



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Química
Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos

“FISIOLOGÍA POSCOSECHA DE TOMATE (*Solanum lycopersicum*) EN RACIMO cv ‘MERLICE’ PRODUCIDO POR HIDROPONIA EN SISTEMAS ORGÁNICO Y CONVENCIONAL ALMACENADO EN AIRE Y AIRE CON ESPECIES REACTIVAS DE OXÍGENO”

Tesis

Que como parte de los requisitos para
obtener el Grado de

Maestro en Ciencias y Tecnología de Alimentos

Presenta

I.A. Cristian Esaú Jaime Sánchez

Dirigido por:

Dr. Edmundo Mateo Mercado Silva

Querétaro, Qro. a 26 de abril del 2022



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Química
Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos

“FISIOLOGÍA POSCOSECHA DE TOMATE (*Solanum lycopersicum*) EN RACIMO
cv ‘MERLICE’ PRODUCIDO POR HIDROPONIA EN SISTEMAS ORGÁNICO Y
CONVENCIONAL ALMACENADO EN AIRE Y AIRE CON ESPECIES REACTIVAS
DE OXÍGENO”

Tesis

Que como parte de los requisitos para
obtener el Grado de

Maestro en Ciencia y Tecnología de Alimentos

Presenta

I.A. Cristian Esaú Jaime Sánchez

Dirigido por:

Dr. Edmundo Mateo Mercado Silva

Dra. Dulce María Rivera Pastrana
Sinodal

Dr. Gerardo Manuel Nava Morales
Sinodal

Dra. Estela Vázquez Barrios
Sinodal

M. en C. Fernando Alonso Onofre
Sinodal

Centro Universitario, Querétaro, Qro
Fecha de aprobación por el Consejo Universitario (febrero 2022)
México

Dedicatorias

Este trabajo de investigación y tesis es dedicado a familia, especialmente a **Benito Jaime Torres**, mi padre que en paz descanse.

A ti papá, el hombre que más me amó, me apoyó en cada etapa de mi vida y me vio crecer como persona, académica y profesionalmente. Me apoyaste en todas las etapas de mi vida para cumplir mis sueños, lo menos que puedo hacer es dedicarte mis triunfos y logros.

A ti papá, mamá y hermano les dedico con todo mi corazón este esfuerzo, sin ustedes no lo hubiera logrado. Su apoyo, amor y bendiciones me dieron la motivación a continuar cada día hasta cumplir el objetivo.

Agradecimientos

En primer lugar, quisiera agradecer a mis compañeros y docentes de la maestría por ser parte de esta meta, ya que con ellos conviví y compartí experiencias, clases y buenos momentos durante 2 años. Todos, y cada uno de mis compañeros me apoyaron en momentos difíciles, me brindaron su ayuda, sus conocimientos, su amistad y sobre todo buenos valores. A los docentes, por compartirnos sus conocimientos, por la paciencia y su forma de enseñar para lograr formar maestros de calidad. En especial, quisiera agradecer a mi comité y mis compañeros del Laboratorio de Fisiología y Bioquímica Poscosecha de Frutas y Hortalizas (Lupita, Tsiseje, Esther, Alonso, Ramón, Lupita Rendón) por su apoyo y sus aportaciones que realizaron a este trabajo de investigación, y en especial al Dr. Edmundo Mateo Mercado Silva por ser mi guía, asesor y ser quién me apoyó principalmente en lograr este importante objetivo. Esta etapa me dejó importantes enseñanzas, tanto escolares, cómo personales. Conocí personas brillantes, inteligentes, capaces de lograr cualquier cosa que se propongan; personas comprometidas, responsables, honestas y sobre todo grandes seres humanos.

También, quisiera agradecer a mi familia por nunca dudar de mí y apoyarme en todo momento. A mi papá (Benito Jaime) que en paz descanse, el hombre que más me amó y apoyó antes de su partida para alcanzar todas y cada una de mis metas, mi mamá (Cristina Sánchez), mi hermano (Isaac Jaime) y todas mis primas, tías y tíos. Desde que inicié en el proceso de selección me apoyaron con las decisiones que tomé y nunca dudaron que lograría entrar a esta prestigiosa universidad y posgrado calidad. No dejaron de apoyarme con sus buenos deseos, cariño y motivación para lograr obtener este grado. Ante los momentos difíciles me demostraron ser una familia unida, capaz de afrontar la adversidad y seguir adelante.

Por último, y no menos importante quisiera agradecer a mis amigos de la CDMX por apoyarme, alegrarse por mis triunfos y estar presentes en los malos momentos. En especial, a mi mejor amigo Yobain Rivera por estar en las mejores y peores situaciones que se enfrenta uno, motivarme a ser mejor persona con sus valores y

nunca dudar de que cada uno de nosotros estamos hechos para grandes logros. El valor de la amistad es algo que conocí en estos dos años, en general a todos mis amigos por recibirme con una sonrisa y un abrazo cada que los llegaba a ver.

Conocí a grandes amigos y grandes personas, entre ellos mis mejores amigos de la maestría (Martín, Lupita, Alonso y Edelmira) con los que compartí muchas sonrisas, viajes, experiencias, y siempre estuvimos para apoyarnos personal y académicamente. Nunca olvidaré todos los momentos que pasé junto a cada uno y estoy agradecido con la vida por haberlos conocido y que actualmente formen parte de mis mejores amistades.

Esta etapa de mi vida me dejó tantas cosas buenas que no terminaría de dar las gracias a todos los que fueron parte de ello, sin embargo, hago un extenso agradecimiento a todos los que me brindaron una sonrisa, su apoyo, sus conocimientos y aportaron a cumplir este objetivo.

A todos, gracias por ser parte y estar presentes en la realización de esta tesis de investigación la cual es el reflejo del trabajo y el esfuerzo de más de 2 años, por estar presentar en la obtención de mi grado como Maestro en Ciencias y Tecnología de Alimentos.

Índice general

Dedicatorias	3
Agradecimientos.....	4
Índice general.....	6
Índice de cuadros	9
Índice de figuras.....	11
Índice de tablas	13
Abreviaturas y siglas	14
1. Introducción.....	19
2. Antecedentes	22
2.1 Importancia económica del cultivo del tomate.....	23
2.1.1 Producción mundial	23
2.1.2 Producción nacional	23
2.1.3 Mercado de exportación	24
2.1.4 Mercado nacional	24
2.2 Valor nutricional del tomate.....	25
2.2.1 Licopeno	26
2.2.2 Vitamina C	28
2.3 Sistemas de producción.....	28
2.3.1 Producción orgánica y convencional	29
2.4 Impactos de los sistemas de cultivo en la incidencia de enfermedades... 31	
2.4.1 <i>Fusarium oxysporium</i> f. sp. <i>Lycopersici</i>	31
2.4.2 <i>Clavibacter michiganensis</i> ssp. <i>michiganensis</i>	32
2.4.3 <i>Pseudomonas brassicacearum</i>	33
2.5 Impacto en la calidad y vida poscosecha de la producción orgánica y convencional.....	34

2.6	Fisiología poscosecha del fruto de tomate	35
2.7	Tratamientos poscosecha que alteran la respuesta al etileno.....	38
2.7.1	Tratamiento poscosecha de agua caliente (HWT).....	39
2.7.2	Tecnología de ultrasonido (US)	40
2.7.3	Tecnología de especies reactivas de oxígeno (Oxyion)	40
4.	Objetivos	44
4.1	Objetivo General	44
4.2	Objetivos específicos	44
5.	Materiales y Métodos empleados.....	45
5.1	Material biológico	45
5.2	Estrategia experimental.....	46
5.3	Métodos	47
5.3.1	Tasa de respiración	47
5.3.2	Porcentaje de pérdida de peso	48
5.3.3	Calidad visual (apariencia)	48
5.3.4	Firmeza.....	48
5.3.5	Color	48
5.3.6	Contenido de compuestos bioactivos	51
5.3.7	Capacidad antioxidante	53
5.4	Análisis estadístico.....	56
6.	Resultados y Discusión	56
6.1	Comportamiento fisiológico de los frutos.....	56
6.1.1	Cambios de firmeza de los frutos durante el almacenamiento.	61
6.1.2	Efectos en la tasa de respiración.....	65
6.1.3	Cambios en las propiedades fisicoquímicas de los frutos	67

6.2	Cambios en el contenido de Licopeno.	78
6.3	Cambios en el contenido de Vitamina C.	82
6.4	Cambios en la capacidad antioxidante por los métodos ABTS y DPPH ..	85
6.4.1	Capacidad antioxidante por método DPPH	85
6.4.2	Capacidad antioxidante por el método ABTS.	88
6.5	Cambios en la actividad específica de enzimas antioxidantes.....	91
6.5.1	Cambios en la actividad específica de la Superóxido Dismutasa.	91
6.5.2	Cambios en la actividad específica de catalasa.	95
4	Conclusiones.....	99
5	Referencias	101
6	117
7	Anexos	118

Índice de cuadros

Cuadro		Página
1	Gradiente de elución de la fase móvil para la determinación de Vitamina C por HPLC	52
2	Llenado de microplaca para lectura de muestras (DPPH)	53
3	Llenado de microplaca para lectura de muestras (ABTS)	55
4	Comparación de medias de pérdida de peso de tomate 'Merlice' producido en sistema hidropónico convencional y orgánico.	57
5	Vida de anaquel estimada de tomate de racimo cv 'Merlice' procedentes de invernaderos hidropónicos convencional y orgánico.	60
6	Comparación de medias de los valores de firmeza de tomate de racimo 'Merlice', producido en sistemas hidropónicos convencional y orgánico.	61
7	Comparación de medias de los SST de tomates de racimo 'Merlice' de sistemas hidropónicos convencionales u orgánicos almacenados en aire (control) o en aire + ROS (Oxyion).	68
8	Comparación de medias de la acidez titulable de tomates de racimo 'Merlice' de sistemas hidropónicos convencionales u orgánicos almacenados en aire (control) o en aire + ROS (Oxyion).	71
9	Comparación de medias del índice sabor (°Bx/acidez) de tomates de racimo 'Merlice' de sistemas hidropónicos convencionales u orgánicos almacenados en aire (control) o en aire + ROS (Oxyion).	73
10	Comparación de medias de los valores de cromaticidad (C*) en tomates de racimo cv 'Merlice' cultivado en sistema hidropónico convencional u orgánico.	76

11	Cambios en los valores de croma y ángulo de matiz de tomate de racimo cv 'Merlice' cultivados en sistemas hidropónicos convencional y orgánico.	78
12	Comparación de medias del contenido de licopeno en frutos de tomate 'Merlice' producidos por hidroponía en sistemas convencional u orgánico.	79
13	Comparación de medias del contenido de vitamina C en frutos de tomate 'Merlice' producidos por hidroponía en sistemas convencional u orgánico.	83
14	Comparación de medias de la capacidad antioxidante, por el método DPPH, de tomate de racimo cv 'Merlice' procedente de sistemas de producción hidropónico convencional y orgánico.	87
15	Comparación de medias de la capacidad antioxidante, por el método ABTS, de tomate de racimo cv 'Merlice' procedente de sistemas de producción hidropónico convencional y orgánico.	89
16	Comparación de medias de la actividad específica de la enzima superóxido dismutasa en tomate cv 'Merlice' producidos bajo invernadero hidropónico en sistemas convencional y orgánico.	93
17	Comparación de medias de las actividades específicas de catalasa de muestras de tomate cv 'Merlice' producidos en hidroponía bajos sistemas orgánico y convencional.	98

Índice de figuras

Figura		Página
1	Aspecto visual de la infección por <i>Fusarium</i> spp en fruto de tomate.	31
2	Frutos de tomate infectados por <i>Clavibacter michiganensis</i> spp. <i>Michiganensis</i> .	32
3	Ruta de biosíntesis de etileno.	37
4	Ruta para el ciclo de recuperación de metionina. Ruta principal de la biosíntesis de etileno en plantas superiores y enzimas involucradas.	38
5	Mecanismo de acción del equipo Oxyion.	42
6	Estrategia experimental seguida para evaluar los efectos del almacenamiento bajo atmósferas ricas en especies reactivas de oxígeno.	47
7	Porcentaje de pérdida de peso de frutos de tomate en racimo cv 'Merlice' cultivados en sistemas hidropónicos convencional y orgánico.	59
8	Cambios en la firmeza de frutos de tomate cv 'Merlice' cultivados en sistemas hidropónicos convencional y orgánico.	62
9	Relación de la pérdida de firmeza y pérdida de peso en tomates cv 'Merlice' procedentes de sistemas de cultivo hidropónico convencional y orgánico.	65
10	Cambios en la tasa de respiración de frutos de tomate cv 'Merlice' cultivados en sistema hidropónicos orgánico y convencional.	66
11	Cambios en el contenido de sólidos solubles totales (°Brix) de frutos de tomate cv 'Merlice' cultivados en sistema hidropónicos orgánico y convencional.	69
12	Cambios en el contenido de acidez titulable de muestras de tomate de racimo cv 'Merlice' procedentes de sistemas de cultivo hidropónico convencional y orgánico.	72

13	Cambios en el índice de sabor de muestras de tomate de racimo cv 'Merlice' procedentes de sistemas de cultivo hidropónico convencional y orgánico.	74
14	Cambios en la calidad visual general de frutos de tomate de racimo cv 'Merlice' cultivados en sistemas hidropónicos orgánico y convencional.	75
15	Cambios en el valor Chroma de racimo cv 'Merlice' procedentes de sistemas de cultivo hidropónico convencional y orgánico.	77
16	Cambios en los contenidos de licopeno en tomate de racimo cv 'Merlice' producidos en hidroponía en sistema convencional u orgánico.	81
17	Cambios en los contenidos de vitamina C en tomate de racimo cv 'Merlice' producidos en hidroponía en sistema convencional y orgánico.	85
18	Cambios en la capacidad antioxidante por el método de DPPH de tomate en racimo cv 'Merlice' cultivados bajo los sistemas hidropónicos orgánico y convencional.	88
19	Capacidad antioxidante evaluada por el método de ABTS de frutos de tomate cv 'Merlice' producidos por hidroponía en sistema orgánico y convencional.	91
20	Cambios en la actividad específica de la enzima Superóxido dismutasa (SOD) de frutos de tomate en racimo cv 'Merlice' cultivados en sistemas hidropónicos convencional y orgánico.	95
21	Cambios en la actividad específica de catalasa en frutos de tomate en racimo cv 'Merlice' cultivados en sistemas hidropónicos convencional y orgánico.	97

Índice de tablas

Tabla		Página
1	Contenido nutrimental de tomate fresco	25
2	Tratamientos poscosecha para mantener la calidad del tomate.	39

Abreviaturas y siglas

- SOD – Superóxido dismutasa y
- PAL – Fenilalanina amonio liasa
- CAT – Catalasa
- POD – Peroxidasa
- PME – Pectin metil estereasa
- ROS – Especies reactivas de oxígeno
- TPC – Contenido total de fenoles
- SST – Sólidos Solubles Totales
- ACC – 1-aminociclopropano-1-carboxilato

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD DE ESTUDIANTE:

Declaro que los datos propios obtenidos en esta investigación fueron generados durante el desarrollo de mi trabajo de tesis de forma ética y que reporto detalles necesarios para que los resultados de esta tesis sean reproducibles en eventuales investigaciones futuras. Finalmente, este manuscrito de tesis es un trabajo original en el cual se declaró y dio reconocimiento a cualquier colaboración o cita textual presentadas en el documento.

RESUMEN

El tomate es la hortaliza más cultivada y consumida a nivel mundial y México es el principal exportador. Esta dinámica comercial ha impulsado la producción nacional bajo sistemas protegidos como invernaderos y malla sombra. En 2019, el 67,8% de la producción nacional de tomate se obtuvo bajo estos sistemas. De esta producción, solamente el 1.8 % se produjo bajo el sistema de cultivo orgánico. Aunque la producción orgánica parece ser una alternativa amigable con el medio ambiente, la planta se encuentra bajo estrés nutricional que reduce su producción (15%), es más susceptible a plagas y enfermedades y tiene menor vida de anaquel que la fruta convencional. Se ha demostrado que el almacenamiento con aire y ozono tiene efectos positivos y negativos de acuerdo a las concentraciones utilizadas. No obstante, existe una tecnología que produce especies reactivas de oxígeno (ROS) en bajas concentraciones con altos márgenes de seguridad para su aplicación industrial. En el presente estudio se comparó la eficacia de la conservación con aire refrigerado (12 °C) y aire refrigerado con ROS en tomates de producción convencional y orgánica. 144 racimos (504 frutos) de tomate cv 'Merlice' de cultivo orgánico (252 frutos) y convencional (252 frutos) fueron cosechados en etapa de madurez 4, colocados en cajas de plástico, divididos en dos conjuntos de 126 frutos por cultivo y almacenados por 24 días a 12 °C; en una cámara equipada con generador de ROS Oxyion y otro conjunto similar de frutos fue almacenado en aire a la misma temperatura (almacenamiento convencional = control). Cada 6 días se tomaron 4 frutos de cada tratamiento para su análisis general inmediato y otros 4 fueron transferidas a 20 °C durante 6 días adicionales. A cada muestra se le analizó la tasa de respiración, pérdida de peso, calidad visual, color, firmeza, contenido de SST, acidez titulable, índice de sabor, contenido de licopeno, vitamina C, capacidad antioxidante (DPPH y ABTS) y actividad específica de enzimas del sistema antioxidante (SOD, Súper óxido dismutasa y catalasa). Los tratamientos no modificaron el patrón climatérico de respiración; las muestras almacenadas en aire con ROS mostraron tasas de respiración menores (12,43 ml CO₂ kg⁻¹ h⁻¹), menor pérdida de peso (2,82 %), mejor firmeza (18.2 N sistema convencional y 16.1 N sistema orgánico), mayor vida de anaquel (26 días tomate convencional y 19 días

tomate orgánico), así como mayor contenido de licopeno (19.29 mg/100 g tomate orgánico y 17.03 mg/100 g tomate convencional). Los frutos de producción orgánica mostraron mayor actividad de SOD, y catalasa que ayudó a disminuir el estrés oxidativo y permitió una mejor conservación que la observada en atmósferas de aire. Estos resultados indicaron que la conservación en atmósferas con ROS alargó 30 % la vida de anaquel del tomate de racimo 'Merlice' independientemente del sistema de producción orgánico y convencional.

