elevadas (2.8 y 3.4 dS m⁻¹), mostraron la tendencia de presentar mayor concentración de licopeno en el fruto comparado con la CE baja (2.2 dS m⁻¹), estos resultados están en concordancia con Moya et al. (2017), quienes observaron un aumento significativo en el contenido de licopeno en fruto de tomate, al incrementar la CE de la SN de un nivel bajo a uno alto, aunque los mismos autores argumentan, que el contenido de licopeno depende del genotipo y de las condiciones climáticas, más que del estrés por salinidad.

6.2.5 Firmeza de fruto

Los resultados mostraron efecto significativo en el DPV ($p < 0.001$) (Figura 10), mientras que la CE y la interacción de ambos factores no mostraron significancia. En condiciones donde el DPV fue controlado a niveles de 1.3 y 0.5 kPa, la firmeza de los frutos fue menor en un 8 % y 14 %, respectivamente, comparado con los frutos cultivados en un DPV de 1.6 kPa (Figura 10).

Estos resultados podrían explicarse debido al comportamiento de los flujos de agua que probablemente se presentaron en la planta y frutos, en las distintas condiciones de DPV al momento de la cosecha. Guichard et al. (2005), observaron que en condiciones de DPV alto en horas del mediodía, el flujo de agua del xilema se redujo significativamente, mientras que la transpiración del fruto se incrementó de manera significativa, en comparación con las condiciones de DPV bajo (controlado).

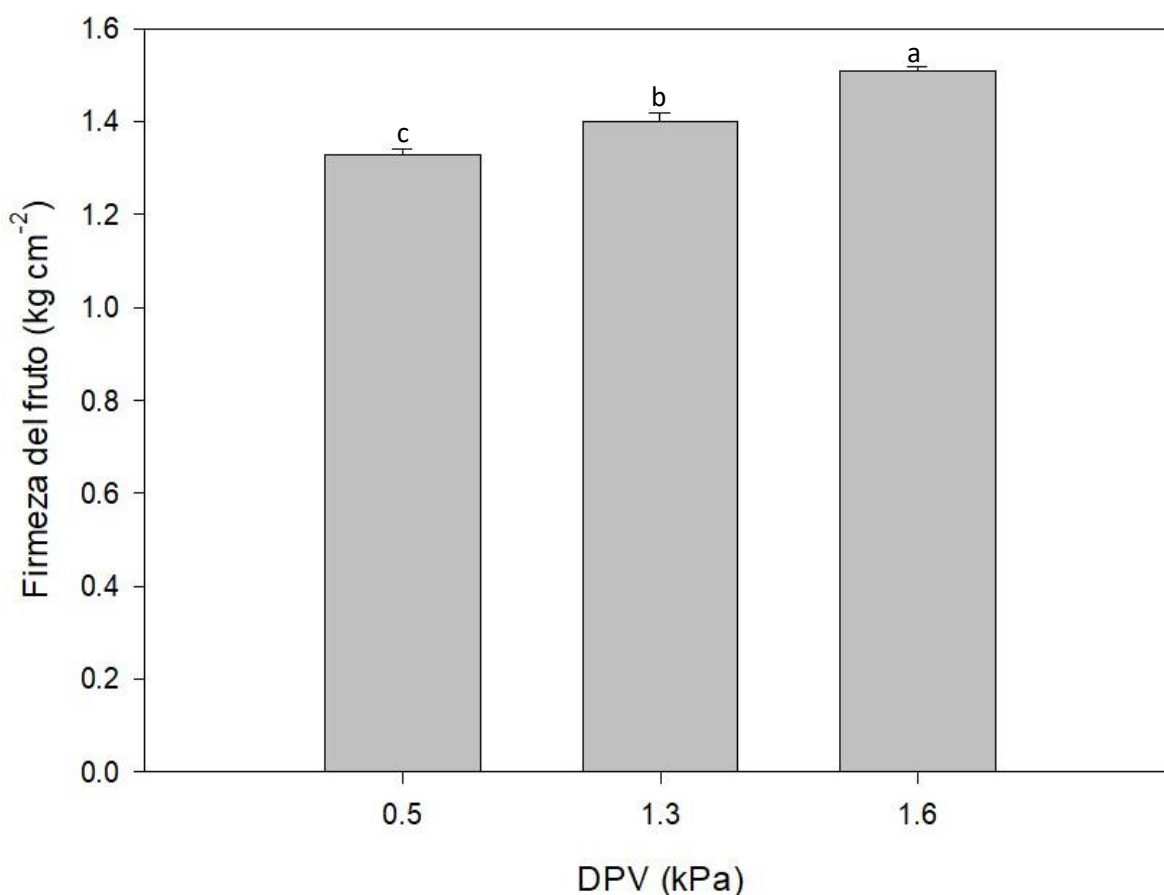


Figura 10. Firmeza del fruto de tomate en relación con distintos niveles de déficit de presión de vapor (DPV). Tratamientos con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey, $p < 0.05$). Las barras incluyen el error estándar.

El aumento de la firmeza del fruto, ligado al aumento del déficit hídrico ocasionado por un mayor DPV en el ambiente, puede estar asociado a una disminución en la turgencia interna del fruto, lo que podría conducir a una menor presión sobre las paredes celulares y, en consecuencia, a una mayor elasticidad epidérmica (Patanè & Cosentino, 2010). Con respecto al efecto de la salinidad en la firmeza del fruto, se han reportado resultados contradictorios. Algunos autores han observado que la firmeza del fruto de tomate se redujo al incrementar los niveles de sal en la raíz (Krauss et al., 2006); mientras que otros autores, observaron que la firmeza del fruto de tomate mejoró con el aumento de la salinidad (Naeem et al., 2020). De acuerdo con Cuartero y Fernández-Muñoz (1999), la firmeza del fruto de tomate disminuye solo cuando existen niveles muy altos de salinidad en la rizosfera (más de 10 dS m⁻¹).

6.2.6 Sólidos solubles totales

Los sólidos solubles totales (SST) en fruto, mostraron efecto significativo en el DPV ($p < 0.001$) y la CE ($p < 0.001$); sin embargo, no se encontró interacción significativa entre ambos factores (Cuadro 10). Bajo condiciones de DPV de 1.6 kPa, el contenido de SST se incrementó en un 12 % - 14 %, comparado con las condiciones donde el DPV fue controlado a un nivel de 1.3 kPa y 0.5 kPa (Cuadro 10). Este incremento de SST en los frutos bajo condiciones ambientales más secas (1.6 kPa), probablemente fue debido a una disminución en el contenido de agua en el fruto, ocasionado por una mayor pérdida de agua por transpiración y una reducción de agua recibida a través del xilema (Guichard et al., 2005). Las tendencias en los resultados son acordes a los reportados por Leonardi et al. (2000), quienes observaron que los frutos de tomate que se encontraron en condiciones de DPV alto, redujeron significativamente el peso fresco y contenido de agua del fruto, mientras que los SST tuvieron un incremento del 16 % - 21 %, comparado con frutos que se encontraron en condiciones de DPV controlado (bajo), donde los SST fueron menores, pero el peso fresco y contenido de agua del fruto fue mayor.

En los distintos niveles de CE, se observó que a medida que la CE incrementó de 2.2 dS m⁻¹ a 2.8 y 3.4 dS m⁻¹, los SST se incrementaron en 6 % - 10 %, respectivamente (Cuadro 10). Esta tendencia en los resultados ha sido reportada en otras investigaciones (Krauss et al., 2006; Moya et al., 2017), donde se encontró un incremento en la concentración de SST en el fruto, a medida que la CE de la SN fue más alta. El incremento en los SST, con el aumento de la CE en la SN, podría atribuirse a una menor acumulación de agua en los frutos (Moya et al., 2017) y a un ajuste osmótico para hacer frente al estrés hídrico o salino (Maggio et al., 2004), ya que el aumento de los SST es una adaptación activa de las plantas para hacer frente a la salinidad, al garantizar una mayor absorción de agua (Hasegawa et al., 2000).

6.2.7 Acidez titulable

La acidez titulable solo mostró efecto significativo en la CE de la SN ($p < 0.01$), no se encontraron efectos significativos en el DPV ni en la interacción de ambos factores (Cuadro 10). La CE de la SN de 3.4 dS m^{-1} , fue la que mostró el nivel más alto de acidez titulable en el fruto, siendo superior en un 7 % y 12 %, comparado con las CE de 2.8 dS m^{-1} y 2.2 dS m^{-1} , respectivamente (Cuadro 10). Estos resultados coinciden con lo reportado por Moya et al. (2017), quienes observaron un aumento significativo en la acidez titulable del fruto de tomate en un 6.7 % y 11.2 %, respectivamente, al incrementar la CE de la SN de un nivel bajo e intermedio, a un nivel alto y lo atribuyeron a una menor acumulación de agua en los frutos, por efecto osmótico de la mayor CE de la SN.

Cuadro 10. Relación entre el déficit de presión de vapor (DPV) y la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva con los sólidos solubles totales (SST), acidez titulable y azúcares totales en frutos de tomate.

DPV (kPa)	SST (°Brix)	Acidez titulable (%)	Azúcares totales mg g^{-1} PF
0.5	$5.1^{\text{bz}} \pm 0.07$	0.44 ± 0.01	$28.48^{\text{bz}} \pm 0.78$
1.3	$5.2^{\text{b}} \pm 0.09$	0.43 ± 0.01	$27.81^{\text{b}} \pm 1.00$
1.6	$5.8^{\text{a}} \pm 0.10$	0.46 ± 0.01	$34.94^{\text{a}} \pm 1.16$
CE (dS m^{-1})			
2.2	$5.1^{\text{b}} \pm 0.09$	$0.42^{\text{b}} \pm 0.01$	$28.48^{\text{b}} \pm 0.88$
2.8	$5.4^{\text{ab}} \pm 0.12$	$0.44^{\text{b}} \pm 0.01$	$30.68^{\text{ab}} \pm 1.12$
3.4	$5.6^{\text{a}} \pm 0.12$	$0.47^{\text{a}} \pm 0.01$	$32.07^{\text{a}} \pm 1.63$
DPV (kPa)	**	NS	***
CE (dS m^{-1})	**	**	*
DPV x CE	NS	NS	NS

^zLetras distintas en la misma columna son estadísticamente diferentes (Tukey $p < 0.05$), $\pm$ error estándar. * significativo a $p < 0.05$, ** significativo a $p < 0.01$, *** significativo a $p < 0.001$. NS: no significativo.

7.2.8 Azúcares totales

Los azúcares totales mostraron un efecto significativo en el DPV ($p < 0.001$) y la CE ($p < 0.05$), pero no se observó efecto significativo de interacción entre ambos factores (Cuadro 10). En condiciones de DPV de 1.6 kPa, se observó la mayor concentración de azúcares, siendo superior en un 23 % - 26 % a los tratamientos que se encontraron en condiciones de DPV de 0.5 kPa y 1.3 kPa. Mientras que la CE cuando estuvo en su nivel intermedio y alto (2.8 y 3.4 dS m⁻¹), la concentración de azúcares totales en el fruto fue superior en 5 % - 13 %, comparado con la CE de la SN baja (2.2 dS m⁻¹) (Cuadro 10). Esta mayor acumulación de azúcares totales en los frutos bajo condiciones de DPV de 1.6 kPa y CE de 2.8 y 3.4 dS m⁻¹, podría deberse a la disminución de la acumulación de agua por los frutos, por lo que, en respuesta al posible estrés hídrico causado por dichas condiciones, los frutos acumulan algunos azúcares para mantener el equilibrio en el potencial osmótico y aumentar la absorción de agua (Plaut et al., 2004).

6.2.9 Azúcares reductores

Los azúcares reductores, mostraron efecto significativo ($p < 0.001$), en la interacción del DPV y CE (Figura 11). El tratamiento con la mayor concentración de azúcares reductores observada fue el tratamiento 0.5 kPa x 2.8 dS m⁻¹ seguido de los tratamientos que se encontraron bajo condiciones de DPV de 1.6 kPa en general dichos tratamientos, tuvieron una concentración de azúcares reductores, superior al 50 % - 128 %, al resto de tratamientos (0.5 kPa x 2.8 dS m⁻¹, 0.5 kPa x 3.4 dS m⁻¹, 1.3 kPa x 2.2 dS m⁻¹, 1.3 kPa x 2.8 dS m⁻¹ y 1.3 kPa x 3.4 dS m⁻¹) (Figura 11).

Lo observado podría estar relacionado con un incremento en la actividad de la sacarosa sintasa, ya que, en condiciones de estrés medioambiental, la planta como medio de defensa, suministra precursores (glucosa y fructosa) de compuestos antioxidantes (como flavonoides y licopeno) con el fin de reducir la acumulación masiva de especies reactivas de oxígeno (ROS) (Rosales et al., 2007).