Palabras clave: Tomate (*Solanum lycopersicum* L.), convencional, orgánico, calidad poscosecha, conservación en refrigeración, ROS

ABSTRACT

The tomato is the most cultivated and consumed vegetable worldwide and Mexico is the main exporter. This commercial dynamic has boosted national production under protected systems such as greenhouses and shade mesh. In 2019, 67.8% of the national tomato production was obtained under these systems. Of this production, only 1.8% was produced under the organic farming system. Although organic production seems to be a friendly alternative to the environment, the plant is under nutritional stress that reduces its production (15%), is more susceptible to pests and diseases and has a shorter shelf life than conventional fruit. Storage with air and ozone has been shown to have positive and negative effects depending on the concentrations used. However, there is a technology that produces reactive oxygen species in lower concentrations with high safety margins for industrial application. In the present study, the efficacy of preservation with refrigerated air (12 °C) and refrigerated air with ROS in conventional and organically produced tomatoes was compared. 144 bunches (504 fruits) of tomato cv 'Merlice' from organic cultivation (252 fruits) and conventional cultivation (252 fruits) were harvested at maturity 4, placed in plastic boxes and divided into two sets of 126 fruits per crop and stored for 24 hours days at 12 °C; in a chamber equipped with a generator of reactive oxygen species Oxyion and another similar set of fruits was stored in air at the same temperature (conventional storage). Every 6 days, 4 fruits of each treatment were taken for immediate general analysis and another 4 were transferred to 20 °C for 6 additional days. Each sample was analyzed for respiration rate, weight loss, visual quality, color, firmness, TSS content, titratable acidity, flavor index, lycopene content, vitamin C, antioxidant capacity (DPPH and ABTS), and specific activity. of enzymes of the antioxidant system (Superoxide dismutase and catalase). The treatments did not modify the climacteric breathing pattern; samples stored in air with reactive oxygen species showed lower respiration rates (12.43 ml CO₂ kg⁻¹ h⁻¹), less weight loss (2.82%), better firmness (18.2 N conventional and 16.1 N organic), longer shelf life (26 days conventional and 19 days organic) and higher content of lycopene (19.29 mg/100 g organic and 17.03 mg/100 g conventional). The fruits of organic production showed higher activity of superoxide dismutase and

catalase that helped to reduce oxidative stress and allowed a better conservation than that observed in air atmospheres. These results indicate that conservation in atmospheres with ROS extended the shelf life of the 'Merlice' vine tomato by 30 %, regardless of the organic and conventional production system.

Keywords: Tomato (*Solanum lycopersicum* L.), conventional, organic, postharvest quality, refrigerated conservation, ROS

1. Introducción

De acuerdo con la FAO, en el año 2018 la producción mundial de tomate alcanzó 182.3 millones de toneladas siendo la hortaliza más extensamente cultivada a nivel mundial y nacional; México ocupó el onceavo lugar con un total de 3,870,950 toneladas producidas.

El sistema de producción de tomate ha evolucionado desde los sistemas a cielo abierto hasta los sistemas de agricultura protegida en sus diferentes versiones, ya sea en malla sombra o sistemas de invernadero de alta tecnología donde se controla o se trata de controlar los requerimientos climáticos y de nutrición que el cultivo demanda. Esta evolución trajo como ventajas que la producción por unidad de superficie cultivada se elevara de 10-20 ton ha⁻¹ en el sistema a cielo abierto hasta 800 a 900 ton ha⁻¹ en los sistemas de agricultura protegida. Esta evolución también ha estado asociada al desarrollo de nuevas variedades y un uso más eficiente del agua y de los fertilizantes aplicados.

Estos sistemas de agricultura intensiva emplean grandes cantidades de fertilizantes de los cuales una alta proporción se elimina hacia el suelo creando un problema ecológico importante. Como respuesta a esta problemática, el mercado de consumo demanda productos agrícolas que no utilicen los sistemas convencionales de fertilización química creándose el mercado de productos orgánicos. Esto indujo la modificación de las reglamentaciones y su certificación para la producción y comercialización de estos productos. Este mercado, elevó sus demandas de producto que propiciaron un alza de los precios que a su vez alentó a las empresas productoras para modificar sus sistemas de producción, de manera que toda la cadena de manejo de los productos se vio beneficiada.

No obstante, toda la producción orgánica y en particular del tomate, enfrenta retos importantes no fáciles de resolver; entre ellos se señala una menor producción por unidad de superficie, un mayor riesgo de enfermedades precosecha, mayor

dificultad para el control de esas enfermedades, menor calidad visual de los productos y menor vida de anaquel.

Los estudios realizados en el Laboratorio de Fisiología y Bioquímica Poscosecha de Frutas y Hortalizas de la Universidad Autónoma de Querétaro muestran diferencias importantes en el crecimiento de las plantas de tomate orgánico como menor crecimiento entrenudos de los tallos, menor diámetro de tallo, menor longitud de las hojas, menor carga de racimos por planta, menor rendimiento y un ciclo de cultivo más corto. De igual manera, los frutos orgánicos también muestran menor densidad, menor número de cavidades locales, menor volumen y, una menor firmeza; aunque tienen mayores diámetros y mayor peso de semillas. Estos datos, muestran que el sistema de cultivo orgánico genera plantas con menor crecimiento vegetativo que afecta su rendimiento y características del fruto.

Se sabe que los insumos utilizados para el cultivo orgánico utilizan fuentes de nitrógeno, fósforo y potasio de carácter orgánico como abonos en compost o harinas de pescado entre otros. Para que estas fuentes sean transformadas a las sales inorgánicas y así ser absorbidas por la planta, el cultivo con su microbiota asociada a la raíz debe adaptarse dinámicamente. No obstante, de forma general hay déficit recurrente de nitrógeno durante el desarrollo del cultivo que provoca trastornos fisiológicos y metabólicos que llevan a menores rendimientos y mayor susceptibilidad a cualquier tipo de estrés.

Respecto de la vida de anaquel, se ha observado que el tomate orgánico adelanta su proceso de maduración desde la precosecha, lo cual induce una menor vida de anaquel en poscosecha. Esta respuesta se ha relacionado a diferentes factores, entre los cuales se ha mencionado que el sistema orgánico induce cambios en la microbiota de la raíz y que posiblemente estos se relacionen con el proceso de síntesis de etileno que modula el proceso de maduración del fruto.

Se ha señalado que la microbiota asociada a la raíz, de manera natural, tiene una estrecha relación con el desarrollo de la planta a nivel de fitohormonas que generan respuestas asociadas que benefician tanto a la planta como a la microbiota. Bajo este argumento se piensa que, en el cultivo orgánico, el control de la síntesis de

etileno está menos regulada, por un mecanismo que se desconoce, y esto lleva a un menor crecimiento, menor rendimiento y un ciclo de cultivo más corto.

En el presente estudio se compara el comportamiento fisiológico y los efectos de la conservación en atmósferas de aire y aire con especies reactivas de oxígeno (ROS) de frutos de tomate en racimo cv 'Merlice' producidos en hidroponía bajo los sistemas de producción orgánica y convencional, se evaluó la capacidad de estas atmósferas para incrementar la vida de anaquel de los frutos.

2. Antecedentes

2.1 Generalidades del cultivo del tomate

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es una planta dicotiledónea que pertenece a la familia de las Solanáceas, del género *Solanum* y especie *Solanum lycopersicum* (Hunziker, 1979). Su fruto es una baya grande de forma generalmente redonda y achatada con sabor ligeramente ácido, la baya presenta colores que varían desde ligeramente amarillos al rojo por la presencia de pigmentos como el licopeno y caroteno. Tanto el tallo como sus ramas son de consistencia herbácea, por lo que la planta no puede sostenerse por sí sola, y requiere el empleo de tutores para su sostén (SAGARPA, 2017).

El cultivo de esta hortaliza se da en zonas templadas y cálidas. La temperatura óptima para su crecimiento es de 20 a 24 °C, por lo que el clima húmedo con temperaturas altas y humedad relativa superior a 75 % son las condiciones apropiadas para su desarrollo. Para los cultivos a cielo abierto, o protegidos en malla sombra, se prefieren los suelos profundos, mullidos, con buena aireación y con adecuado contenido de materia orgánica y pH ligeramente ácido.

Los cultivos a cielo abierto deben estar protegidos de las corrientes de aire y del contacto directo de los rayos solares, la distancia de plantación es de 25 a 40 cm. En cultivo protegido, las plantas son colocadas a distancias entre 30 a 40 cm, y las hileras se colocan a una distancia de 1.2 a 1.8 m (SAGARPA, 2017).

A nivel mundial, el consumo per cápita del tomate en la década del 2007-2017 aumentó de 25.8 a 40.9 kg en China, de 8.5 a 15.4 kg en la India y de 137.4 a 151.4 kg en Turquía; mientras que en Estados Unidos y Egipto hubo una disminución de 49.9 a 37.7 kg y de 108.4 a 74.6 kg, respectivamente. Turquía e Italia son los países con mayores niveles de consumo per cápita, con 151.4 kg en Turquía, y 102.4 kg en Italia en el año del 2017. En México, el consumo per cápita es de alrededor de 13.8 kg, volumen que es inferior al consumo promedio per cápita mundial que es de 19 kilogramos (SIAP, 2020)

2.1 Importancia económica del cultivo del tomate

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es la hortaliza cultivada más importante a nivel mundial. Por año se producen aproximadamente 182.3 millones de toneladas en 4.85 millones de hectáreas (FAOSTAT; 2018).

2.1.1 Producción mundial

En la década de 2007 a 2017, de acuerdo con la información registrada en la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación (FAO), la superficie cosechada aumentó 1.4 %, teniendo 4.8 millones de hectáreas. El 57.4 % de la superficie cosechada en 2017 se concentró en cinco países: China (21.2 %), India (16.4 %), Nigeria (12.2 %), Turquía (3.9 %) y Egipto (3.8 %). México ocupó el lugar número once a nivel mundial, con una superficie cosechada de 1.9 %. La producción mundial de tomate ubicó su máximo histórico en 2017 con 182.3 millones de toneladas, de los cuales el 61% se concentró en China (32.6 %), India (11.4 %), Turquía (7.0 %), Estados Unidos (6.0%) y Egipto (4.0 %). México se ubicó en la posición nueve con 2.3 % (FIRA, 2019).

2.1.2 Producción nacional

Para el año 2020, México tuvo una producción de 3,370,826.65 toneladas, que fue 2.05 % menor que la producción alcanzada en el 2019 (3,441,639.37 toneladas). La producción se encuentra distribuida en todo el territorio nacional, aunque los estados que concentraron el 51.8 % de la producción fueron, Sinaloa (20.3 %), San Luís Potosí (11.3 %), Michoacán (7.4 %), Zacatecas (7.0 %) y Jalisco (5.8 %). (SIAP, 2021). En cuanto a los sistemas de producción, en el 2020 se registró una producción de 1,105,018.23 y 2,265,808.42 toneladas a cielo abierto y en agricultura protegida (32.8 y 67.2 %), respectivamente. Respecto de los sistemas de producción convencional y orgánico hay un amplio dominio del cultivo convencional (con fertilizantes químicos) respecto del cultivo orgánico (con fertilizantes orgánicos); en el 2020 el 95.2 % de la producción a cielo abierto fue de cultivo convencional (1,051,637.28 toneladas) y el 99.3 % de la producción total producida en sistemas protegidos se obtuvo por el sistema convencional (2,250,692.98 toneladas) (SIAP, 2020).

Las principales variedades de tomate cultivadas en México son el tomate 'Bola', tomate 'Saladette', tomate 'Pera', tomate 'Cherry', tomate 'Uva' y tomate 'Heriloon' (Mercado-Silva et al., 2002). Para el año 2021, en el país se cultivaron 2,129.06 toneladas de tomate bola orgánico, mientras que para el mismo año la variedad Saladette orgánico fueron cultivadas 51,210.88 toneladas, los cuales son las principales variedades del sistema de cultivo orgánico (SIACON, 2021). Desde el punto de vista de rendimientos, en comparación con el sistema orgánico, el sistema convencional presenta mayor rendimiento por hectárea, mayor peso y tamaño del fruto (Vinha et al., 2014)

2.1.3 Mercado de exportación

México ha sido el principal exportador de tomate; en 2017 tuvo una participación del 24% en las exportaciones totales (ITC, 2018). El principal destino de este producto es Estados Unidos, por la cercanía geográfica, competitividad en precio y calidad (SAGARPA, 2017). En el periodo 2010 a 2018, las exportaciones de tomate oscilaron en un rango de 1.4 y 1.6 millones de toneladas (SIAP, 2019).

2.1.4 Mercado nacional

El cultivo de tomate tiene una gran contribución en el valor de la producción agrícola en el país. En 2017, se ubicó en cuarto lugar con 4.3% del total, por abajo del maíz (17.1%), aguacate (6.8%) y la caña de azúcar (6.5%) (FIRA, 2019).

En 2017, la producción a cielo abierto de las variedades Saladette y bola, registró un precio de 5,500 y 4,666 pesos por tonelada, respectivamente. Mientras que el tomate de invernadero registró promedios de 7,745 y 7,412 pesos por tonelada, respectivamente. Esto indica que los precios de la producción en invernadero son 41% y 59% mayores que los de la producción a cielo abierto.

El precio del tomate en el mercado nacional tiene una marcada estacionalidad, el tomate Saladette registra los precios más altos entre septiembre y enero y los más bajos se registran entre febrero y agosto (FIRA, 2019).

2.2 Valor nutricional del tomate

Los frutos de tomate presentan un alto contenido de fibra, proteínas, potasio, vitaminas E, A, C, y licopeno. Este último tiene efectos antioxidantes, antiinflamatorios y quimioterapéuticos (Cruz et al., 2013); por su contenido de compuestos fenólicos, ácido fólico y vitamina C representa una fuente de antioxidantes naturales; además es una fuente de minerales como potasio (Barros et al., 2012; Pinela et al., 2012). Los polifenoles y carotenoides promueven la salud y son parte de una dieta nutritiva y equilibrada y han sido relacionados con propiedades anticancerígenas (Martí et al., 2016). En una porción de 100 g de fruta se encuentran los siguientes componentes:

Tabla 1. Contenido nutrimental de tomate fresco

Nutrimento/mineral	Cantidad	Unidades	Vitaminas	Cantidad	Unidades
Agua	89.79	g	Vitamina C	15.8	mg
Energía	50	Kcal	Tiamina	0.043	mg
Proteína	1.08	g	Riboflavina	0.022	mg
Lípidos	3.41	g	Niacina	0.683	mg
Carbohidratos	3.71	g	Vitamina B6	0.112	mg
Fibra dietética	1.5	g	Folato	13	µg
Azúcares totales	3.18	g	Vitamina A	62	µg
Calcio, Ca	13	mg	Retinol	13	µg
Hierro, Fe	0.33	mg	β Caroteno	522	µg
Magnesio, Mg	13	mg	α Caroteno	116	µg
Fósforo, P	29	mg	Licopeno	2,958	µg
Potasio, K	287	mg	Luteína + zeaxantina	141	µg
Sodio, Na	159	mg	Vitamina E	1.02	mg
Zinc, Zn	0.21	mg			
Cobre, Cu	0.071	mg	(Morales et al., 2015)		

El contenido de compuestos bioactivos en tomate, como de vitaminas, carotenoides y compuestos fenólicos es de gran importancia ya que su consumo ejerce efectos antiinflamatorios, antialérgicos, antimicrobianos, vasodilatadores, antitrombóticos, cardioprotectores y antioxidantes, ya que posee una amplia gama de propiedades fisiológicas (Raiola et al., 2014). Es rico en carotenoides, como el licopeno que junto con los compuestos fenólicos contribuyen al valor nutricional y mejoran atributos de calidad como el color, sabor, aroma y textura (Raiola et al., 2014; Viuda et al., 2014; Martí et al., 2016).