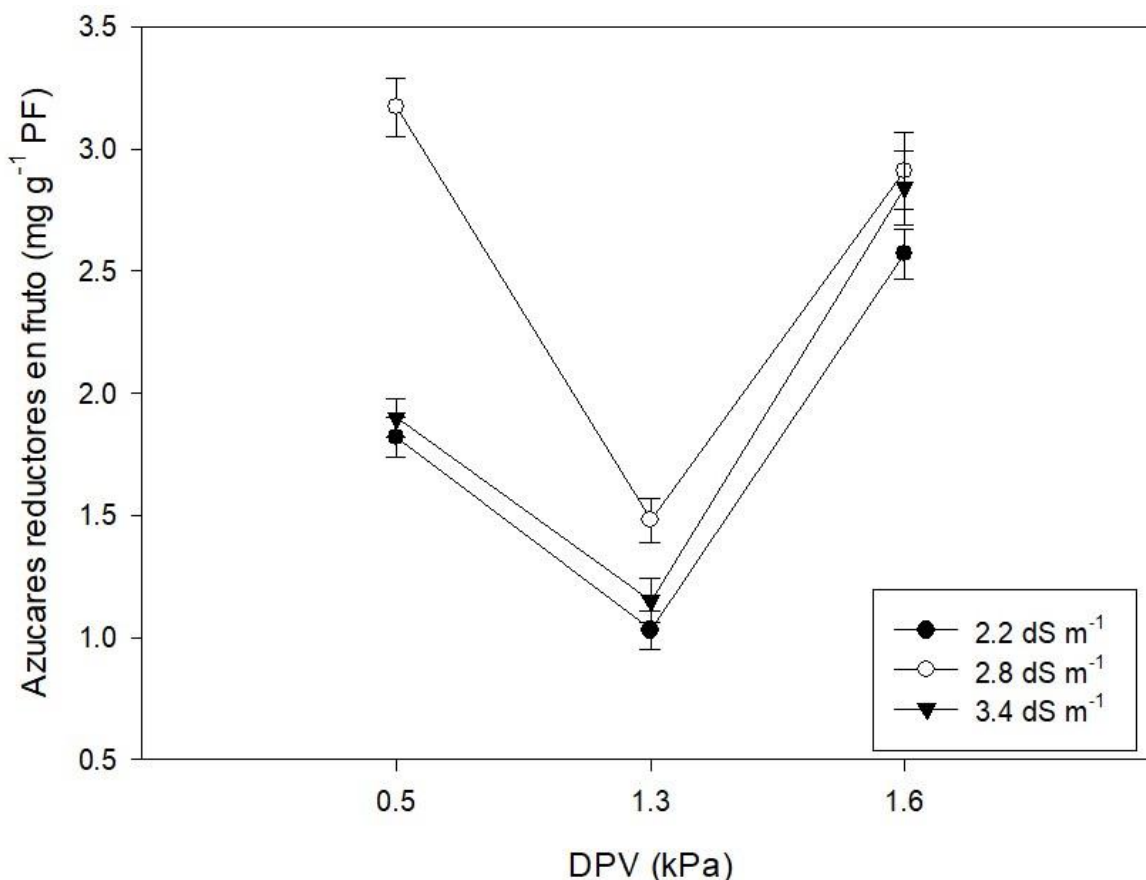


Figura 11. Interacción entre el déficit de presión de vapor (DPV) y la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva, en la acumulación de azúcares reductores en el fruto de tomate. Los promedios incluyen el error estándar.

Estos resultados están en concordancia con diversas investigaciones (Rosales et al., 2011; Leyva et al., 2014), donde se reportó un incremento en la concentración de azúcares solubles como la fructosa y glucosa, en el fruto de tomate, en condiciones de mayor estrés ambiental como lo es, mayor intensidad lumínica, temperatura y DPV. Mientras que Hernández-Pérez et al. (2020), mencionan que una CE alta en la SN, puede aumentar los azúcares en el fruto de tomate.

6.2.10 Concentración nutrimental en fruto

6.2.10.1 Nitrógeno

En cuanto a la acumulación de N en el fruto, se observó una interacción significativa ($p < 0.05$) entre ambos factores de estudio (Figura 12). En condiciones donde el DPV fue de 1.3 y 1.6 kPa, la concentración de N en el fruto en promedio fue superior en 39 % - 51 %, comparado con los frutos que se encontraron en condiciones de DPV de 0.5 kPa. En este caso el efecto de la CE en la SN en la concentración de N en el fruto aparentemente fue menos importante, ya que se observó un ligero incremento en la acumulación del macroelemento en el fruto, cuando la CE fue intermedia y alta (2.8 y 3.4 dS m⁻¹) bajo condiciones de DPV de 1.3 kPa, mientras que en condiciones de DPV de 1.6 kPa, la acumulación de N en el fruto fue similar en todos los niveles de CE (Figura 12).

6.2.10.2 Fosforo

En el caso del P, sólo se observó efecto significativo en los distintos niveles de DPV ($p < 0.001$) (Cuadro 11). De acuerdo con los resultados obtenidos, cuando las condiciones de DPV fueron de 1.3 kPa, el fruto concentró mayor cantidad de P, seguido de las condiciones de 1.6 kPa, ya que se encontró una concentración superior en un 28 % y 8 % respectivamente, comparado con los frutos cosechados bajo condiciones de DPV de 0.5 kPa (Cuadro 11).

6.2.10.3 Potasio

En cuanto a la concentración de K en el fruto, sólo se observó efecto significativo en el factor DPV ($p < 0.001$) (Cuadro 11). En este caso, la acumulación de K, tuvo una tendencia similar a lo visto con el N y P, ya que la mayor concentración de K en fruto se obtuvo, bajo condiciones de DPV de 1.3 y 1.6 kPa, siendo superior en un 29 % y 25 % respectivamente, comparado con los frutos producidos bajo condiciones de DPV de 0.5 kPa (Cuadro 11).