Por otro lado, se ha indicado que el tomate orgánico presenta concentraciones mayores de compuestos con actividad antioxidante en comparación al tomate convencional y esta condición puede estar asociada al estrés nutricional que sufre la planta durante su desarrollo (Vinha et al., 2014). Dicho estrés puede inducir la biosíntesis de licopeno, β -caroteno, fenoles y flavonoides. No obstante, distintos estudios, (Oliveira et al., 2013) también han reportado que los tomates orgánicos muestran mayor peroxidación de lípidos y actividad de las enzimas superóxido dismutasa (SOD) y fenilalanina amonio liasa (PAL), enzimas asociadas al sistema antioxidante. Por el contrario, los tomates convencionales al disponer en mayor cantidad de los nutrientes necesarios que los tomates orgánicos, el contenido de compuestos antioxidantes es menor.

2.2.1 Licopeno

El licopeno es el pigmento más importante del tomate, es el compuesto que le aporta el color rojo del fruto y por ello esta hortaliza representa una excelente fuente de este compuesto (Holden et al., 1999). A este pigmento se le han asociado efectos benéficos contra el cáncer de próstata, cáncer de mama y aterosclerosis (Gärtner et al., 1997; Stahl & Sies, 1996). Este compuesto reduce la oxidación de las lipoproteínas de baja densidad (LDL), y ayuda a reducir los niveles de colesterol en la sangre (Rao & Agarwal, 1999). A pesar de que el contenido de licopeno es relevante en frutos de tomates, este varía entre variedades (Stahl & Sies, 1996).

El licopeno es un caroteno acíclico de cadena lineal con 13 dobles enlaces, cuya fórmula molecular es $C_{40}H_{56}$. El isómero geométrico más predominante en frutas y

vegetales es el trans, el cual comprende del 94-96% del licopeno total en tomate rojo, además de ser la forma más estable termodinámicamente (Cole & Kapur, 1957a, 1957b). El contenido de licopeno en diferentes productos a base de tomate es considerado un factor de calidad, ya que se busca que a través de su procesamiento éste se mantenga en altos niveles para conservar sus propiedades, siendo el calentamiento y la exposición a la luz los principales factores responsables de la degradación por isomerización y oxidación del licopeno que afectan la calidad de los productos (Shi et al., 2008).

La biodisponibilidad del licopeno es mayor en la pasta de tomate que en tomates frescos, sin embargo, también se ha demostrado que los tomates madurados en planta (pre cosecha) contienen mayor contenido de licopeno que los que maduran en pos cosecha (Brody, 1997; Gärtner et al., 1997). También se ha comprobado que los tomates cultivados a temperaturas menores a la óptima tienen diez veces más licopeno en comparación con los cultivados comercialmente (Toma et al., 2008).

Dependiendo de la variedad y etapa de madurez en que se encuentre el fruto, el contenido de licopeno puede variar en un rango de 4.5 – 6.3 mg/100 g de materia fresca (Minoggio et al., 2003; Tonucci et al., 1995).

2.2.2 β -caroteno

Al igual que el licopeno, el β -caroteno es un carotenoide que contribuye a la calidad visual del fruto por su contribución en el del tomate. Desde el punto de vista de la nutrición humana, este compuesto es importante porque puede reducir el riesgo a padecer enfermedades como ciertos tipos de cáncer, aterosclerosis y formación de cataratas (Sandström et al., 1994; Tang et al., 2017; Weisburger, 1998). El β -caroteno constituye hasta el 7% del contenido total de carotenoides del tomate, este compuesto tiene una actividad de provitamina A, ya que el cuerpo tiene la capacidad de transformar el β -caroteno en vitamina A para efectos benéficos en la vista (Pfander, 1992).

2.2.2 Vitamina C

El tomate fresco es uno de los principales contribuyentes a la nutrición humana, ya que un tomate de tamaño promedio aporta el 40% de cantidad recomendada de vitamina C (ácido ascórbico), entre otros componentes de suma importancia (FAO, 1979).

Estudios previos han demostrado que los antioxidantes presentes en el tomate, así como su actividad antioxidante pueden variar de acuerdo a la variedad, etapa de maduración y las condiciones de crecimiento. Entre los principales componentes se encuentran los carotenoides, compuestos fenólicos y la vitamina C (ácido ascórbico); y la ingesta de estos compuestos está asociada con un menor riesgo de presentar distintos cánceres (Giovanelli et al., 1999; Giovannucci, 1999; Leonardi et al., 2000)

En un estudio realizado por Tigist et al., (2013), en el cual se analizaron distintas variedades de tomate almacenados tradicionalmente se observaron algunas variedades que a final de la maduración mostraron características más firmes y mejor calidad, sin embargo, los tomates frescos de variedades *Marglobe Improved* y *Metadel* fueron las que presentaron mayor calidad nutricional al tener el mayor contenido de vitamina C, presentando al día 20 de almacenamiento 25,0 y 23.2 mg 100g⁻¹, respectivamente.

Por otro lado, en un estudio realizado por Cantwell (2009), se demostró que tomates de variedad *Grape* almacenados a 5 °C disminuyeron la pérdida de peso, así como la síntesis de licopeno, y bajas concentraciones de vitamina C, mientras que el almacenamiento con atmósferas controladas de 3 o 10% de oxígeno y con 0, 7, 12 o 18% de dióxido de carbono no tuvieron un efecto positivo en los tomates en cuanto al contenido de compuestos antioxidantes por lo que este sistema de almacenamiento no es recomendable para tomates frescos si se busca el aumento de ácido ascórbico (vitamina C).

2.3 Sistemas de producción

La producción agrícola de tomate ha evolucionado notablemente para incrementar la productividad y el control de plagas y enfermedades así como tener un producto

de alta calidad que satisfaga las expectativas de comercializadores y el consumidor (Stolz et al., 2011).

Dentro de los sistemas de producción, existe la producción tradicional a cielo abierto y la producción de cultivo protegido ya sea en invernadero o malla sombra que ofrecen algunas ventajas sobre el primero; principalmente porque brinda protección al cultivo de vientos o lluvias que puedan dañar tanto a la planta como a los frutos. También, se tiene un control de temperatura, esto es importante debido a que, en comparación al sistema de cielo abierto, esta cambia dependiendo la hora del día y estación del año. Además, disminuye los efectos de plagas, tales como mosquita blanca y trips, incluso algunos roedores. La principal ventaja es que con este sistema de producción se pueden obtener frutos fuera de temporada, es decir, en cualquier mes del año. En octubre del 2019, la SIAP reportó una cosecha de 16,161 hectáreas y un rendimiento de 46 ton/ha para el sistema a cielo abierto, mientras que para esta misma estación se reportó una superficie de 22,183 hectáreas y un rendimiento de 63 ton/ha para el sistema de invernadero.

2.3.1 Producción orgánica y convencional

Además de pretender mayores rendimientos, alternativamente los mercados de consumo han presionado a los sistemas de producción en el empleo de sistemas que sean sustentables con el medio ambiente; generándose los sistemas de producción orgánicos donde no se emplean fertilizantes químicos, ni herbicidas, plaguicidas o fungicidas para el control de plagas y enfermedades. De esta forma, la agricultura orgánica ha tenido un crecimiento debido a que los consumidores consideran que estos productos no afectan negativamente el ambiente (Dreezens et al., 2005).

A nivel mundial, 69.8 millones de hectáreas fueron cultivadas de manera orgánica a finales de 2017; Australia presentó la mayor área de agricultura orgánica (35.6 millones de hectáreas), seguida de Argentina (3.4 millones de hectáreas) y China (3 millones de hectáreas). Actualmente, Europa muestra una tendencia positiva, con 14,6 millones de hectáreas de suelo dedicadas actualmente a la producción orgánica. (FiBL & IFOAM, 2019).

En América Latina en el año 2017, había registrados 460,000 productores con sistema orgánico. Los países con mayores registros fueron; México (210,000), Perú (87,000), y Paraguay (58,000); en México, se tenían 673,968 hectáreas dedicadas a este sistema de producción (FiBL & IFOAM, 2019).

No obstante, la producción de tomate orgánico ocupa diez veces menos superficie que la utilizada por el sistema convencional, pero el precio alcanza una cotización diez veces mayor que éste último (de la Cruz et al., 2009).

La fertilización de estos productos orgánicos necesita técnicas adecuadas, por lo que se usan abonos orgánicos, abonos verdes, fijación natural de nutrientes, incorporación de materia orgánica a través de estiércol, compost de desechos agrícolas y subproductos de origen animal. La certificación orgánica lleva un tiempo de transición de 3 a 5 años sin aplicaciones de productos sintéticos al suelo, por lo que el uso de sustrato orgánico reduce este tiempo de transición o incluso puede evitarlo, además el sustrato deberá aportar elementos nutritivos que satisfagan el cultivo. (Márquez et al., 2006).

Por otro lado, el cultivo de tomate convencional en invernadero es una tecnología de gran avance para la agricultura, debido a que se pueden seguir teniendo cultivos fuera de temporada con alta productividad. Esta tecnología protege al cultivo de las severidades del clima y las condiciones de lluvia o viento (Dannehl et al., 2014), lo que disminuye considerablemente los efectos de plagas como mosquita blanca, trips, minador de la hoja, entre otros (Hanafi, 2003).

El cultivo orgánico agroecológico es una alternativa importante para suplir los fertilizantes químicos y suministrar los nutrientes necesarios para el desarrollo y crecimiento de la planta, así como mejorar las propiedades físicas y químicas del suelo es la aplicación de material orgánica, como estiércol y fertilizantes verdes. (Aranda et al., 2015).

Existen países y regiones en el país en los que no es factible el cultivo al aire libre debido a las temperaturas frías, por lo que las producciones a base de invernadero han resultado una alternativa eficiente. Sin embargo, este sistema demanda un

buen control del microclima, como temperatura, humedad relativa, concentración CO₂ y una adecuada iluminación (Ntinis et al., 2017; Tringovska et al., 2015).

2.4 Impactos de los sistemas de cultivo en la incidencia de enfermedades

2.4.1 *Fusarium oxysporium* f. sp. *Lycopersici*

Fusarium spp. (Figura 1) es un hongo saprófito, es decir, que para obtener la energía necesaria para su desarrollo requiere de materia orgánica en descomposición por lo que abunda en el suelo. Algunas cepas de este microorganismo causan marchitez vascular y su contorno, así como pudrición de la raíz (Olivain & Alabouvette, 1999). *Fusarium oxysporium* f. sp. *lycopersici*, reduce significativamente la producción de tomate, ya que tiene la capacidad de destruir la raíz en etapa de crecimiento (Khan et al., 2007). En la actualidad, el método más efectivo para la prevención del marchitamiento causado por *Fusarium* consiste en el tratamiento de la semilla con fungicidas químicos; sin embargo, esto nos conlleva a otro problema, como el daño a microorganismos beneficiosos presentes en el suelo (Lewis et al., 1996). Este microorganismo también puede afectar a calidad de los frutos en poscosecha como se muestra en le Figura 1.

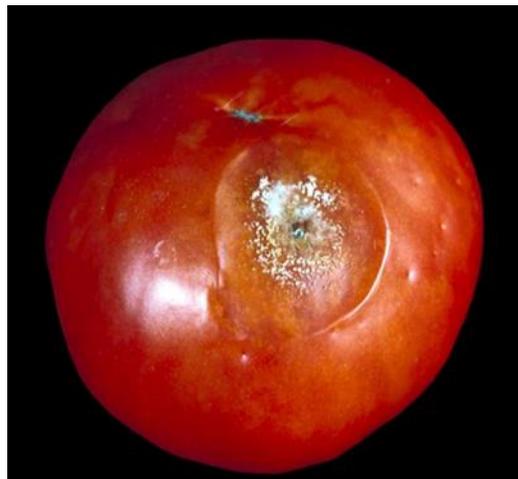


Figura 1. Aspecto visual de la infección por *Fusarium* spp en fruto de tomate.
Foto: Don Edwards (UC Davis)

El etileno tiene un papel fundamental en la defensa de las plantas al ataque de patógenos. Se han realizado investigaciones acerca de la participación del etileno

mediante el análisis de expresión de genes marcadores después de ser infectados por *Fusarium oxysporium* f. sp. *lycopersici*; los resultados mostraron que el etileno es un regulador positivo a la susceptibilidad del microorganismo, así como las vías de señalización del etileno y el ácido salicílico actúan de manera sinérgica, ya que para la inducción de un gen de etileno se requiere la vía de ácido salicílico intacta, y viceversa (Di et al., 2017).

2.4.2 *Clavibacter michiganensis* ssp. *michiganensis*

Clavibacter michiganensis ssp. *michiganensis* (*Cmm*) es una bacteria Gram (+) no móvil causante de una de las enfermedades más destructivas de las plantas de tomate; invade y prolifera en el xilema a través de heridas naturales o aberturas, provocando el oscurecimiento del tejido vascular interno y su degradación, por lo que se afecta el transporte de agua y conducen a la marchitez temprana durante las primeras etapas de la infección (Eichenlaub & Gartemann, 2011) finalmente provocando cáncer en el fruto (Figura 2)



Figura 2. Frutos de tomate infectados por *Clavibacter michiganensis* ssp. *Michiganensis*. Foto: Atlas Plant Pathogenic Bacteria

Los factores de virulencia involucrados en la enfermedad son proteasas de serina, y enzimas que degradan la pared celular (celulasas, xilanasas, pectinasas), entre otras.

Los síntomas que presenta la planta dependen de la edad, la susceptibilidad del cultivo, así como la virulencia de *Cmm* (Gleason et al., 1993); también influyen las condiciones ambientales, como la temperatura y la humedad. Las plantas jóvenes que están en las primeras etapas de su vida, desarrollan infecciones sistémicas

(infecciones primarias) que afectan la calidad, rendimiento y, generalmente llevan a la muerte de la planta; mientras que las plantas de mayor edad desarrollan infecciones foliares (infecciones secundarias), que causan clorosis de las hojas, y pueden o no afectar la calidad y rendimiento del cultivo y el fruto (de León et al., 2011).

La expresión de genes en respuesta a la infección sugiere que están relacionados como una respuesta de defensa al ataque del patógeno (Nandi et al., 2018).

En 2008, se investigaron las respuestas de la planta a la interacción del microorganismo y el huésped. De los 9,254 genes presentes en la matriz del tomate, 122 se expresaron diferencialmente tras haber infectado las plantas con *Cmm*. Lo que demostró una inducción de genes relaciones con la defensa, producción y eliminación de radicales libres de oxígeno (ROS), mejora de la renovación de proteínas y síntesis de hormonas. Esos trabajos demostraron que la infección induce un subconjunto de genes involucrados en la biosíntesis y respuestas de etileno. Los resultados mostraron que el etileno del huésped desempeña un papel relevante en la regulación de la respuesta susceptible al *Cmm* (Balaji et al., 2008).

2.4.3 *Pseudomonas brassicacearum*

Este microorganismo se encuentra dentro de las rizobacterias que promueven el crecimiento de las plantas (PGPB), esto lo hace debido a que genera la enzima que degrada el 1-amino-ciclo-propano (ACC), la 1-aminociclopropano-1-carboxilato (ACC) desaminasa (Glick et al., 1995; Belimov et al., 2005). Estas bacterias actúan degradando el ACC a amonio para el aprovechamiento como fuente de carbono y de nitrógeno. El equilibrio entre la concentración de ACC entre la raíz, rizosfera y la bacteria es constante, por lo que la absorción bacteriana de ACC rizosférico estimula el flujo de salida de ACC de la planta, disminuyendo de esta forma la concentración de ACC y consecuentemente la síntesis de etileno en la raíz y promoviendo el crecimiento de esta (Glick et al., 1998)

Existen bacterias fitopatógenas productoras de toxinas, entre ellas se encuentran las *Pseudomonas*, las cuales aumentan la acumulación de ACC y evolución del etileno en plantas infectadas (Pegg & Cronshaw, 1976; Dutta & Biggs, 1991; Kenyon

& Turner, 1992). Por su parte, *Pseudomonas brassicacearum* Am3 se encarga de contrarrestar los efectos fitotóxicos por su actividad ACC desaminasa, además de caracterizarse por no producir etileno y auxinas (Belimov et al., 2001).

Las interacciones entre planta y *Pseudomonas* varían de acuerdo con la variedad de tomate, ya que algunas son promotoras de crecimiento, otras son saprófitas, o nocivas y fitopatógenas, por lo que se complica distinguir entre las que causan beneficio y las que son perjudiciales. Particularmente *Pseudomonas brassicacearum* Am3 es una cepa que tiene efecto promotor de crecimiento, pero es fitopatógeno durante el crecimiento de la planta dependiendo de la cantidad de microorganismos y las condiciones ambientales presentes (Belimov et al., 2001).

2.5 Impacto en la calidad y vida poscosecha de la producción orgánica y convencional

Existen diferentes factores para definir la calidad de frutos de tomate, aunque el tamaño no se considera un factor de calidad de grado puede influir en las expectativas de la calidad comercial. La calidad se basa principalmente en la uniformidad de la forma (redondo, bola, roma, entre otros), el color uniforme (rojo anaranjado a rojo intenso), la apariencia (ausencia de fisuras, quemaduras por frío o calor, lesiones por insectos y lesiones mecánicas), la firmeza (no es suave y no se deforma con facilidad) y la ausencia de defectos (Suslow & Cantwell, 1997).

La calidad y la biosíntesis de metabolitos se ven afectados por diferentes condiciones a las que se enfrentan los cultivos, ya que enfrentan condiciones de estrés por escasez de recursos hídricos y la salinidad del suelo (Diouf et al., 2018).

Un estudio realizado por Vinha et al. (2014), demostró el efecto de los distintos sistemas de cultivo sobre parámetros fisicoquímicos como contenido de compuestos bioactivos y los atributos sensoriales. La humedad, que influye en la textura, sabor y apariencia no tuvo diferencias significativas entre ambos tipos de tomate, sin embargo, existió un aumento del pH en tomate orgánico, el cual influye en el sabor, vida de anaquel y es un parámetro de calidad, ya que puede estar relacionado con la mayor concentración de ácidos orgánicos (cítrico y málico) en la pulpa. Respecto a la actividad de agua (A_w), la cual es una variable importante para

contaminación bacteriana, no se presentaron diferencias al tener una actividad de agua de 0.96 ± 0.01 ; por otro lado, los sólidos solubles totales están relacionados con el sabor, como contenido de azúcares, y acidez; los tomates orgánicos presentaron mayor valor de °Brix, 3.90), mientras que los tomates convencionales mostraron valores de 3.21 °Brix.

El contenido de licopeno fue 20% mayor que el del tomate convencional, mientras que la vitamina C superó el 30%; finalmente, respecto al contenido de fenoles totales y flavonoides se demostró un aumento del 24% y 21%, respectivamente. En el caso del tomate convencional, la concentración del licopeno se concentró en la pulpa, mientras que, en los frutos orgánicos los altos niveles de compuestos bioactivos se concentraron en la piel y semillas. Además, el análisis sensorial que se llevó a cabo, indicó que el sistema de cultivo orgánico mejora las propiedades gustativas de los frutos, ya que está fuertemente relacionado con el contenido de sólidos solubles totales.

2.6 Fisiología poscosecha del fruto de tomate

De manera general, todos los frutos pueden dividirse en dos grupos de acuerdo con su mecanismo regulatorio de maduración; climatéricos y no climatéricos. En los climatéricos la maduración se acompaña de un pico en la respiración y una explosión concomitante de etileno; mientras que los no climatérico no muestra cambios dramáticos en la respiración y la síntesis de etileno se mantiene en niveles bajos. Se ha comprobado que el etileno afecta la transcripción y traducción de genes relacionados con la maduración (Gray et al., 1994; Deikman, 1997; Giovannoni, 2001). El fruto de tomate es un fruto climatérico, se caracteriza por una maduración asociada al incremento en la respiración y a la síntesis de etileno por lo que es necesario la presencia de esta hormona para la maduración normal del fruto (Oeller et al., 1991; Picton et al., 1993; Theologis et al., 1993; Pua & Davey, 2010).

La madurez del fruto inicia en una región, para posteriormente extenderse a las regiones vecinas a medida que el etileno se difunde desde célula a célula, integrando de esta forma el proceso de maduración. A medida que la maduración avanza, se presentan cambios en el color, el cual cambia de verde a rojo conforme

los cloroplastos se transforman en cromoplastos, la clorofila se degrada y los carotenoides se acumulan. Muchos componentes de las rutas bioquímicas involucradas en la pigmentación, metabolismo de carbohidratos, biosíntesis de etileno, metabolismo de pared celular y transducción de señales han sido identificadas en plantas transgénicas para conocer su expresión durante el desarrollo y maduración. Los cambios de textura en el fruto, como el ablandamiento ocurre a medida que la pared celular se modifica, así como se desarrollan compuestos volátiles específicos del sabor (Ciardi & Klee, 2001; Deikman, 1997; Giovannoni, 2001; Gray et al., 1994). El etileno tiene una importante participación en respuesta a heridas y a patógenos presentes, así como en la senescencia foliar y a las respuestas al estrés abiótico y biótico (Gazzarrini & McCourt, 2001).

Se han definido dos sistemas de síntesis del etileno, el sistema S1 representa el etileno basal en frutos inmaduros y está regulado de manera autoinhibitoria; mientras que el sistema S2 representa el aumento en la síntesis de etileno asociado con la maduración de los frutos y senescencia de las flores, y éste está regulado de forma auto catalítica (Hiwasa et al., 2003; Nakatsuka et al., 1998).

Se ha demostrado que el etileno es producido por todas las partes de las plantas superiores, siendo un regulador de procesos vegetales, tales como la germinación de semillas, respuesta a heridas y senescencia (Lieberman, 1979; Fluhr et al., 1996; Alexander & Grierson, 2002). Ishida (2000) descubrió que, en el fruto de tomate intacto, en la parte ovular (fruta menos cáliz) y en los cálices aislados de maduración, se producen incrementos de síntesis de etileno en la maduración y el cambio de color verde a rojo, y también en fases anteriores del desarrollo del fruto.

La ruta de biosíntesis del etileno (Figura 3) fue dilucidada en una serie de estudios, en los cuales se determinó que el precursor del etileno es el aminoácido metionina, que se convierte en S-adenil-metionina (AdoMet) por la enzima AdoMet sintetasa. Posteriormente, el AdoMet actúa como un intermediario con otras vías biosintéticas, como la producción de poliaminas. La enzima ACC sintasa, es la encargada de convertir al AdoMet en ácido 1-aminociclopropano-1-carboxílico (ACC) (Adams & Yang, 1979). El siguiente y último paso en la ruta es la conversión de ACC en

etileno, el cuál es catalizado por la enzima ACC oxidasa (ACO), que anteriormente llevaba por nombre la enzima formadora de etileno y desempeña un importante papel regulador de la síntesis de etileno cuando la producción de etileno tiene niveles altos (Barry et al., 1996; Holdsworth et al., 1988; Nadeau et al., 1993).

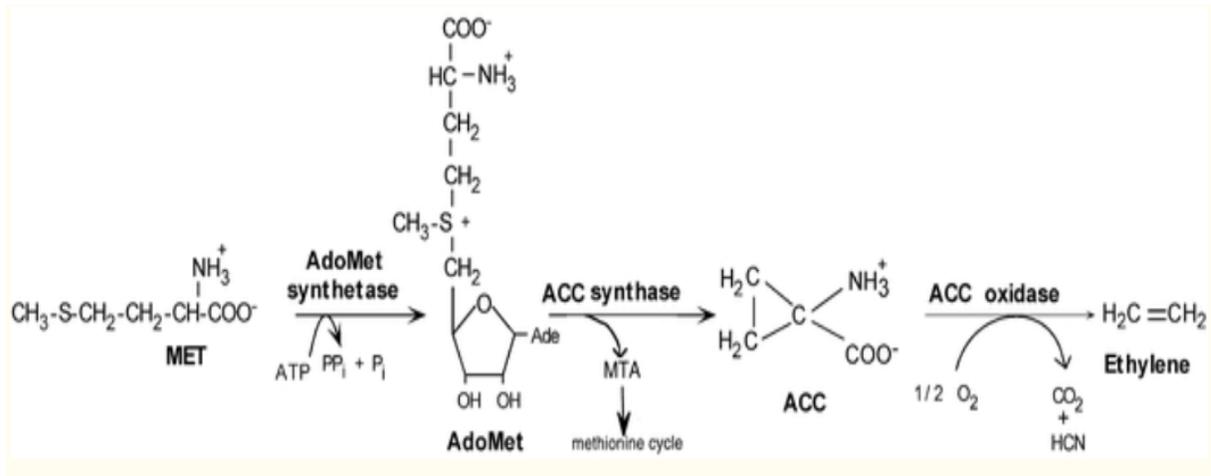


Figura 3. Ruta de biosíntesis de etileno

Los genes que codifican las enzimas presentes en la biosíntesis de etileno pertenecen a la familia multigénica y su expresión está regulada por distintas señales de desarrollo, ambientales y hormonales; así como los reguladores de la velocidad de esta ruta son las enzimas ACC sintasa y ACC oxidasa (Fluhr et al., 1996). La enzima ACC sintasa, además de producir la ACC también produce 5-metiltiotenosina, la cual sirve para producir una nueva metionina a través del ciclo de regeneración de la metionina. La ruta del ciclo de metionina (Figura 4) puede mantener altas tasas de biosíntesis de etileno, esto debido a que es una vía de recuperación y cada ciclo se realiza con una molécula de ATP. La metionina genera altas tasas de etileno, ya que al ser reciclada en el ciclo de “Yang” produce esta importante fitohormona sin la necesidad de altos niveles de metionina intracelular (Montgomery et al., 1993; Zegzouti et al., 1999).

La fitohormona vegetal etileno, como se ha mencionado anteriormente, está relacionada con el inicio de la maduración del fruto, cuando los frutos son expuestos a etileno exógeno el inicio de la maduración se acelera, y al eliminar o inhibir los sitios específicos de biosíntesis de etileno se retarda la maduración. Por lo que se

asocia que el mecanismo de acción del etileno está controlado por la expresión de genes específicos. Se ha demostrado con anterioridad que la expresión de genes en el tomate durante el desarrollo coincide con el aumento endógeno de niveles de etileno, por lo que los niveles basales de etileno están relacionados con la regulación de expresión génica.

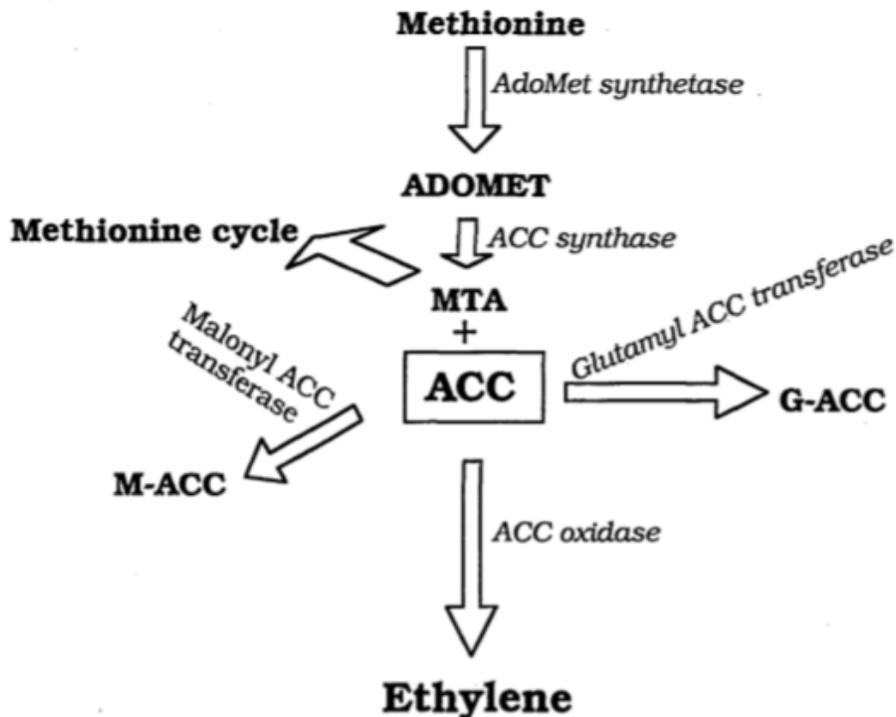


Figura 4. Ruta para el ciclo de recuperación de metionina. Ruta principal de la biosíntesis de etileno en plantas superiores y enzimas involucradas

2.7 Tratamientos poscosecha que alteran la respuesta al etileno

Con el paso del tiempo tanto productores, distribuidores e industrias han buscado alternativas poscosecha para la extensión de vida útil de los productos hortofrutícolas (Tabla 2). Dentro de éstas últimas, se han estudiado el tratamiento de agua caliente (HWT por sus siglas en inglés) para el control de invasión de insectos, crecimiento microbiano y retraso de maduración del fruto a temperaturas extremas de almacenamiento (Fallik, 2004; Soto et al., 2004). Por otro lado, se ha estudiado sinergia de los tratamiento con cloro y la tecnología de ultrasonido como

una alternativa prometedora para la descontaminación y conservación de frutas y verduras frescas (Chen & Zhu, 2011; Huang et al., 2006; Seymour et al., 2002).

Tabla 2. Tratamientos poscosecha para mantener la calidad del tomate.

Agua caliente (HWT)	Atmósferas modificadas (MAP)
Ultrasonido	Metilciclopropeno (MCP)
Termosonicación	Cloruro de Calcio
Oxyion (Especies Reactivas de Oxígeno)	Refrigeración

2.7.1 Tratamiento poscosecha de agua caliente (HWT)

El objetivo de la aplicación de tratamientos térmicos con agua (HWT) a frutos frescos es la desinfección y promover cambios en las rutas bioquímicas involucradas en la maduración del fruto para alargar la vida de almacenamiento y la calidad poscosecha (Pinheiro et al., 2012). El tratamiento consiste en sumergir los frutos en agua caliente a diferentes temperaturas que pueden variar de 40 a 60 °C durante diferentes periodos de tiempo (2 a 60 min) para posteriormente evaluar diferentes aspectos de calidad físicos, químicos y microbiológicos. Principalmente el color y la firmeza, así como la actividad de la enzima peroxidasa (POD), actividad de la enzima pectinmetilesterasa (PME), el contenido fenólico total (TPC) y carga microbiana. Los tratamientos térmicos con temperaturas bajas (40-50 °C) mantienen la firmeza del fruto en comparación con el fruto no tratado térmicamente, mientras que temperaturas por arriba de los 55 °C afecta significativamente la firmeza (Fallik, 2004; Pinheiro et al., 2012). Los tratamientos térmicos afectan las actividades enzimáticas, aumentando su actividad en la POD y disminuyendo la PME. El tratamiento aumenta aproximadamente un 27% el contenido fenólico total y promueve la reducción de microorganismos en niveles indetectables. Todas estas características hacen del HWT un tratamiento efectivo para el control del desarrollo microbiano en frutos de tomate. Este tratamiento poscosecha es una alternativa para mejorar la calidad del fruto y alargar la vida útil (Pinheiro et al., 2012). Así como en el tomate es un tratamiento de beneficio, también los es para retrasar el

ablandamiento durante el almacenamiento de frutas enteras como el plátano “Kluai Khai” y fresas frescas (Dotto et al., 2011; Varit & Songsin, 2011).

2.7.2 Tecnología de ultrasonido (US)

Esta tecnología tiene como objetivo la descontaminación y conservación de frutas y verduras. El mecanismo de acción del ultrasonido se basa en someter un líquido a tratamiento ultrasónico y acústico, el cual crean cavitaciones (múltiples burbujas) que a la hora de implosionar destruyen las membranas de los microorganismos, estas implosiones crean cambios en la presión y temperatura. Esta tecnología no es térmica, lo que es de beneficio para los alimentos sensibles al calor, así como a los aspectos nutricionales, sensoriales y funcionales en productos frescos y procesados (Seymour et al., 2002; D’Amico et al., 2006; Huang et al., 2006; Chen & Zhu, 2011). Estudios han demostrado que las condiciones óptimas de esta tecnología aplicada en fresa son 250 W de potencia ultrasónica con un tiempo de 9.8 min, retrasando la descomposición de la fruta y la carga microbiana (Cao et al., 2010), así como en el kiwi mínimamente procesado donde disminuye de tasa de respiración (Meng et al., 2014).

2.7.3 Tecnología de especies reactivas de oxígeno (Oxyion)

Una tecnología innovadora es el tratamiento con especies reactivas de oxígeno (ROS) conocido comercialmente como Oxyion, la cual consiste en una cámara almacenamiento con la estabilización de ROS, con el objetivo de tener un control sobre los efectos del etileno para el retraso de la maduración, control de la reducción de deshidratación y control microbiológico para tener menor pudrición (hongos y bacterias).

Las ROS son moléculas de oxígeno, superóxido, peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y radicales hidroxilos, las cuales tienen función bimodal y son las que sustentan el desarrollo de las plantas y las respuestas al medio ambiente. En bajos niveles (25 % de poder), las ROS tienen la función de ser moléculas de señalización; mientras que cuando se encuentran en altos niveles (75 %) son una característica de condiciones de estrés. Los altos niveles de ROS pueden alterar el metabolismo celular, ya que tienen la capacidad de reaccionar con otras moléculas biológicas

presentes tales como proteínas, lípidos, azúcares y ácidos nucleicos. La generación de ROS es llevada por numerosas vías presentes en las plantas, estos oxidantes, así como los compuestos bioactivos están relacionados con la función y desarrollo de la planta. Se ha establecido que la comunicación subcelular es dependiente de las ROS, así como algunas funciones de señalización de las plantas (Noctor et al., 2017).