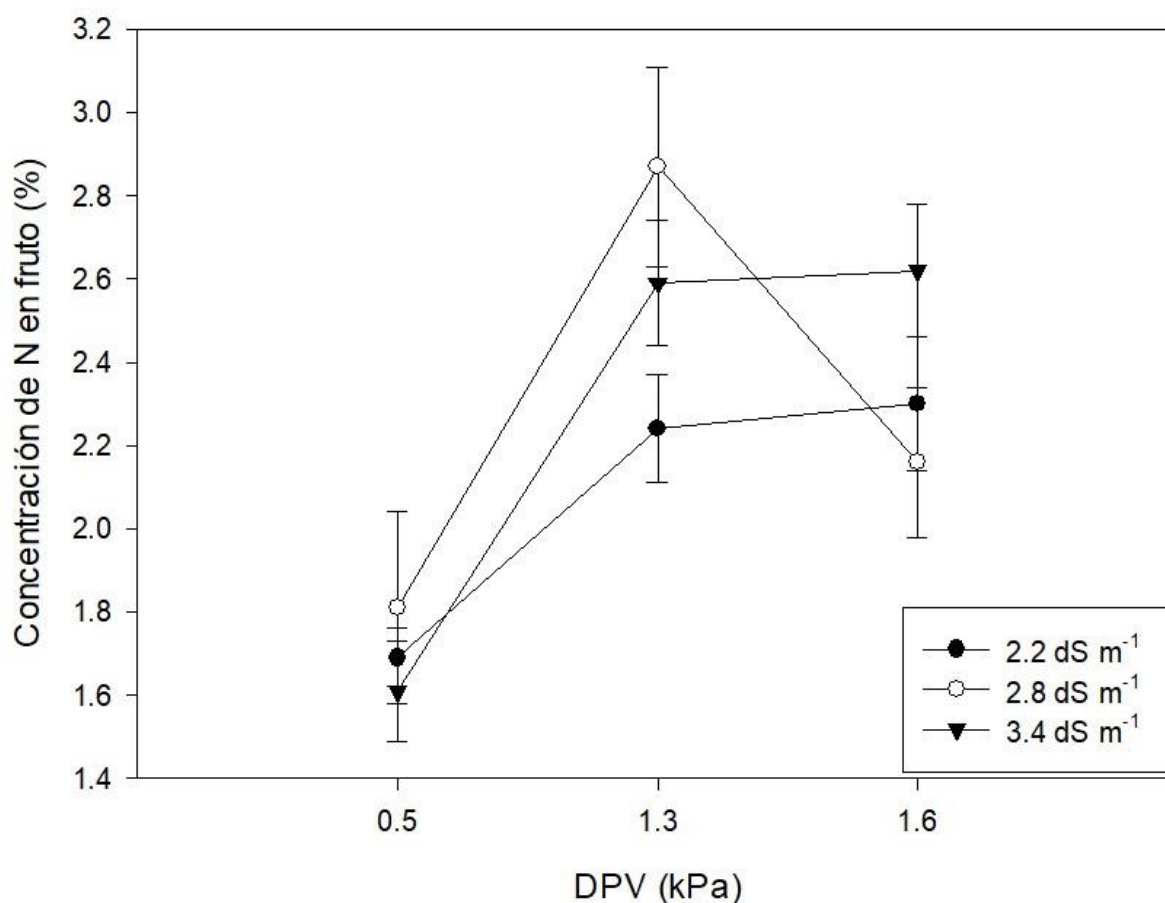


Figura 12. Interacción entre el déficit de presión de vapor (DPV) y la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva en la acumulación de nitrógeno (N) en el fruto de tomate. Los promedios incluyen el error estándar.

6.2.10.4 Calcio

La concentración de Ca en el fruto tuvo efecto significativo ($p < 0.05$) en el DPV (Cuadro 11). Bajo condiciones DPV de 1.3 kPa, el Ca se concentró más en el fruto, seguido de las condiciones de 0.5 kPa, por lo que el Ca acumulado fue superior en 13 % y 5 %, respectivamente, comparado con las condiciones atmosféricas más secas (1.6 kPa) (Cuadro 11). El Ca es un elemento poco móvil en la planta, el cual principalmente se transporta por flujo de masas a través del xilema, impulsado por la transpiración (Yang & Jie, 2005), por lo que probablemente, la menor acumulación de Ca en frutos que se encontraron en condiciones de DPV alto (1.6 kPa), pudo haber sido debido a un menor flujo de agua a través del xilema hacia fruto, ya que

se ha reportado que en condiciones de DPV alto, el flujo acumulado de agua que aporta el xilema al fruto, en un periodo de 24 horas se redujo hasta en un 29 %, comparado con frutos en condiciones de DPV bajo (Guichard et al., 2005).

6.2.10.5 Magnesio

En cuanto a la concentración de Mg en el fruto, solo se observó efecto significativo en el factor DPV ($p < 0.001$) (Cuadro 11). En este caso, condiciones de 1.3 kPa, promovieron mayor concentración de Mg en el fruto, el cual fue superior en un 22 % y 15 %, respectivamente, comparado con los frutos producidos bajo condiciones de 0.5 y 1.6 kPa (Cuadro 11).

Cuadro 11. Relación entre el DPV y la CE de la SN en la concentración nutrimental de fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y boro (B) en frutos de tomate cultivados en hidroponía.

DPV (kPa)	P (ppm)	K (ppm)	Ca (ppm)	Mg (ppm)	B (ppm)
0.5	4536 ^{bz} ± 159	30082 ^{bz} ± 1033	1871 ^{abz} ± 70	1429 ^{bz} ± 33	16.7 ^{bz} ± 0.4
1.3	5791 ^a ± 172	38798 ^a ± 1251	2011 ^a ± 68	1749 ^a ± 51	19.0 ^a ± 0.4
1.6	4884 ^b ± 194	37716 ^a ± 1802	1785 ^b ± 56	1521 ^b ± 55	18.7 ^a ± 0.5
CE (dS m ⁻¹)					
2.2	5109 ± 232	35728 ± 1888	1970 ± 58	1563 ± 60	18.5 ± 0.5
2.8	5169 ± 244	36105 ± 1741	1912 ± 84	1585 ± 68	18.1 ± 0.5
3.4	4932 ± 193	34763 ± 1562	1784 ± 53	1551 ± 48	17.9 ± 0.5
DPV (kPa)	***	***	*	***	***
CE (dS m ⁻¹)	NS	NS	NS	NS	NS
DPV x CE	NS	NS	NS	NS	NS

^zLetras distintas en la misma columna son estadísticamente diferentes (Tukey $p < 0.05$), ± error estándar. * significativo a $p < 0.05$, ** significativo a $p < 0.01$, *** significativo a $p < 0.001$. NS: no significativo.

6.2.10.6 Boro

El B, solo mostró efecto significativo en el factor DPV ($p < 0.001$) (Cuadro 11). En condiciones donde el DPV fue de 1.3 y 1.6 kPa, la concentración de B fue mayor en 12 % - 14 %, comparado con la concentración de B en frutos cultivados bajo DPV de 0.5 kPa (Cuadro 11).

La explicación más probable a la mayor concentración de N, P, K, Mg y B observada cuando las condiciones ambientales de menor humedad ambiental (1.3 kPa y 1.6 kPa), es que los frutos en condiciones de bajo DPV (0.5 kPa), probablemente tenían un mayor contenido de agua, por lo que se podría esperar un menor contenido de estos nutrimentos debido a un efecto de dilución.

VII CONCLUSIONES

Todos los parámetros de intercambio gaseoso, se vieron beneficiados al disminuir el DPV a 0.5 kPa, sin embargo; el efecto de la CE en la SN, solo mejoró la asimilación neta (A) cuando se utilizó CE de 2.8 y 3.4 dS m⁻¹. El efecto negativo de la CE de la SN en el ψ_w foliar en horas del mediodía, fue reducido cuando el DPV disminuyó a 1.3 y 0.5 kPa, a medida que el DPV se elevó, el efecto de la alta CE fue más notorio en la disminución del ψ_w foliar.

La acumulación de peso fresco y seco tanto de hoja como de tallo y la suma de ambos órganos, fue mayor en condiciones de DPV de 0.5 y 1.3 kPa. El rendimiento acumulado de fruta, fue más alto cuando el DPV fue de 0.5 kPa y la CE de la SN de 2.8 dS m⁻¹. Cuando el DPV se elevó a 1.3 y 1.6 kPa, la CE de 2.2 dS m⁻¹ logro mantener el rendimiento muy similar a las condiciones de 0.5 kPa x 2.8 dS m⁻¹.