La producción de estos compuestos y la inducción del estrés oxidativo se señaló como una reacción que tiene la planta al estar en diferentes condiciones de estrés como la temperatura, salinidad, sequía, metales pesados, entre otros contaminantes (Kreslavski et al., 2012). Las ROS actúan como moléculas de señalización en la regulación de todas las fases, desde la germinación de la semilla, formación de la semilla, maduración de fruta, senescencia o muerte de la planta (Gapper & Dolan, 2006).

Se ha documentado que las atmósferas ricas en ROS tienen la capacidad de aumentar la vida de anaquel de distintas frutas y hortalizas al inhibir la acción de bacterias, hongos y virus en los productos almacenados. Adicionalmente la presencia de moléculas como radical superóxido ($O_2\bullet$) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2) causan estrés en los frutos, lo cual induce la producción de compuestos con actividad antioxidante (Xu et al., 2017). Se sugiere que el tratamiento de frutos de tomates convencionales en atmósferas de bajo ozono y alto contenido de ROS podrá inducir cambios en la calidad (color más uniforme e intenso) en los frutos. Es posible que bajo estas condiciones de manejo se induzca un estrés oxidativo que tendrá un impacto positivo en el contenido de compuestos bioactivos (vitamina C, licopeno y carotenoides). Sin embargo, la concentración de ROS y temperatura óptima de almacenamiento para incrementar los compuestos antioxidantes presentes en tomate se desconocen. Por lo cual, resulta interesante desarrollar un proceso tecnológico poscosecha que eleve el contenido de compuestos bioactivos en dicho fruto. Esto permitirá dar un valor agregado a los sistemas de almacenamiento y a su vez a la producción de tomate convencional y orgánico.

La tecnología de ROS Oxyion (Figura 5), consiste en tomar aire del ambiente el cual pasa por un arco eléctrico para generar aire procesado de una combinación de oxígeno reactivo, neutraliza la contaminación en superficies y aire, lo cual también puede contribuir a la desinfección de frutos, así como generar estrés en los frutos almacenados bajo estas condiciones. (Oxyion, 2018).



Figura 5. Mecanismo de acción del equipo Oxyion

Los antecedentes anteriores señalan que la producción de tomate en México es de gran importancia a nivel nacional y para el mercado de exportación. No obstante, su cultivo está siendo orientado hacia la producción en sistemas protegidos como malla sombra e invernaderos; y finalmente se hacen esfuerzos para su producción orgánica, aunque se continúan presentando problemas de enfermedades en la producción y una menor vida de anaquel de los frutos de cultivo orgánico.

El presente estudio pretende evaluar y comparar los efectos de la aplicación de atmósferas ricas en ROS en la conservación de frutos de tomate de racimo cv 'Merlice' a través de los cambios de atributos de calidad como calidad visual, firmeza, composición físico química, su capacidad antioxidante, el contenido de compuestos bioactivos y sus respuestas en el sistema antioxidante; a efecto de establecer el potencial de uso de esta tecnología en la conservación de este fruto.

3. Justificación

La producción de tomate en México señala que es la principal hortaliza que se cultiva en el país, sus sistemas de producción han evolucionado desde los sistemas a cielo abierto hasta los sistemas de agricultura protegida como malla sombra e invernadero donde actualmente se produce alrededor del 65 % de la producción nacional de este fruto. Bajo estos sistemas de agricultura protegida se aplican sistemas de cultivo en hidroponía convencional (con aplicaciones de fertilizantes químicos y diferentes agroquímicos) y orgánica. Los frutos orgánicos generados por estos sistemas muestran vidas de anaquel menores (30 a 40%) respecto de los tomates convencionales. El presente trabajo aporta información tecnológica respecto de los efectos del uso de atmosferas ricas en ROS para ampliar la vida poscosecha de los frutos de tomate y mostrar sus posibilidades de uso dentro del actual sistema de manejo pos cosecha de este producto

4. Objetivos

4.1 Objetivo General

- Evaluar los efectos de la aplicación de atmósferas ricas en especies reactivas de oxígeno en la fisiología, calidad visual, calidad fisicoquímica y bioquímica de frutos de tomate de racimo cultivados en sistemas hidropónicos convencional y orgánico, así como el efecto que tienen estas en la actividad enzimática, capacidad antioxidante y síntesis de compuestos bioactivos.

4.2 Objetivos específicos

- Evaluar el efecto de las atmósferas ricas en especies reactivas de oxígeno en la tasa de respiración y pérdida de peso en frutos de tomate de racimo cv 'Merlice' producidos bajo sistemas hidropónicos convencional y orgánico.
- Evaluar el efecto de la conservación en atmósferas ricas en especies reactivas de oxígeno en la calidad fisicoquímica y contenido de vitamina C y licopeno de tomate de racimo cultivados en sistemas hidropónicos convencional y orgánico.
- Evaluar los efectos del almacenamiento en atmósferas ricas en especies reactivas de oxígeno en la actividad enzimática de catalasa y superóxido dismutasa y la capacidad antioxidante en tomate de racimo de ambos sistemas de cultivo.
- Evaluar de forma general las ventajas y desventajas de la conservación en atmósferas ricas en especies reactivas de oxígeno en tomate hidropónico convencional y orgánico

5. Materiales y Métodos empleados

5.1 Material biológico

Los frutos de tomate (*Solanum lycopersicum* cv. Merlice) utilizados en esta investigación procedían de dos invernaderos con sistema hidropónico, uno destinado a la producción orgánica y otro a la producción convencional, proporcionados por la unidad de producción comercial de tomate del Centro Universitario CEICKOR® ubicado el municipio de Colón, Querétaro. La variedad 'Merlice' se destina a la producción de tomate en racimo con 5 frutos por racimo. El estado de madurez en la cosecha se elige por el desarrollo de color rojo, en este caso fueron usados los tomates en estado de madurez 3 y 4 de acuerdo a la carta de color de madurez para la cosecha de tomate.

Las condiciones de desarrollo de plantas de tomate dentro de los invernaderos fueron las condiciones estándar de manejo de invernaderos con cubiertas de plástico y ciclos de iluminación natural de 16 h día/8 h noche con una acumulación de radiación luminosa de 1500 – 2500 Joules/m²s a lo largo de la temporada y un flujo de luz 250 µmol/m²s; un rango de temperatura de 25 °C/18 °C día/noche, 90% máximo de humedad.

Las plantas de la variedad 'Merlice' fueron injertadas sobre un portainjerto de la variedad MAXIFORT; ambas generadas a partir de semillas adquiridas de la productora de semilla De Ruitter Seed (Bayer). La planta de producción convencional se condujo en sistema de doble tallo, mientras que la del cultivo orgánico se condujo a un solo tallo.

Los experimentos se realizaron con 24 cajas (12 de sistema orgánico y 12 de sistema convencional), cada caja contenía 6 racimos de tomate y posterior a la selección fueron utilizados un total de 252 frutos de cultivo orgánico y 252 frutos de cultivo convencional en el estado de madurez arriba indicado. Los frutos fueron transportados al Laboratorio de Fisiología y Bioquímica Pos cosecha de Frutas y Hortalizas de la Facultad de Química de la Universidad Autónoma de Querétaro; almacenados durante 24 h a 12 °C para su posterior selección y distribución de tratamientos de acuerdo a la estrategia experimental establecida (Figura 6).

5.2 Estrategia experimental

El procedimiento general realizado durante el estudio se resume en la Figura 6. El total de frutos fue seleccionado en cuanto a sus características de estado de madurez, calidad visual (color y libre de defectos) para cada uno de los tratamientos a estudiar.

Ciento cuarenta y cuatro racimos de tomate cv 'Merlice' (512 frutos) procedentes de un invernadero hidropónico de cultivo convencional (252 frutos) y de otro invernadero de cultivo orgánico (252 frutos) fueron cosechados cuando alcanzaron el estado de madurez 4 (fruto de menor madurez de cada racimo); colocados en cajas de plástico con 6 racimos por caja; y llevados al laboratorio de Fisiología y Bioquímica Poscosecha de la UAQ- Cada conjunto de frutos, se dividió en dos subconjuntos de 126 frutos para cada tipo de producción (orgánico y convencional), Después de registrar el peso inicial de todos los frutos, un subconjunto de tomate convencional y otro subconjunto de tomate orgánico fueron almacenados 24 días en una cámara de refrigeración con aire a 12 °C (control). Los otros dos subconjuntos de 126 tomates, fueron almacenados en cámara a 12 °C equipada con un generador de ROS (Oxyion). Generándose así los cuatro tratamientos a estudiar: a) Control-convencional; b) Oxyion-convencional; c) Control-orgánico y d) Oxyion-orgánico

En la cámara con ROS, el generador Oxyion operó haciendo pasar una corriente de aire por un tubo que contenía un dispositivo que generaba un arco eléctrico que se mantenía encendido durante 30 segundos seguidos de 30 segundos de descanso (50%); el aire tratado era expulsado al interior de la cámara donde se generó una concentración de ROS en la atmósfera de ozono (anión superóxido y de iones hidroxilo). Este tratamiento se mantuvo durante todo el periodo de almacenamiento.

Cada 6 días se tomaron muestras de 8 tomates de cada uno de los cuatro tratamientos, después de registrar su peso, cuatro frutos (n=4) fueron analizados el día de muestreo y otros cuatro frutos se transfirieron a una cámara a 20 °C durante otros seis días adicionales. En el día de muestreo, se registró el peso de los frutos, su calidad visual, el color, °Bx y acidez, y se congelaron muestras en nitrógeno

líquido y se almacenaron a $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ para su análisis de compuestos bioactivos, capacidad antioxidante y actividad enzimática.

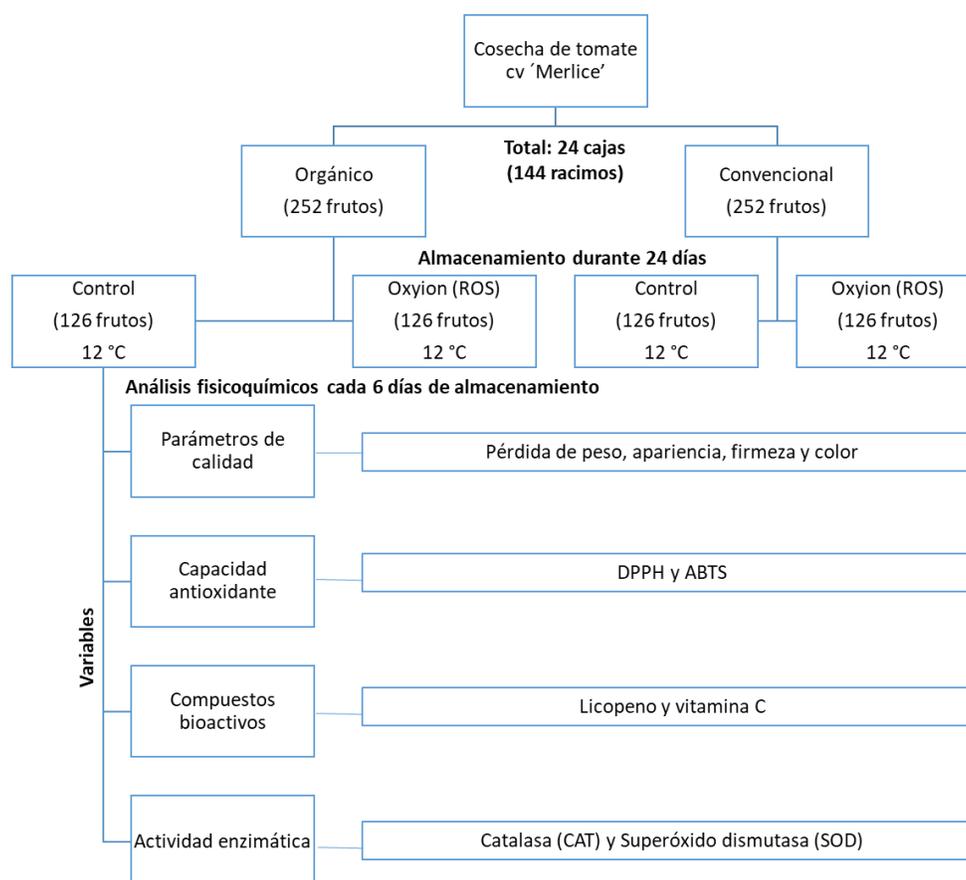


Figura 6. Estrategia experimental seguida para evaluar los efectos del almacenamiento bajo atmósferas ricas en especies reactivas de oxígeno.

5.3 Métodos

5.3.1 Tasa de respiración

La tasa de respiración fue determinada mediante el método estático; muestras individuales de frutos de tomate del mismo estado de madurez, sistema de cultivo y tipo de atmósfera fueron pesados individualmente, colocados en frascos de volumen conocido, cerrados con tapas adaptadas para toma de muestras del aire del espacio de cabeza y colocados a $12\text{ }^{\circ}\text{C}$. Después de un periodo de tiempo establecido, se determinó el contenido de CO_2 y O_2 en la atmósfera interna utilizando un analizador de gases MOCON®, Modelo 325. El cálculo de la tasa de respiración se realizó con la siguiente ecuación:

$$TR = \left(\frac{\% CO_2}{100}\right) \left(\frac{V}{W * t}\right)$$

Donde %CO₂ es el porcentaje obtenido con el analizador, V es el volumen total del recipiente, W es el peso del tomate y t es el tiempo de permanencia del tomate dentro del contenedor.

5.3.2 Porcentaje de pérdida de peso

El porcentaje de pérdida peso se cuantificó de acuerdo con el método seguido por Wongsangasri (2016). Cada fruto fue marcado y pesado al inicio del almacenamiento y registrado su peso después de cada periodo de almacenamiento. Con los datos anteriores, se calculó el % de pérdida de peso con la siguiente ecuación:

$$\% PP = \frac{(P_{inicial} - P_{final})}{P_{inicial}} \times 100\%$$

5.3.3 Calidad visual (apariencia)

La apariencia de los frutos de tomate se evaluó a través de registros fotográficos con una cámara CANON (EOS Rebel t7i). Cada seis días, se tomaron 4 tomates del mismo estado de madurez y para cada uno de ellos se tomaron 3 fotografías (zona peduncular, zona distal y ecuatorial). Se evaluó la calidad visual de los frutos en cuanto a ausencia de golpes o daños, evidencia de la presencia de hongos y el cambio de color.

5.3.4 Firmeza

La firmeza de los frutos se evaluó mediante una prueba de compresión utilizando un texturómetro BROOKFIELD®, Modelo CT3 25K equipado con una sonda cilíndrica de acrílico de 50.8 mm de diámetro que descendió a una velocidad de 1 mm/s hasta lograr 5 % de deformación de la altura de la muestra de acuerdo con el método descrito por Zhang et al., (2019). La fuerza necesaria (N) para lograr 5% de deformación fue registrada como la firmeza de cada fruto.

5.3.5 Color

A cada uno de los cuatro frutos de la muestra, se le midió su color en tres puntos diferentes de la zona ecuatorial del fruto utilizando un colorímetro KONICA

MINOLTA, Modelo CM-600d utilizando un iluminante D65 y observador a 10°; con el cual se obtuvieron los valores CIEL*a*b*, donde L* es la luminosidad, a* representa tonalidades verdes [-] a tonalidades rojas [+] y b* indica tonalidades azules [-] a tonalidades amarillas [+]), a partir de ellos se calcularon los valores de croma, ángulo de matiz o Hue y el índice de color utilizando las expresiones matemáticas reportadas por Mclellan et al., (1994).

$$Croma = \sqrt{(a^2 + b^2)}$$

$$Hue = \arctan \left(\frac{b}{a} \right)$$

$$IC = \frac{b}{a}$$

5.3.5 Actividad enzimática asociada al estrés oxidativo

5.3.5.1 Actividad de Catalasa

La actividad de la enzima catalasa fue determinada por el método descrito por Blackwell et al., (1990). Las muestras de tomate congeladas a -80 °C fueron sometidas a un tratamiento con acetona a 4 °C para obtener un polvo seco, del cual se tomaron 0.05 g para la obtención de los extractos enzimáticos. Se analizaron un total de 20 muestras y cada muestra fue analizada por triplicado. El polvo seco se homogenizó con buffer de extracción (0.1 M Tris/HCl pH 8.5, 5 mM Ditiotretitol) y se centrifugó, el sobrenadante se consideró como el extracto enzimático. Para la determinación, se preparó una mezcla de reacción con 2.7 mL de buffer Tris/HCl pH 8.5 10 mM, 0.1 mL de peróxido de hidrógeno al 0.88% y 0.2 mL del extracto enzimático. La actividad fue monitoreada a 240 nm con un espectrofotómetro UV-Vis (PerkinElmer®, Modelo Lambda 365, Estados Unidos de América). La actividad de la enzima se calculó con la fórmula reportada por Maksimović y Zivanović (2012). Los resultados fueron expresaron como unidades de actividad específica o U/mg⁻¹ proteína⁻¹. (Una unidad de catalasa específica corresponde a la descomposición de 1 μmol de H₂O₂ por minuto por g de proteína).

$$\text{Actividad en volumen} \left(\frac{U}{ml} \right) = \frac{\Delta A V_q}{0.0436 V_s}$$

$$\text{Actividad específica} \left(\frac{\text{U}}{\text{g proteína}} \right) = \frac{\text{Actividad en volumen}}{\text{mg proteína ml}^{-1}}$$

Donde ΔA corresponde al cambio de absorbancia por minuto, V_q es el volumen total de la reacción (mL), **0.0436** es el coeficiente de extinción milimolar del H_2O_2 a 240 nm ($\text{cm}^2/\mu\text{mol}$) y V_s es el volumen de muestra utilizada (mL).

5.3.5.2 Actividad de Superóxido dismutasa (SOD)

La actividad de la enzima superóxido dismutasa fue medida mediante la inhibición de la reducción fotoquímica del azul de nitrotetrazolio (NBT) de acuerdo con el método de Tejacal et al., (2005). Al igual que en la metodología anterior las muestras de tomate congeladas a -80°C fueron sometidas a un tratamiento con acetona hasta obtener un polvo seco, en este caso fueron usados 0.3 g de polvo seco para la obtención de los extractos enzimáticos. Se analizaron un total de 20 muestras y cada muestra fue analizada por triplicado. Para la reacción se utilizó un buffer de reacción compuesto por buffer de fosfato a 50 mM, pH 7.8, con 0.1 mM EDTA, y 30 mg/mL de solución de L-metionina, NBT (1.41 mg/mL) y solución X-100 tritón al 1%. La mezcla de reacción estuvo compuesta por una solución de riboflavina (4.4 mg 100 mL^{-1}), buffer de reacción y el extracto enzimático. La mezcla fue expuesta a luz fluorescente y después se midió la absorbancia a 560 nm en un espectrofotómetro UV-Vis (PerkinElmer®, Modelo Lambda 365, Estados Unidos de América). La actividad de la enzima se calculó con la fórmula reportada por Maksimović y Zivanović (2012). Los resultados fueron expresados como $\text{U}/\text{min}^{-1}\text{ g}$ de proteína⁻¹ (Una unidad de actividad de enzima SOD corresponde a concentración de extracto enzimático necesario para causar una reducción del 50% en la tasa de fotoreducción del NBT).

$$\% \text{ inhibición} = \frac{\Delta K - \Delta A}{\Delta K} \times 100$$

$$\text{Actividad en volumen} \left(\frac{\text{U}}{\text{ml}} \right) = \frac{\% \text{ inhibición}}{(50\%)(0.02)}$$

$$\text{Actividad específica} \left(\frac{\text{U}}{\text{g proteína}} \right) = \frac{\text{Actividad en volumen}}{\text{mg proteína ml}^{-1}}$$

Donde ΔK es la absorbancia del control, ΔA es la absorbancia de la muestra, **50%** es la inhibición de la tasa de fotoreducción del NBT según la definición de unidad y **0.02** es el volumen de la muestra usada (ml).

5.3.6 Contenido de compuestos bioactivos

5.3.8.1 Contenido de Vitamina C

La vitamina C se cuantificó usando cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) siguiendo el método descrito por Melfi et al., (2018). En primer lugar, se tomaron muestras previamente congeladas y almacenadas a -80°C , se analizaron un total de 20 muestras y cada una se realizó por triplicado. Para la preparación de los extractos se usaron 3 gr de cada muestra y se homogenizó con 7 ml de agua HPLC con la ayuda del ULTRA TURRAX (IKA®, Modelo T 25 D S1, Alemania) a 10,000 rpm durante 1 minuto. Posteriormente, se centrifugaron durante 10 minutos a 10,000 rpm y se separó el sobrenadante a través de un filtro millipore de $0.45\ \mu\text{m}$ para obtener el extracto a analizar.

La determinación del contenido de vitamina C se realizó inyectando $30\ \mu\text{l}$ del extracto a un equipo HPLC equipado con una columna de acero inoxidable (C:18, Waters®, $4.6 \times 100\text{mm}$, poro de $3.5\ \mu\text{m}$) empacadas de sílices y fases unidades, operada a temperatura ambiente. Los solventes usados como fase móvil fueron agua acidificada con ácido fórmico al 0.1% (A) y acetonitrilo al 100% (B) a un flujo de $0.5\ \text{ml/min}$, usando un gradiente de concentración (Tabla 3). Cada muestra se dejó correr durante de 18 min y para la detección de la vitamina C se utilizó un detector de arreglo de diodos ajustado a una longitud de onda de $240\ \text{nm}$. La identificación del compuesto se realizó comparando el tiempo de retención y su espectro de absorción con el de un estándar de ácido ascórbico. Para la cuantificación se utilizó una curva estándar de ácido ascórbico a diferentes concentraciones (0.01 a $0.09\ \text{mg/ml}$) las cuales se corrieron en el equipo bajo las mismas condiciones descritas. Los resultados fueron expresados en mg de vitamina C 100g^{-1} de fruto fresco.

Cuadro 1. Gradiente de dilución de la fase móvil para la separación de Vitamina C por HPLC.

Tiempo (min)	A	B
0	100	0
4.5	100	0
5	75	25
6	75	25
7	20	80
11	20	80
12	0	100
13	0	100
15	100	0
18	100	0

Fuente: Melfi et al., 2018.

5.3.8.2 Contenido de licopeno

Para la determinación de licopeno se llevó a cabo por el método descrito por Nagata & Ichiji, (1992). Se tomaron muestras previamente congeladas y almacenadas a -80°C, nueve tomates de cada sistema de cultivo y cada tratamiento se dividieron en 3 grupos para formar 3 réplicas, se analizaron un total de 20 muestras. Para la preparación de los extractos se usaron 0.6 g de piel de tomate (0.2 g de cada tomate) y se homogenizaron con 5 ml de solución 1:1 de etanol al 95% y acetona con 0.05% (p / v) de butil hidroxitolueno (BHT) con la ayuda del Ultraturrax (IKA®, Modelo T 25 D S1, Alemania) a 10,000 rpm durante 1 minuto. Se adicionó 10 ml de hexano y se colocó en un frasco ámbar con tapa. Posteriormente, la muestra se agitó a 180 rpm en una placa de agitación magnética durante 15 minutos en baño de hielo. A continuación, se agregaron 3 ml de agua destilada y continuó la agitación durante 5 minutos; la muestra se dejó reposar a temperatura ambiente durante 5 minutos para permitir la separación de fases. Finalmente, se recuperó la fase orgánica y se tomó una alícuota de 1 ml, la cual se diluyó 1:5 con hexano (Holden et al., 1999). Posteriormente se midió la absorbancia con un espectrofotómetro UV-

Vis (PerkinElmer®, Modelo Lambda 365, Estados Unidos de América) a 453, 505, 645 y 663 nm, utilizando hexano como blanco. La concentración de licopeno fueron calculada de acuerdo con la ecuación reportada por Nagata & Ichiji, (1992):

$$\text{Licopeno (mg/100 ml)} = -0.0458A_{663} + 0.204A_{645} + 0.372A_{505} - 0.0806A_{453}$$

Los resultados fueron expresados en mg de licopeno 100g⁻¹ de tejido fresco.

5.3.7 Capacidad antioxidante

5.3.7.1 Técnica de DPPH

Esta técnica se llevó a cabo de acuerdo a lo reportado por Fukumoto & Mazza, (2000). Se preparó una solución estándar de Trolox, para ello se pesaron 0.0025 g Trolox y se aforó a 10 ml con Metanol (solución T). Posteriormente, a partir de esta solución se prepararon distintas concentraciones (50 – 800 µM Trolox) con la solución T y metanol.

Para la preparación de la solución de DPPH se pesaron 0.0015 g de 2,2-Difenil-1-picrylhydrazyl, se agregaron 20.5 ml de metanol absoluto y se aforó hasta 25 ml con agua. Se analizaron un total de 20 muestras y cada muestra fue analizada por triplicado. El extracto metanólico se preparó a partir de 9 tomates (3 g de cada tomate), se agregaron 15 ml de metanol al 80% y se homogenizó en el Ultraturrax a 10,000 rpm durante 1 minuto. Se centrifugó a 10,000 rpm durante 10 minutos y finalmente se recuperó el sobrenadante. El llenado de la placa se realizó de la siguiente forma de acuerdo a los blancos y las muestras que se tenían (los espacios en blanco son pozos vacíos):

Cuadro 2. Llenado de microplaca para lectura de muestras (DPPH)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	Bco ₁	Bco ₁	Bco ₁				M ₄	M ₄	M ₄	M ₁₂	M ₁₂	M ₁₂
B	Ctrl ₁	Ctrl ₁	Ctrl ₁				M ₅	M ₅	M ₅			
C	T _{0.5}	T _{0.5}	T _{0.5}	T ₆	T ₆	T ₆	M ₆	M ₆	M ₆			
D	T ₁	T ₁	T ₁	T ₇	T ₇	T ₇	M ₇	M ₇	M ₇			

E	T ₂	T ₂	T ₂	T ₈	T ₈	T ₈	M ₈	M ₈	M ₈			
F	T ₃	T ₃	T ₃	M ₁	M ₁	M ₁	M ₉	M ₉	M ₉			
G	T ₄	T ₄	T ₄	M ₂	M ₂	M ₂	M ₁₀	M ₁₀	M ₁₀			
H	T ₅	T ₅	T ₅	M ₃	M ₃	M ₃	M ₁₁	M ₁₁	M ₁₁			

Pocillos=96.

Bco= Blanco (200µl agua destilada + 20µl metanol)

T= Trolox (200µl DPPH• + 20µl Trolox)

Ctrl= Control (200µl DPPH• + 20µl metanol)

M= Muestra (200µl DPPH• + 20µl muestra)

Una vez que se llenó la placa, se procedió a la lectura de la absorbancia a 734 nm en el lector de microplacas BioRad. Los resultados obtenidos se reportaron como µmol trolox 100 g⁻¹ de tejido fresco.

5.3.7.2 Técnica de ABTS

Esta técnica se llevó a cabo de acuerdo a lo reportado por Fukumoto & Mazza, (2000). Se preparó la solución de ABTS, para el cual se pesaron 0.01920g de ABTS y se aforó a 5ml con agua destilada. A continuación, se preparó una solución acuosa 140 mM de persulfato de potasio (K₂S₂O₈), pesando 0.1892g de K₂S₂O₈ y aforando a 5ml con agua destilada. A continuación, se mezcló en un vial ámbar 5 ml de ABTS y 88 µL de la solución de persulfato de potasio; la nueva solución (A) se guardó en un lugar oscuro durante 12 horas a temperatura ambiente para la formación del radical.

Pasadas las 12 horas se hizo una dilución dentro de un vial ámbar, mezclando 500µL (0.5 ml) de la solución A, que contiene el ABTS•⁺ y de 20-25 ml de etanol. Esta nueva solución B, debía tener una absorbancia entre 0.7 y 1, por lo que fue necesario verificar este valor en el espectrofotómetro UV-VIS a una longitud de onda de 734 nm. Se ajustó la solución B con etanol hasta obtener el valor deseado.

Nuevamente se preparó una solución estándar de Trolox, para ello se pesaron 0.0025 g trolox y se aforó a 10 ml con Metanol (solución T). Posteriormente, a partir

de esta solución se prepararon distintas concentraciones (50 – 800 μ M Trolox) con la solución T y metanol.

El extracto metanólico usado fue el mismo que para la técnica de DPPH, el cual se preparó a partir de 9 tomates (3 g de cada tomate), se agregaron 15 ml de metanol al 80% y se homogenizó en el ULTRATURRAX A 10,000 rpm durante 1 minuto. Se centrifugó a 10,000 rpm durante 10 minutos y finalmente se recuperó el sobrenadante.

El llenado de la placa se realizó de la siguiente forma de acuerdo a los blancos, controles y muestras que se tenían (los espacios en blanco son pozos vacíos):

Cuadro 3. Llenado de microplaca para lectura de muestras (ABTS)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	Bco ₁	Bco ₁	Bco ₁	Bco ₂	Bco ₂	Bco ₂	M ₄	M ₄	M ₄	M ₁₂	M ₁₂	M ₁₂
B	Ctrl ₁	Ctrl ₁	Ctrl ₁	Ctrl ₂	Ctrl ₂	Ctrl ₂	M ₅	M ₅	M ₅			
C	T _{0.5}	T _{0.5}	T _{0.5}	T ₆	T ₆	T ₆	M ₆	M ₆	M ₆			
D	T ₁	T ₁	T ₁	T ₇	T ₇	T ₇	M ₇	M ₇	M ₇			
E	T ₂	T ₂	T ₂	T ₈	T ₈	T ₈	M ₈	M ₈	M ₈			
F	T ₃	T ₃	T ₃	M ₁	M ₁	M ₁	M ₉	M ₉	M ₉			
G	T ₄	T ₄	T ₄	M ₂	M ₂	M ₂	M ₁₀	M ₁₀	M ₁₀			
H	T ₅	T ₅	T ₅	M ₃	M ₃	M ₃	M ₁₁	M ₁₁	M ₁₁			

Pocillos=96.

Blanco1: 230 μ l etanol + 20 μ l metanol

Blanco2: 230 μ l etanol + 20 μ l agua destilada*

Ctrl1: 230 μ l ABTS•+ + 20 μ l metanol

Ctrl2: 230 μ l ABTS•+ + 20 μ l agua destilada

T= Trolox (230 μ l ABTS• + 20 μ l Trolox)

M= Muestra (230 μ l ABTS• + 20 μ l muestra)

Una vez que la placa estuvo lista, se procedió a la lectura a 520 nm en el lector de microplacas BioRad. Los resultados obtenidos se reportaron como $\mu\text{mol trolox } 100 \text{ g}^{-1}$ de tejido fresco.

5.4 Análisis estadístico

Los resultados obtenidos fueron analizados a través de un análisis de varianza (ANOVA) para evaluar los efectos del sistema de cultivo (convencional y orgánico) y el tipo de atmósfera de almacenamiento (aire control y aire + ROS). Si los análisis mostraban diferencias significativas entre los tratamientos, se procedió a realizar una comparación de medias utilizando la prueba de Tukey <0.05 . Los análisis estadísticos se realizaron con el paquete estadístico JMP 6.

6. Resultados y Discusión

6.1 Comportamiento fisiológico de los frutos.

6.1.1 Pérdida de peso

La pérdida de peso del tomate durante su almacenamiento poscosecha, es un factor de calidad muy importante, puesto que está asociado a la pérdida de firmeza de los frutos: se considera que una pérdida de peso $> 5\%$ señala que la calidad de textura del fruto está fuertemente afectada y compromete su comercialización.

El análisis de varianza de los efectos del sistema de cultivo, el tipo de ambiente de conservación (atmósfera y temperatura), así como la interacción de factores, presentó diferencias altamente significativas en la pérdida de peso tanto a $12 \text{ }^\circ\text{C}$ como en sus respectivas transferencias de 12 a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (Anexo 1)

La interacción sistema de producción, sistema de almacenamiento y temperatura de almacenamiento) mostró diferencias altamente significativas ($p < 0.05$). El Cuadro 4, muestra la comparación de medias de estos tratamientos durante el almacenamiento a $12 \text{ }^\circ\text{C}$ y su transferencia a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ respectivamente. El almacenamiento duro 24 días, analizando las muestras cada 6 días.

Cuadro 4. Comparación de medias de la pérdida de peso de tomate ‘Merlice’ producido en sistema hidropónico convencional u orgánico; almacenado a 12 °C en aire (control) o con especies reactivas de oxígeno (Oxyion) y su transferencia a 20 °C por 6 días

Temp. 12 °C		Transferencia 12 °C a 20 °C	
Control, Orgánico, 24	5.1 ^a	Control, Orgánico, 24	7.4 ^a
Oxyion, Orgánico, 24	4.1 ^b	Oxyion, Orgánico, 24	5.9 ^b
Control, Orgánico, 18	4.0 ^c	Control, Orgánico, 18	5.7 ^c
Control, Convencional, 24	3.9 ^d	Control, Convencional, 24	5.7 ^c
Oxyion, Orgánico, 18	3.1 ^e	Oxyion, Orgánico, 18	4.9 ^d
Control, Orgánico, 12	2.9 ^f	Control, Convencional, 18	4.8 ^e
Oxyion, Convencional, 24	2.8 ^g	Oxyion, Convencional, 24	4.4 ^f
Control, Convencional, 18	2.7 ^h	Control, Orgánico, 12	3.9 ^g
Oxyion, Orgánico, 12	2.1 ⁱ	Oxyion, Convencional, 18	3.7 ^h
Oxyion, Convencional, 18	2.1 ⁱ	Control, Convencional, 12	3.4 ⁱ
Control, Convencional, 12	2.0 ^j	Oxyion, Orgánico, 12	3.3 ^j
Oxyion, Convencional, 12	1.6 ^k	Oxyion, Convencional, 12	2.5 ^k
Control, Orgánico, 6	1.0 ^l	Control, Orgánico, 6	2.4 ^l
Control, Convencional, 6	0.7 ^m	Control, Convencional, 6	2.1 ^m
Oxyion, Orgánico, 6	0.7 ^m	Oxyion, Orgánico, 6	1.9 ⁿ
Oxyion, Convencional, 6	0.6 ⁿ	Oxyion, Convencional, 6	1.5 ^o
Oxyion, Convencional, 0	0 ^o	Control, Orgánico, 0	0 ^p
Oxyion, Orgánico, 0	0 ^o	Oxyion, Convencional, 0	0 ^p
Control, Convencional, 0	0 ^o	Control, Convencional, 0	0 ^p
Control, Orgánico, 0	0 ^o	Oxyion, Orgánico, 0	0 ^p

Los datos señalan que la pérdida de peso de todos los tratamientos se incrementó durante el almacenamiento (Figura 7). La comparación estadística de los datos registrados para cada día de muestreo indicó que tanto el sistema de almacenamiento (aire o aire rico en ROS), el sistema de producción (orgánico y

convencional) y la interacción de estos factores fueron diferentes estadísticamente significativos (Anexo 1).