El DPV fue determinante en la acumulación de nutrimentos en hoja y fruto. Nutrimentos como el P y Ca se acumularon en mayor concentración en hojas en condiciones de bajo DPV mientras que el B se acumuló mayoritariamente en hojas en condiciones de alto DPV. El K se acumuló en mayor concentración en hojas cuando la CE de la SN fue de 2.8 y 3.4 dS m⁻¹ en los distintos niveles de DPV a excepción del DPV de 1.6 kPa donde la CE de 2.2 dS m⁻¹ en dicha condición ambiental, acumuló mayor cantidad de K en hojas.

La acumulación de N en fruto fue mayor, cuando el DPV fue más alto (1.3 y 1.6 kPa). En el resto de nutrimentos, la mayor acumulación en fruto se dio bajo condiciones de DPV de 1.3 kPa, seguido de 1.6 kPa.

La mayor acumulación de compuestos fenólicos (fenoles y flavonoides) y mayor capacidad antioxidante en el fruto se encontró en condiciones de DPV de 1.3 y 1.6 kPa. El licopeno se concentró mayormente en frutos donde el DPV fue de 0.5 kPa y la CE de la SN de 2.8 y 3.4 dS m⁻¹.

El DPV de 1.6 kPa, incremento la firmeza, SST y azúcares totales en el fruto, mientras que la CE de la SN de 3.4 dS m⁻¹, mejoró la acidez titulable.

VIII LITERATURA CITADA

Alcántar, G. G. & Sandoval, V. M. (1999). *Manual de Análisis Químico de Tejido Vegetal*. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo.

Aliniaiefard, S., Matamoros, S. M., & van Meeteren, U. (2014). Stomatal malfunctioning under low VPD conditions: induced by alterations in stomatal morphology and leaf anatomy or in the ABA signaling? *Physiologia Plantarum*, 152(4), 688-699. <https://doi.org/10.1111/ppl.12216>

Alpaslan, M., & Gunes, A. (2001). Interactive effects of boron and salinity stress on the growth, membrane permeability and mineral composition of tomato and cucumber plants. *Plant and Soil*, 236, 123-128. <https://doi.org/10.1023/A:1011931831273>

AOAC. (1990). *Official Methods of Analysis* (15.^a ed.). Association of Official Analytical Chemist.

Aphalo, P. J., & Jarvis, R. G. (1991). Do stomata respond to relative humidity? *Plant Cell Environ*, 14(1), 127-132. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1991.tb01379.x>

Arve, L. E., Kruse, O. M. O., Tanino, K. K., Olsen, J. E., Futsæther, C., & Torre, S. (2017). Daily changes in VPD during leaf development in high air humidity increase the stomatal responsiveness to darkness and dry air. *Journal of Plant Physiology*, 211, 63-69. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.12.011>

Barron, M. A., & Rello, F. (2000). The impact of the tomato agroindustry on the rural poor in Mexico. *Agricultural Economics*, 23, 289-297. <https://doi.org/10.1111/j.1574-0862.2000.tb00280.x>

Bastida, T. A. (2017). Evolución y Situación Actual de la Agricultura Protegida en México. *Memorias del VI Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas*, 281-294.

Baudoin, W., Nono-Womdim, R., Litaladio, N., Hodder, A., Castilla, N. P., Leonardi, C., De Pascale, S., Qaryouti, M., & Duffy, R. (2013). Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable crops: principles for Mediterranean climate areas. *FAO*. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XF2013001549>

Benzie, I. F., & Strain, J. J. (1996). The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of "antioxidant power": The FRAP assay. *Analytical Biochemistry*, 239, 70-76. <https://doi.org/10.1006/abio.1996.0292>

Bogale, A., Nagle, M., Latif, S., Aguila, M., & Müller, J. (2016). Regulated deficit irrigation and partial root-zone drying irrigation impact bioactive compounds and antioxidant activity in two select tomato cultivars. *Scientia Horticulturae*, 213, 115-124. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.10.029>

Brand-Williams, W., Culiver, M. E., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *Food Science and Technology*, 28, 25-30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)

Bunce, J. A. (1981). Comparative responses of leaf conductance to humidity in single attached leaves. *Journal of Experimental Botany*, 32, 629-634. <https://doi.org/10.1093/jxb/32.3.629>

Bunce, J. A. (1997). Does transpiration control stomatal responses to water vapour pressure deficit? *Plant Cell Environ*, 20(1), 131-135. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.1997.d01-3.x>

Campbell, G. S., & Norman, J. M. (2000). *An Introduction to Environmental Biophysics* (2.^a ed.). Springer.

Chinnusamy, V., Jagendorf, A. T., & Zhu, J. (2005). Understanding and Improving Salt Tolerance in Plants. *Crop Science*, 45(2), 437-448. <https://doi.org/10.2135/cropsci2005.0437>

Cuartero, J., & Fernández-Muñoz, R. (1999). Tomato and salinity. *Scientia Horticulturae*, 78(1-4), 83-125. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(98\)00191-5](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(98)00191-5)

De Reijck, G., & Schrevens, E. (1998). Cationic speciation in nutrient solutions as a function of pH. *Journal of Plant Nutrition*, 21(5), 861-870. <https://doi.org/10.1080/01904169809365449>

Dorai, M., Papadopoulos, A. P., & Gosselin, A. (2001). Influence of electric conductivity management on greenhouse tomato yield and fruit quality. *Agronomie*, 21(4), 367-383. <https://doi.org/10.1051/agro:2001130>

Du, Q., Liu, T., Jiao, X., Song, X., Zhang, J., & Li, J. (2019). Leaf anatomical adaptations have central roles in photosynthetic acclimation to humidity. *Journal of Experimental Botany*, 70(18), 4949-4962. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz238>

Dumas, Y., Dadomo, M., Di Lucca, G., & Grolier, P. (2003). Effects of environmental factors and agricultural techniques on antioxidant content of tomatoes. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 83(5), 369-382. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1370>

Fanasca, S., Colla, G., Maiani, G., Venneria, E., Roupael, Y., Azzini, E., & Saccardo, F. (2006). Changes in Antioxidant Content of Tomato Fruits in Response to Cultivar and Nutrient Solution Composition. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(12), 4319-4325. <https://doi.org/10.1021/jf0602572>

FAOSTAT. (2020). *Datos, producción de cultivos y productos de ganadería* [Conjunto de datos]. <https://www.fao.org/faostat/es/#data>

Feltrin, V. P., Bertoldi, F. C., Shibata, M., Rizelio, V. M., Barcelos-Oliveira, J. L., & Sant'Anna, E. S. (2012). The ionic concentration influences of nutrient solutions on the physico-chemical characteristics and productivity of two cherry tomato cultivars

cultivated in NFT hydroponic system. *Acta Horticulturae*, 947, 269-276. http://www.actahort.org/.../947_34.htm

Fish, W. W., Perkins-Veazie, P., & Collins, J. K. (2002). A Quantitative Assay for Lycopene That Utilizes Reduced Volumes of Organic Solvents. *Journal of Food Composition and Analysis*, 15(3), 309-317. <https://doi.org/10.1006/jfca.2002.1069>

Godoy-Hernández, H., Castellanos-Ramos, J. C., Alcántar-González, G., Sandoval-Villa, M., & Muñoz-Ramos, J. D. (2009). Efecto del injerto y nutrición de tomate sobre rendimiento, materia seca y extracción de nutrimentos. *Terra Latinoamericana*, 27(1), 01-09.