La conservación en atmósferas de aire provocó una mayor pérdida de peso respecto de las muestras almacenadas en atmósferas ricas en especies reactivas de oxígeno; al igual que las muestras procedentes de hidroponía orgánico perdieron más peso que los tomates producidos por el sistema convencional. Por ello la interacción del almacenamiento en aire y sistema de cultivo, señaló que las muestras de tomate orgánico almacenadas en atmósferas de aire y aire más especies reactivas de oxígeno, mostraron la mayor pérdida de peso respecto de las muestras procedentes de sistemas de producción convencional (Figura 7A).

La transferencia de los frutos almacenados a 12 °C a 20 °C por 6 días, aumentó la pérdida de peso de manera más pronunciada limitando la vida de anaquel (Cuadro 5.1). Todas las muestras de los diferentes sistemas de almacenamiento y sistema de producción tuvieron pérdidas de peso menores de 5% hasta los 12 días de almacenamiento a 12 °C y su transferencia a 20 °C por 6 días. Solamente las muestras del sistema convencional almacenadas 18 días a 12 °C y transferidas a 20 °C por seis días, así como las del sistema orgánico almacenadas en atmósferas ricas en especies reactivas de oxígeno mantuvieron pérdidas menores del 5%; finalmente solamente las muestras del sistema convencional almacenadas en aire con especies ricas de oxígeno pudieron mantener pérdidas menores de 5% después de su almacenamiento por 24 días a 12 °C y su transferencia a 20 °C por seis días.

Los resultados anteriores, muestran con claridad que los frutos de tomate orgánico tuvieron la mayor pérdida de peso, lo cual contrastó con el tomate convencional que tuvo la menor pérdida de peso. La pérdida fisiológica de peso, está directamente relacionada con mayores tasas de transpiración de los frutos; por lo que se puede inducir que la transpiración de los tomates orgánicos es mayor que la mostrada por los tomates convencionales y que este aspecto puede limitar la vida de anaquel de los frutos orgánicos. Ronga et al., (2015) al comparar las respuestas fisiológicas de tomate de procesamiento tanto orgánico como convencional señala que los tomates orgánicos mostraron una tasa de transpiración y una conductancia estomatal de

10.3 y 16.5 % mayores que los tomates convencionales. Estos datos parecen explicar los resultados encontrados en esta investigación.

Respecto de los efectos del almacenamiento en aire o en atmósferas con especies reactivas de oxígeno, los datos señalan que el uso de atmósferas ricas en especies reactivas de oxígeno permitió el almacenamiento de tomates convencionales hasta por 24 días a 12 °C + 6 seis días a 20 °C. Para el caso de tomates orgánicos, el uso de estas atmósferas permitió el almacenamiento de tomates orgánicos hasta por 18 días a 12 °C + 6 días a 20 °C. Estos resultados, parecen señalar que el almacenamiento de tomate de racimo en atmósferas ricas en especies reactivas de oxígeno retrasa la pérdida de peso tanto en tomate convencional como orgánico; no obstante, los tomates orgánicos muestran una mayor pérdida de peso que no fue corregida con el uso de este tipo de atmósferas (Figura 7). No existen datos publicados respecto de los efectos de las atmósferas ricas en diferentes especies reactivas de oxígeno en la pérdida de peso de frutos de tomate. No obstante, Tzortzakis et. al., (2007), señalaron que el almacenamiento de tomate ‘Corousel’ en atmósferas con $1 \mu\text{molmol}^{-1}$ de ozono no alteraron la pérdida de peso, pero mantuvieron su firmeza. Resultados similares también fueron descritos por Aguayo et. al. (2006) para tomate enteros y rebanados tratados con aire en presencia de ozono ($4 \mu\text{LL}^{-1}$) durante 30 min y por ciclos de 3h.

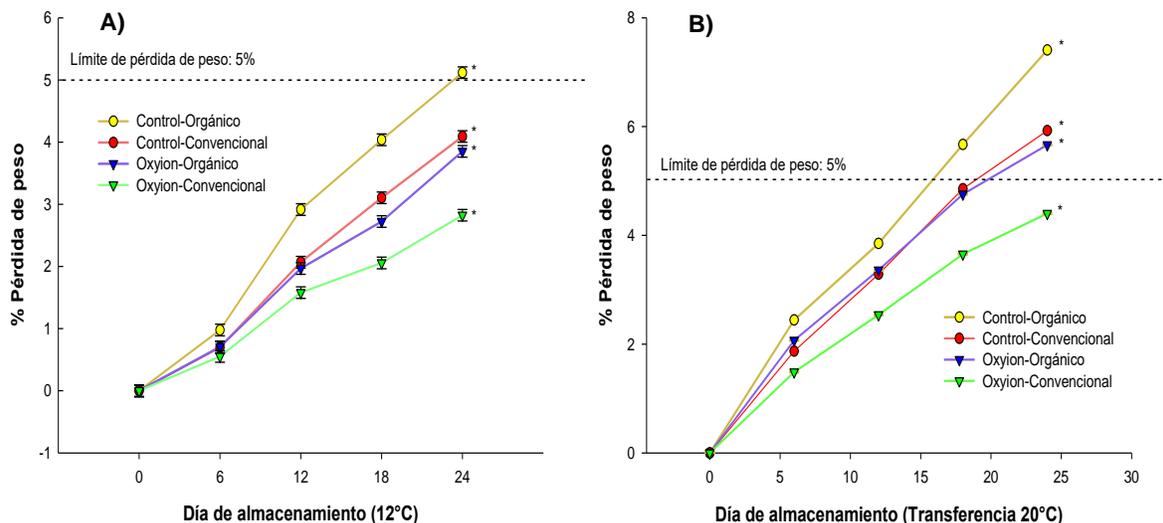


Figura 7. Porcentaje de pérdida de peso de frutos de tomate en racimo cv ‘Merlice’ cultivados en sistemas hidropónicos convencional y orgánico, almacenados durante 24 días a 12 °C en aire (control) o en atmósferas ricas en especies reactivas de oxígeno (Oxyion) de forma continua (A) y transferido de 12 a 20 °C (B). La línea punteada indica el límite máximo de pérdida de peso para la comercialización. Las líneas marcadas con (*) al final del tratamiento indican que existe diferencia significativa.

Con los datos de pérdida de peso registrados en cada uno de los tratamientos analizados durante la transferencia a 20 °C, se realizaron regresiones lineales para obtener expresiones matemáticas lineales para estimar la vida de anaquel cuando los frutos alcancen el 5 % de pérdida de peso (Cuadro 5). De acuerdo a lo anotado anteriormente, la mayor vida de anaquel estimada fue para los tomates producidos por sistema convencional y almacenados en atmósferas con ROS (26 días) y esta vida de anaquel se reduce a 20 días si se almacenan en aire a 12 °C. Los tomates hidropónicos solo alcanzaron una vida de anaquel de 19 días cuando se almacenaron en atmósferas con ROS y su vida de anaquel se redujo a 16-17 días cuando se almacenaron a 12 °C en aire.

Cuadro 5. Vida de anaquel estimada de tomate de racimo cv ‘Merlice’ procedentes de invernaderos hidropónicos convencional y orgánico, almacenado a 12 °C en atmósferas de aire o en atmósferas ricas en ROS y transferidos a 20 °C durante 6 días

Tratamiento	Ecuación lineal	r ²	Vida de anaquel estimada (días)
Convencional-aire	%PP=0.367+(0.234*días)	0.9805	19.8
Orgánico-aire	%PP=0.267+(0.301*días)	0.9933	15.7
Convencional-ROS	%PP=0.222+(0.183*días)	0.9872	26.1
Orgánico-ROS	%PP=0.220+(0.247*días)	0.9922	19.3

6.1.1 Cambios de firmeza de los frutos durante el almacenamiento.

Se ha señalado que la pérdida de peso limita la vida de anaquel de los frutos y que este comportamiento está influido por el tipo de cultivo, la atmósfera de almacenamiento y la temperatura de conservación. La pérdida de peso es un factor que afecta la firmeza de los frutos; por lo que hay que analizar cómo se vio afectada esta variable de respuesta bajo las distintas condiciones de almacenamiento estudiadas.

Los resultados generales del análisis de varianza de la firmeza se muestran en el Anexo 2. Durante el almacenamiento continuo a 12 °C, se observaron efectos altamente significativos del sistema de cultivo; los tomates convencionales mostraron una firmeza promedio significativamente mayor ($18.2 \text{ N} \pm 0.66$) que los frutos de sistema orgánico ($16.1 \text{ N} \pm 0.66$). El efecto de la interacción de todos los factores fue alto y estadísticamente significativa y su comparación de medias se muestra en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Comparación de medias de los valores de firmeza de tomate de racimo 'Merlice', producido en sistemas hidropónicos convencional y orgánico, almacenados en aire (control) o en atmósferas ricas en ROS a 12 °C y su transferencia por 6 días a 20 °C.

12 °C		12 °C + 6d 20 °C	
Oxyion, Convencional, 0	46.3 ^a	Control, Orgánico, 18	16.4 ^a
Control, Orgánico, 0	37.7 ^{ab}	Oxyion, Orgánico, 12	14.0 ^{ab}
Oxyion, Orgánico, 0	34.2 ^{bc}	Control, Convencional, 12	13.9 ^{ab}
Control, Convencional, 0	32.5 ^{bcd}	Oxyion, Convencional, 18	13.5 ^{ab}
Control, Orgánico, 6	26.3 ^{cde}	Oxyion, Orgánico, 24	13.3 ^{ab}
Control, Convencional, 6	24.1 ^{cdef}	Control, Convencional, 18	12.9 ^{ab}
Oxyion, Convencional, 6	21.6 ^{defg}	Oxyion, Convencional, 12	12.8 ^{ab}
Control, Convencional, 12	20.8 ^{efgh}	Control, Orgánico, 12	12.7 ^{ab}
Oxyion, Orgánico, 6	20.7 ^{efgh}	Control, Convencional, 6	12.6 ^{ab}
Oxyion, Convencional, 12	19.9 ^{efgh}	Oxyion, Convencional, 6	11.6 ^{ab}
Control, Convencional, 18	18.7 ^{efgh}	Control, Convencional, 24	11.4 ^{ab}

Oxyion, Orgánico, 12	18.2 ^{efgh}	Oxyion, Orgánico, 18	11.4 ^{ab}
Control, Orgánico, 18	15.8 ^{efgh}	Control, Orgánico, 6	11.2 ^{ab}
Oxyion, Orgánico, 18	14.1 ^{fgh}	Oxyion, Orgánico, 6	10.4 ^{ab}
Control, Convencional, 24	14.1 ^{fgh}	Oxyion, Convencional, 24	10.1 ^b
Oxyion, Convencional, 18	14.0 ^{fgh}	Control, Orgánico, 24	9.2 ^b
Oxyion, Convencional, 24	12.4 ^{gh}		
Oxyion, Orgánico, 24	12.2 ^{gh}		
Control, Orgánico, 12	11.4 ^{gh}		
Control, Orgánico, 24	10.0 ^h		

Los frutos almacenados a 12 °C, presentaron la firmeza al inicio del almacenamiento y disminuyó a media que transcurrió el mismo (Figura 8). El tratamiento que mostró la mayor pérdida de firmeza fue el de tomate orgánico almacenado en atmósfera con aire.

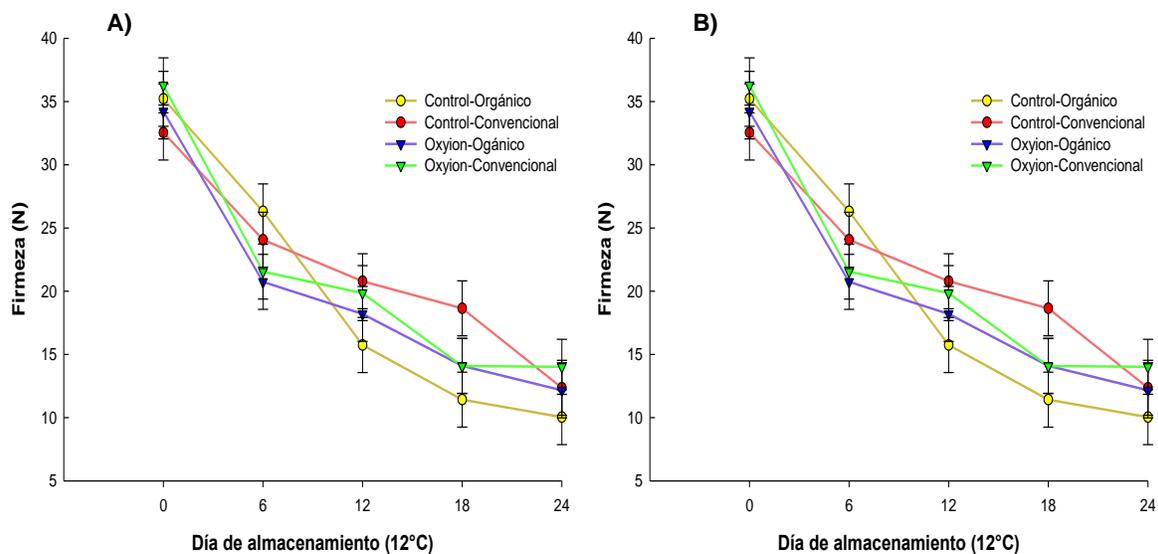


Figura 8. Cambios en la firmeza de frutos de tomate cv ‘Merlice’ cultivados en sistemas hidropónicos convencional y orgánico, almacenados por 24 días a 12 °C (A) y sus transferencias de 12 °C a 20 °C por 6 días (B) en aire y en atmósferas ricas en especies reactivas de oxígeno (Oxyion). Las líneas marcadas con (*) al final del tratamiento indican que existe diferencia significativa.

Por otro lado, los tomates de cultivo convencional almacenados tanto en atmósfera de aire o con ROS; así como el tomate orgánico almacenado en atmósfera ricas en ROS, mantuvieron mejor la firmeza. Es importante señalar que el mismo tratamiento que tuvo la mayor pérdida de peso (orgánico, almacenado en aire a 12 °C), también mostró una mayor pérdida de firmeza.

Para los racimos de tomate transferidos de 12 a 20 °C, el análisis de varianza solo mostró diferencias significativas en los factores días de almacenamiento y la interacción triple (Anexo 2). La comparación de medias (Cuadro 6), indicó que los racimos de tomate procedentes de sistemas de cultivo orgánico, almacenados en aire durante 18 días mostraron los mayores valores de firmeza. No obstante, estos mismos racimos mostraron los valores más bajos de firmeza a los 24 días de almacenamiento a 12 °C y su transferencia a 20 °C. De forma general, se puede decir que la firmeza de los tomates se pierde notablemente durante las transferencias a 20 °C por 6 días

En la literatura hay poca información sobre el efecto del sistema de cultivo hidropónico de tomate orgánico y convencional en la firmeza de los frutos. En un trabajo similar desarrollado con esta misma variedad en una temporada previa se observaron resultados similares. No obstante, Shah Jahan et al., (2019) puntualizan que el tipo de fertilizante orgánico tiene un efecto importante y compararon la firmeza de tomates cultivados con vermicomposta, o con estiércol de borrego y un tratamiento sin fertilizantes orgánicos, observando que los tomates cultivados en vermicomposta mostraron los valores más altos de firmeza, seguidos por aquellos cultivados con estiércol de borrego y los cultivados sin fertilizantes orgánicos. Estos datos contrastan con lo observado en el presente trabajo. De acuerdo con estos autores la fertilización con vermicomposta es el factor determinante para mejorar esta característica de calidad. Sin embargo, para la investigación no se cuenta con información acerca de si los cultivos orgánicos aquí estudiados fueron suministrados o no con vermicomposta.