Grossiord, C., Buckley, T. N., Cernusak, L. A., Novick, K. A., Poulter, B., Siegwolf, R. T., Sperry, J. S., & McDowell, N. G. (2020). Plant responses to rising vapor pressure deficit. *New Phytologist*, 226(6), 1550-1566. <https://doi.org/10.1111/nph.16485>

Gruda, N. (2009). Do soilless culture systems have an influence on product quality of vegetables?. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 82(2), 141-147. <https://doi.org/10.18452/9433>

Guichard, S., Gary, C., Leonardi, C., & Bertin, N. (2005). Analysis of Growth and Water Relations of Tomato Fruits in Relation to Air Vapor Pressure Deficit and Plant Fruit Load. *Journal Plant Growth Regulation*, 24, 201-213. <https://doi.org/10.1007/s00344-005-0040-z>

Hasegawa, P. M., Bressan, R. A., Zhu, J. K., & Bohnert, H. J. (2000). Plant cellular and molecular responses to high salinity. *Annual Review of Plant Biology*, 51(1), 463-499. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.51.1.463>

Helbel, J. C., Rezende, R., Freitas, P. S., Gonçalves, A. C., & Frizzzone, J. A. (2008). Influência da condutividade elétrica, concentração iônica e vazão de soluções nutritivas na produção de alface hidropônica. *Ciência e Agrotecnologia*, 32(4), 1142-1147. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542008000400016>

Hernández-Pérez, O. I., Valdez-Aguilar, L. A., Alia-Tejacal, I., Cartmill, A. D., & Cartmill, D. L. (2020). Tomato fruit yield, quality, and nutrient status in response to potassium: calcium balance and electrical conductivity in the nutrient solution. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(2), 484-492. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00133-9>

Hernández-Suárez, J. L. (2021). La política pública hacia la agricultura protegida en el gobierno de López Obrador. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(6), 1071-1085. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i6.2776>

Horticultivos. (2021). *59 mil hectáreas bajo agricultura protegida en México*. Recuperado 3 de mayo de 2022, de <https://www.IP.com/agricultura-protegida/59-mil-has-bajo-agricultura-protegida-en-mexico/>

Edenhofer, O., & Seyboth, K. (2013). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). En *Elsevier eBooks* (pp. 48-56). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-375067-9.00128-5>

Jagadish, S. V. K., Septiningsih, E. M., Kohli, A., Thomson, M. J., Ye, C., Redoña, E., Kumar, A., Gregorio, G. B., Wassmann, R., Ismail, A. M., & Singh, R. K. (2012). Genetic Advances in Adapting Rice to a Rapidly Changing Climate. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 198(5), 360-373. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2012.00525.x>

Jie, Z., Tianlai, L., & Jing, X. (2008). Effects of sub-high temperature in daytime from different stages on tomato photosynthesis and yield in greenhouse. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 24(3), 193-197.

Juárez-López, P., Bugarín-Montoya, R., Castro-Brindis, R., Sánchez-Monteón, A. L., Cruz-Crespo, E., Juárez-Rosete, C. R., Alejo-Santiago, G. & Balois-Morales, R. (2011). Estructuras utilizadas en la agricultura protegida. *Revista Fuente*, 3(8), 21-27. <http://dspace.uan.mx:8080/jspui/handle/123456789/567>

Katsoulas, N., Baille, A., & Kittas, C. (2001). Effect of misting on transpiration and conductances of a greenhouse rose canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 106(3), 233-247. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00211-2](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00211-2)

Koch, G. W., Amthor, J. S., & Goulden, M. L. (1994). Diurnal patterns of leaf photosynthesis, conductance and water potential at the top of a lowland rain forest canopy in Cameroon: measurements from the Radeau des Cimes. *Tree Physiology*, 14(4), 347-360. <https://doi.org/10.1093/treephys/14.4.347>

Krauss, S., Schnitzler, W. H., Grassmann, J., & Voitke, M. (2006). The influence of different electrical conductivity values in a simplified recirculating soilless system on inner and outer fruit quality characteristics of tomato. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(2), 441-448. <https://doi.org/10.1021/jf051930a>

Lara, H. A. (1999). Manejo de la solución nutritiva en la producción de tomate en hidroponía. *Terra Latinoamericana*, 17(3), 221-229.

Leonardi, C., Guichard, S., & Bertin, N. (2000). High vapour pressure deficit influences growth, transpiration and quality of tomato fruits. *Scientia Horticulturae*, 84(3-4), 285-296. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(99\)00127-2](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(99)00127-2)

Leyva, R., Constán-Aguilar, C., Blasco, B., Sánchez-Rodríguez, E., Romero, L., Soriano, T., & Ruíz, J. M. (2014). Effects of climatic control on tomato yield and nutritional quality in Mediterranean screenhouse. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94(1), 63-70. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6191>

Li, Y., Stanghellini, C., & Challa, H. (2001). Effect of electrical conductivity and transpiration on production of greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* L.).

Scientia Horticulturae, 88(1), 11-29. [https://doi.org/10.1016/s0304-4238\(00\)00190-4](https://doi.org/10.1016/s0304-4238(00)00190-4)

Lobell, D. B., & Gourdji, S. M. (2012). The influence of climate change on global crop productivity. *Plant Physiology*, 160, 1686-1697. <https://doi.org/10.1104/pp.112.208298>

Lu, N., Nukaya, T., Kamimura, T., Zhang, D., Kurimoto, I., Takagaki, M., Maruo, T., Kozai, T., & Yamori, W. (2015). Control of vapor pressure deficit (VPD) in greenhouse enhanced tomato growth and productivity during the winter season. *Scientia Horticulturae*, 197, 17-23. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.11.001>

Maas, E. V., & Hoffman, G. J. (1977). Crop salt tolerance—current assessment. *Journal of the Irrigation and Drainage division*, 103(2), 115-134. <https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0001137>

Maathuis, F. J. (2009). Physiological functions of mineral macronutrients. *Current Opinion in Plant Biology*, 12(3), 250-258. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2009.04.003>

Maggio, A., De Pascale, S., Angelino, G., Ruggiero, C., & Barbieri, G. (2004). Physiological response of tomato to saline irrigation in long-term salinized soils. *European Journal of Agronomy*, 21(2), 149-159. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(03\)00092-3](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(03)00092-3)

Manzocco, L., Foschia, M., Tomasi, N., Maifreni, M., Dalla C., L., Marino, M., Cortella, G & Cesco, S. (2011). Influence of hydroponic and soil cultivation on quality and shelf life of ready-to-eat lamb's lettuce (*Valerianella locusta* L. Laterr). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91(8), 1373-1380. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4313>

Margraf, T., Karnopp, A. R., Rosso, N. D., & Granato, D. (2015). Comparison between Folin-Ciocalteu and Prussian blue assays to estimate the total phenolic content of juices and teas using 96 well microplates. *Journal of Food Science*, 80, 2397–2403. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13077>

Martínez, J., Poyatos, R., Aguadé, D., Retana, J., & Mencuccini, M. (2014). A new look at water transport regulation in plants. *New Phytologist*, 204(1), 105-115. <https://doi.org/10.1111/nph.12912>

Moreno, R. A., Aguilar, D. J., & Luévano, G. A. (2011). Características de la agricultura protegida y su entorno en México. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 29(29), 763-774. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.114479>

Moya, C., Oyanedel, E., Vergudo, G., Flores, M. F., Urrestarazu, M., & Álvaro, J. E. (2017). Increased electrical conductivity in nutrient solution management enhances dietary and organoleptic qualities in soilless culture tomato. *HortScience*, 52(6), 868-872. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI12026-17>

- Munns, R. (2002). Comparative physiology of salt and water stress. *Plant, Cell and Environment*, 25(2), 239-250. <https://doi.org/10.1046/j.0016-8025.2001.00808.x>
- Murata, Y. (2001). Estimation and simulation of rice from climatic factors. *Agricultural Meteorology*, 4(3), 117-131.
- Naeem, M., Basit, A., Ahmad, I., Mohamed, H. I., & Wasila, H. (2020). Effect of salicylic acid and salinity stress on the performance of tomato plants. *Gesunde Pflanzen*, 72(4), 393-402. <https://doi.org/10.1007/s10343-020-00521-7>
- Patanè, C., & Cosentino, S. L. (2010). Effects of soil water deficit on yield and quality of processing tomato under a Mediterranean climate. *Agricultural Water Management*, 97(1), 131-138. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.08.021>
- Plaut, Z., Grava, A., Yehezkel, C., & Matan, E. (2004). How do salinity and water stress affect transport of water, assimilates and ions to tomato fruits? *Physiologia Plantarum*, 122(4), 429-442. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2004.00416.x>
- Pratt, L., & Ortega, J. M. (2019). *Agricultura protegida en México*. E. Nieto, & I. Braly-Cartillier (Eds.) Banco Interamericano de Desarrollo.
- Prenger, J. J., & Ling, P. P. (2001). Greenhouse Condensation Control Understanding and Using Vapor Pressure Deficit (VPD). [Fact Sheet]. AEX-804, 1-4.
- Rosales, M. A., Cervilla, L. M., Sánchez-Rodríguez, E., Rubio-Wilhelmi, M. D., Blasco, B., Ríos, J. J., & Ruiz, J. M. (2011). The effect of environmental conditions on nutritional quality of cherry tomato fruits: evaluation of two experimental Mediterranean greenhouses. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91(1), 152-162. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4166>
- Rosales, M. A., Rubio-Wilhelmi, M. M., Castellano, R., Castilla, N., Ruiz, J. M., & Romero, L. (2007). Sucrolytic activities in cherry tomato fruits in relation to temperature and solar radiation. *Scientia Horticulturae*, 113(3), 244-249. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2007.03.015>
- Ruiz, E., F. H., Marrero, L., P., Cruz, P., O., Murillo, A., B., & García, H., J. L. (2008). Influencia de los factores agroclimáticos en la productividad de albahaca (*Ocimum basilicum* L.) en una zona árida de Baja California Sur, México. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 17(1), 44-47. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93217109>
- Salas-Rivera, R., Valdez-Aguilar, L. A., Alvarado-Camarillo, D., Rascón-Alvarado, E., Peña-Ramos, F. M., & González-Fuentes, J. A. (2020). Balance potasio:calcio, relación con el déficit de presión de vapor y la radiación fotosintéticamente activa en tomate de invernadero. *Terra Latinoamericana*, 38(2), 301-311. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.589>

- Saranga, Y., Cahaner, A., Zamir, D., Marani, A., & Rudich, J. (1992). Breeding tomatoes for salt tolerance: inheritance of salt tolerance and related traits in interspecific populations. *Theoretical and Applied Genetics*, 84, 390-396. <https://doi.org/10.1007/BF00229498>
- Schlichting, C. D. (1986). The evolution of phenotypic plasticity in plants. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 17, 667-693. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.17.110186.003315>
- Schmautz, Z., Loeu, F., Liebisch, F., Graber, A., Mathis, A., Griessler-Bulc, T., & Junge, R. (2016). Tomato Productivity and Quality in Aquaponics: Comparison of Three Hydroponic Methods. *Water*, 8(11), 1-21. <https://doi.org/10.3390/w8110533>
- Schossler, T. R., Machado, D., Zuffo, A. M., Andrade, F., & Piauilino, A. (2012). Salinidade: efeitos na fisiologia e na nutrição mineral de plantas. *Enciclopédia Biosfera*, 8(15), 1563-1578.
- SIAP. (2021). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. Recuperado 11 de febrero de 2022, de <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Shamshiri, R. R., Jones, J. W., Thorp, K. R., Ahmad, D., Man, H. C., & Taheri, S. (2018). Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: a review. *International Agrophysics*, 32(2), 287-302. <https://doi.org/10.1515/intag-2017-0005>
- Sharma, N., Acharya, S., Kumar, K., Singh, N., & Chaurasia, O. P. (2018). Hydroponics as an advanced technique for vegetable. *Journal of Soil and Water Conservation*, 17(4), 364-371. <https://doi.org/10.5958/2455-7145.2018.00056.5>
- SIAP/SADER. (2021). *Superficie Agrícola Protegida*. Recuperado 9 de diciembre de 2021, de <http://www.agricultura.gob.mx/siap/superficie-agricola-protegida>
- Sinclair, T. R., Devi, J., Shekoofa, A., Choudhary, S., Sadok, W., Vadez, V., Riar, M & Rufty, T. (2017). Limited-transpiration response to high vapor pressure deficit in crop species. *Plant Science*, 260, 109-118. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2017.04.007>
- Somogyi, M. (1952). Notes on sugar determination. *Journal of Biological Chemistry*, 195, 19-23.
- Song, X., Bai, P., Ding, J., & Li, J. (2021). Effect of vapor pressure deficit on growth and water status in muskmelon and cucumber. *Plant Science*, 303, 110755. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2020.110755>
- Song, X., Miao, L., Jiao, X., Ibrahim, M., & Li, J. (2022). Regulating Vapor Pressure Deficit and Soil Moisture Improves Tomato and Cucumber Plant Growth and Water Productivity in the Greenhouse. *Horticulturae*, 8(2), 147. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8020147>

Stanghellini, C., van Meurs, W. T., Corver, F., Van Dulleman, E., & Simonse, L. (1998). Combined effect of climate and concentration of the nutrient solution on a greenhouse tomato crop. II: Yield quantity and quality. *Acta Horticulturae*, 458, 231–237. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1998.458.27>

Steiner, A. A. (1984). *The universal nutrient solution*. Proceedings 6th International Congress on Soils Culture.

Sweaf, T. D., & Steppe, K. (2010). Linking stem diameter variations to sap flow, turgor and water potential in tomato. *Functional Plant Biology*, 37(5), 429-438. <https://doi.org/10.1071/FP09233>

Tack, J., Singh, R. K., Nalley, L. L., Viraktamath, B. C., Krishnamurthy, S. L., Lyman, N., & Jagadish, K. S. (2015). High vapor pressure deficit drives salt-stress-induced rice yield losses in India. *Global Change Biology*, 21(4), 1668-1678. <https://doi.org/10.1111/gcb.12803>

Torres, C. A., Andrews, P. K., & Davies, N. M. (2006). Physiological and biochemical responses of fruit exocarp of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) mutants to natural photo-oxidative conditions. *Journal of Experimental Botany*, 57(9), 1933-1947. <https://doi.org/10.1093/jxb/erj136>

Tucci, M. L., Erismann, N. M., Machado, E. C., & Ribeiro, R. (2010). Diurnal and seasonal variation in photosynthesis of peach palms grown under subtropical conditions. *Photosynthetica*, 48(3), 421–429. <https://doi.org/10.1007/s11099-010-0055-y>

Turner, N. C., Schulze, E. D., & Gollan, T. (1984). The responses of stomata and leaf gas exchange to vapour pressure deficits and soil water content. *Oecologia*, 63(3), 338-342. <https://doi.org/10.1007/BF00390662>

Vargas-Canales, J. M., Castillo-González, A. M., Pineda-Pineda, J., Ramírez-Arias, J. A., & Avitia-García, E. (2014). Nutrient extraction of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) in mixtures of volcanic rock with fresh and recycled sawdust. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 20(1), 71-88. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2013.02.005>.

Vargas-Canales, J. M., Palacios-Rangel, M. I., Aguilar-Ávila, J., Ocampo-Ledesma, J. G., Kreimer, P., & Ortiz-Martínez, G. (2018). Innovación tecnológica en un caso de agricultura protegida en México. *Revista de Geografía Agrícola*, 61, 9-38. <https://doi.org/10.5154/r.rga.2017.61.02>

Weerakkody, W. A., Wakui, K., & Nukaya, A. (2011). Plant nutrient uptake in recirculation culture of tomato under growth stage based electrical conductivity adjustments. *Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka*, 39(2), 139-147.

- Willett, K. M., Gillett, N. P., Jones, P. D., & Thorne, P. W. (2007). Attribution of observed surface humidity changes to human influence. *Nature*, 449(7163), 710-712. <https://doi.org/10.1038/nature06207>
- Witham, F. H., Blaydes, D. F., & Devlin, R. B. (1971). *Experiments in plant physiology*. <http://ci.nii.ac.jp/ncid/BA15103179>
- Woisky, R. G., & Salatino, A. (1998). Analysis of propolis: some parameters and procedures for chemical quality control. *Journal of Apicultural Research*, 37(2), 99-105. <https://doi.org/10.1080/00218839.1998.11100961>
- Wu, M., & Kubota, C. (2008). Effects of electrical conductivity of hydroponic nutrient solution on leaf gas exchange of five greenhouse tomato cultivars. *HortTechnology*, 18(2), 271-277. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.18.2.271>
- Xiao-Cong, J., Xiao-Ming, S., Da-Long, Z., Qing-Jie, D., & Jian-Ming, L. (2019). Coordination between vapor pressure deficit and CO₂ on the regulation of photosynthesis and productivity in greenhouse tomato production. *Scientific Reports*, 9(1), 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45232-w>
- Xiong, D., Douthe, C., & Flexas, J. (2018). Differential coordination of stomatal conductance, mesophyll conductance, and leaf hydraulic conductance in response to changing light across species. *Plant, Cell & Environment*, 41(2), 436-450. <https://doi.org/10.1111/pce.13111>
- Xu, H. L., Gauthier, L., & Gosselin, A. (1995). Effects of fertigation management on growth and photosynthesis of tomato plants grown in peat, rockwool and NFT. *Scientia Horticulturae*, 63(1-2), 11-20. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(95\)00791-Q](https://doi.org/10.1016/0304-4238(95)00791-Q)
- Yang, H., & Jie, Y. (2005). Uptake and transport of calcium in plants. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 31(3), 227.
- Yu, X., Zhao, M., Wang, X., Jiao, X., Song, X., & Li, J. (2022). Reducing vapor pressure deficit improves calcium absorption by optimizing plant structure, stomatal morphology, and aquaporins in tomatoes. *Environmental and Experimental Botany*, 195, 104786. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.104786>
- Zhang, D., Du, Q., Zhang, Z., Jiao, X., Song, X., & Li, J. (2017). Vapour pressure deficit control in relation to water transport and water productivity in greenhouse tomato production during summer. *Scientific Reports*, 7(1), 1-11. <https://doi.org/10.1038/srep43461>
- Zhang, D., Zhang, Z., Li, J., Chang, Y., Du, Q., & Pan, T. (2015). Regulation of Vapor Pressure Deficit by Greenhouse Micro-Fog Systems Improved Growth and Productivity of Tomato via Enhancing Photosynthesis during Summer Season. *Plos One*, 10(7), 1-16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133919>

Zhang, J., Ding, J., Ibrahim, M., Jiao, X., Song, X., Bai, P., & Li, J. (2021). Effects of the interaction between vapor-pressure deficit and potassium on the photosynthesis system of tomato seedlings under low temperature. *Scientia Horticulturae*, 283, 110089. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110089>

Zhang, P., Senge, M., & Dai, Y. (2016). Effects of salinity stress on growth, yield, fruit quality and water use efficiency of tomato under hydroponics system. *Reviews in Agricultural Science*, 4(0), 46-55. <https://doi.org/10.7831/ras.4.46>

Zhang, Y., Liang, Y., Zhao, X., Jin, X., Hou, L., Shi, Y., & Ahammed, G. J. (2019). Silicon compensates phosphorus deficit-induced growth inhibition by improving photosynthetic capacity, antioxidant potential, and nutrient homeostasis in tomato. *Agronomy*, 9(11), 733. <https://doi.org/10.3390/agronomy9110733>