Respecto de los efectos de las ROS, existe información respecto de aplicaciones de ozono dentro de una corriente de aire; Aguayo et al (2006) al aplicar ozono ($4\mu\text{L}^{-1}$

¹⁾ en flujos de aire cíclico (30 minutos cada 3 horas), observaron que los tomates tratados tenían una mejor firmeza que los frutos no tratados. Estos autores señalan que, aunque el ozono tuvo efectos de inducción de síntesis de etileno, la misma presencia de ozono en aire facilita la oxidación del etileno disminuyendo los efectos de esta hormona en la maduración de los frutos. Estos resultados parecen confirmar nuestras observaciones. No obstante, se ha señalado que concentraciones de ozono atmosférico por arriba de 6.85 mgL^{-1} disminuye drásticamente la firmeza de frutos de tomate uva. Estos datos sugieren que las concentraciones generadas en el equipo Oxyion dieron condiciones adecuadas para mantener la firmeza.

Puesto que la pérdida de firmeza, es un factor que se asocia a la degradación de componentes de la pared celular, así como a la pérdida de agua del tejido lo que provoca una pérdida de turgencia de las células y por tanto de su firmeza. La Figura 9 muestra la asociación de estos dos factores en los diferentes tratamientos estudiados: Se observa una notable disminución de la firmeza cuando los frutos solo han perdido alrededor del 0.5 % de pérdida de peso y en una segunda etapa las disminuciones de la firmeza se asocian de manera lineal a la pérdida de peso. Estos datos sugieren que los cambios en el metabolismo de la pared celular que ocurren durante los primeros 6 días de almacenamiento son los que provocan la mayor caída de la firmeza; no obstante, después de ese periodo, la relación de pérdida de firmeza se asocia de manera más directa con la pérdida de peso. Estos datos confirman la importancia de evitar la pérdida de peso de los frutos a través de los empaques si se considera que una pérdida de 5 % genera frutos de escasa calidad comercial.

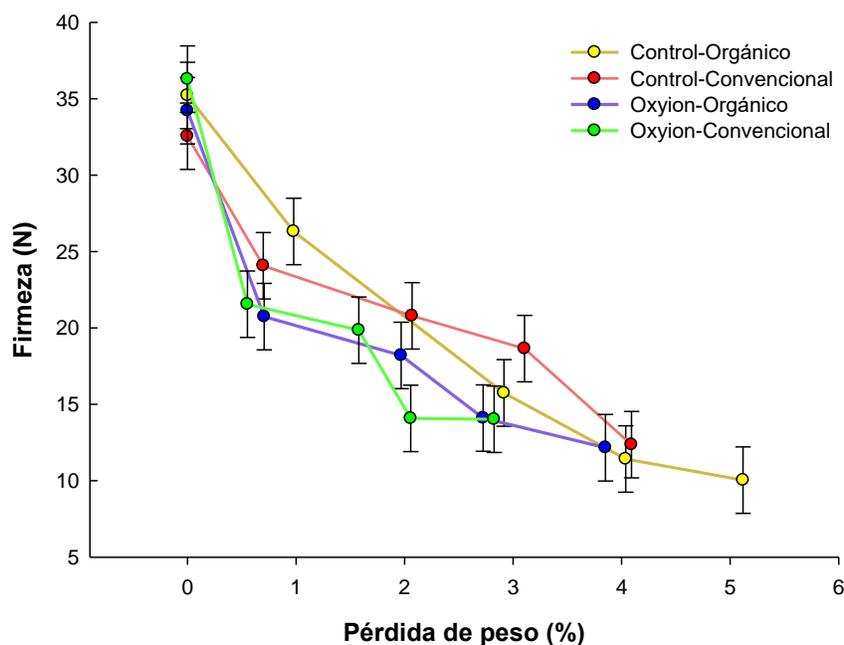


Figura 9. Relación de la pérdida de firmeza y pérdida de peso en tomates ‘Merlice’ procedentes de sistemas de cultivo hidropónico convencional y orgánico, almacenados a 12 °C en aire (control) o en aire + especies reactivas de oxígeno (Oxyion). Las líneas marcadas con (*) al final del tratamiento indican que existe diferencia significativa.

6.1.2 Efectos en la tasa de respiración

La tasa de respiración de los frutos mostró patrones climatéricos similares entre los distintos tratamientos aplicados (Figura 10) durante su almacenamiento a 12 °C. En todos ellos hubo un incremento climatérico de respiración en el día 12.

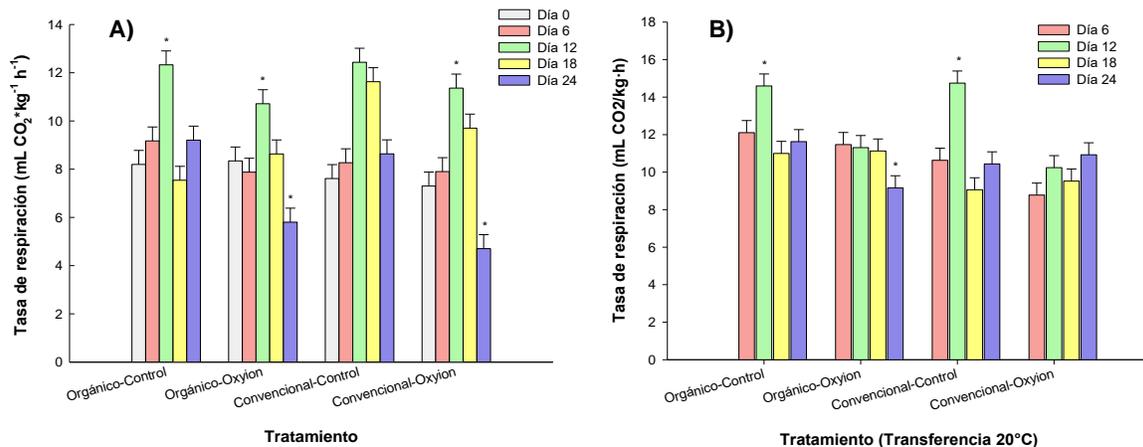


Figura 10. Cambios en la tasa de respiración de frutos de tomate cv ‘Merlice’ cultivados en sistema hidropónicos orgánico y convencional, almacenados en aire (control) o en atmósferas ricas en ROS (Oxyion) a 12 °C (A) y sus transferencias de 12 a 20 °C (B). Las barras marcadas con (*) indican que existen diferencias significativas entre los días de almacenamiento.

Los picos climatéricos de los tomates orgánicos y convencionales almacenados en atmósferas de aire (control) alcanzaron valores estadísticamente más altos (más de 12 mL de CO₂ kg⁻¹h⁻¹) y de igual forma terminaron con tasas de respiración significativamente más altas en el día 24 (8-9 mL de CO₂ kg⁻¹h⁻¹) mientras que los tomates almacenados en atmósferas ricas en ROS mostraron sus picos climatéricos con tasas de respiración significativamente menores (10-11 mL de CO₂ kg⁻¹h⁻¹) respecto de los frutos almacenados en aire; de igual forma, también terminaron su almacenamiento con tasas de respiración significativamente menores (4-6 mL de CO₂ kg⁻¹h⁻¹). Estos datos confirman la naturaleza climatérica de la variedad ‘Merlice’, aunque se observó un atraso del pico climatérico de dos días respecto de lo reportado por Suslow & Cantwell (1997) pero dicho retraso parece estar más relacionado a la menor temperatura de almacenamiento estudiada en este trabajo.

Estos resultados también señalan que el almacenamiento en atmósferas ricas en ROS, disminuyó ligeramente el metabolismo de los frutos de tomate tanto convencionales y orgánicos lo cual parece explicar la menor pérdida de peso y

firmeza de los frutos señalada en las secciones anteriores. También estos resultados parecen explicar por qué los tratamientos que se almacenaron en aire tuvieron una mayor pérdida de peso y menores valores de firmeza. Es decir que esa mayor pérdida de peso y pérdida de firmeza se pueden explicar por el mayor metabolismo de esos frutos.

En la literatura no existen reportes sobre el efecto del almacenamiento en atmósferas ricas en ROS; aunque si hay reportes sobre los efectos de atmósferas enriquecidas con O₃. Aguayo et al (2006) al aplicar ozono (4μLL-1) en flujos de aire cíclico (30 minutos cada 3 horas), observaron tasas de respiración significativamente menores en frutos de tomate 'Thomas' aunque las tasas de producción de etileno fueron mayores. Estos autores explican que la presencia de O₃ en la atmósfera induce la síntesis de etileno pero que también este gas es oxidado por la misma presencia del ozono en el aire. Tzortzakis, et al., (2007) señalaron que la presencia de 1 μmolmol⁻¹ de ozono no tuvo cambios significativos en la tasa de respiración y producción de etileno. Estos datos señalan la importancia de la concentración de ROS en el aire.

6.1.3 Cambios en las propiedades fisicoquímicas de los frutos

6.1.3.1 Cambios en los sólidos solubles totales, acidez titulable e índice de sabor

El análisis de varianza de los datos de sólidos solubles totales (SST) o °Bx de todos los tratamientos almacenados a 12 °C, indicó que el sistema de cultivo, los días de almacenamiento y la interacción almacenamiento*sistema de cultivo*días de almacenamiento fueron altamente significativas (Anexo 2). De manera similar, para las muestras transferidas de 12 a 20 °C se encontraron diferencias altamente significativas para los factores tipo de almacenamiento, sistema de cultivo, días de almacenamiento y la interacción entre estos factores (Anexo 2).

La comparación de medias para los tratamientos almacenados a 12 °C, mostró que los tomates del cultivo convencional tuvieron mayor contenido de sólidos solubles totales respecto de los tomates del sistema orgánico; 4.4 y 4.2 °Brix, respectivamente. No obstante, el almacenamiento en aire o con aire y especies

reactivas de oxígeno no señaló diferencias significativas entre ambos conjuntos de datos. La comparación de medias de los factores señala que en el día 12 de almacenamiento a 12 °C se registraron los valores más altos (5.2 – 5.0) tanto en tomates convencionales como los orgánicos almacenados a en aire o con aire + ROS (Cuadro 7).

Los SST juegan un papel importante en la calidad sensorial de los frutos. El mayor contenido se observó en el día 12 de almacenamiento a 12 °C (Figura 11), lo cual se relaciona con los valores máximos de la tasa de respiración descritos en la sección anterior donde se señala que el día 12 se presentaron los picos climatéricos de respiración. Estos datos parecen señalar que el incremento en el contenido de sólidos solubles está asociado al incremento de la tasa metabólica durante la maduración donde se ha reportado un incremento en los procesos de degradación del almidón y la consecuente subida de los sólidos solubles totales (Maunder et al., 1987).

Cuadro 7. Comparación de medias de los SST de tomates de racimo ‘Merlice’ de sistemas hidropónicos convencionales u orgánicos almacenados en aire (control) o en aire + ROS (Oxyion) a 12 °C durante 24 días y sus transferencias de 12 °C + 6 días a 20 °C

12 °C		12 °C + 6d 20 °C	
Oxyion, Convencional, 12	5.2 ^a	Oxyion, Convencional, 24	5.2 ^a
Control, Convencional, 12	5.0 ^{ab}	Oxyion, Convencional, 18	5.2 ^a
Control, Orgánico, 12	5.0 ^{ab}	Control, Convencional, 12	4.7 ^{ab}
Control, Convencional, 24	4.4 ^{bc}	Control, Convencional, 24	4.7 ^{ab}
Oxyion, Convencional, 24	4.4 ^{bc}	Oxyion, Orgánico, 24	4.7 ^{ab}
Oxyion, Orgánico, 18	4.4 ^{bc}	Control, Orgánico, 24	4.6 ^{abc}
Control, Convencional, 0	4.3 ^{cd}	Oxyion, Convencional, 12	4.6 ^{abc}
Control, Convencional, 18	4.3 ^{cd}	Control, Convencional, 6	4.4 ^{bc}
Control, Convencional, 6	4.3 ^{cd}	Oxyion, Convencional, 6	4.4 ^{bc}
Oxyion, Orgánico, 12	4.3 ^{cd}	Oxyion, Orgánico, 18	4.4 ^{bc}
Oxyion, Convencional, 6	4.3 ^{cd}	Control, Convencional, 18	4.3 ^{bc}

Oxyion, Orgánico, 24	4.2 ^{cd}	Oxyion, Orgánico, 6	4.3 ^{bc}
Control, Orgánico, 18	4.2 ^{cd}	Control, Orgánico, 12	4.3 ^{bc}
Oxyion, Convencional, 0	4.0 ^{cd}	Control, Orgánico, 18	4.2 ^{bc}
Oxyion, Convencional, 18	4.0 ^{cd}	Oxyion, Orgánico, 12	4.2 ^c
Oxyion, Orgánico, 6	4.0 ^{cd}	Control, Orgánico, 6	4.0 ^c
Oxyion,Orgánico,0	4.0 ^{cd}		
Control,Orgánico,6	4.0 ^{cd}		
Control,Orgánico,24	3.9 ^{cd}		
Control,Orgánico,0	3.7 ^d		

Durante los 6 días de transferencia de 12 a 20 °C, las diferencias entre el tiempo de almacenamiento para cada tratamiento ya no fueron muy notables. No obstante, en todos los tratamientos, los frutos de 24 días muestran un mayor contenido de SST siendo más notable esta diferencia en el tratamiento de tomate convencional almacenado en atmosferas con ROS (Figura 11B). Un comportamiento similar se ha reportado en fresa almacenada en aire con el generador Oxyion (Ramírez et al., 2017).

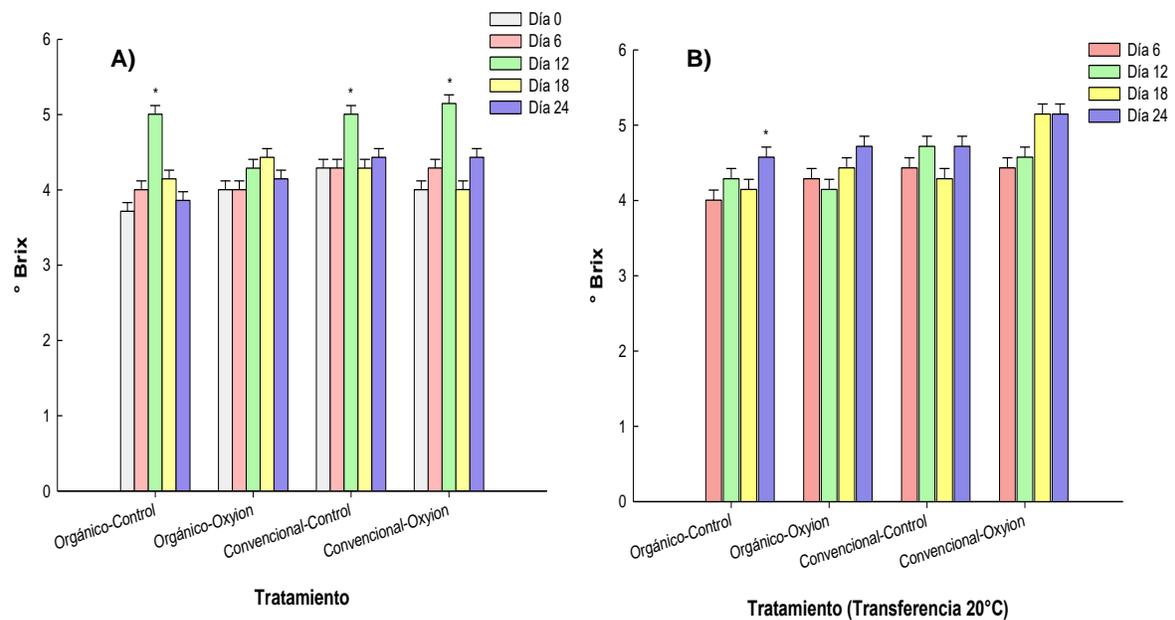


Figura 11. Cambios en el contenido de sólidos solubles totales (°Brix) de frutos de tomate cv 'Merlice' cultivados en sistema hidropónicos orgánico y convencional almacenados a 12 °C (A) y sus transferencias de 12 a 20 °C (B) en aire (control) o en atmósferas ricas en especies reactivas de oxígeno (Oxyion). Las barras marcadas con (*) indican que existe diferencia significativa al final del tratamiento. Las barras marcadas con (*) indican que existen diferencias significativas entre los días de almacenamiento.

6.1.3.2 Cambios en la acidez titulable

El análisis de varianza de los datos de acidez titulable de todos los tratamientos almacenados a 12 °C mostró diferencias altamente significativas para los tres factores analizados (tipo de atmosfera, sistema de cultivo y días de almacenamiento) (Anexo 2). Mientras que las muestras transferidas de 12 a 20 °C solamente indicaron cambios significativos durante los días de almacenamiento; el sistema de cultivo y la atmósfera utilizada no mostraron efectos significativos entre los tratamientos de conservación analizados (Anexo 2).

La comparación global de las muestras de tomate convencional y orgánico mostraron diferencias significativas en el contenido de acidez indicando que el tomate del sistema orgánico tuvo una mayor acidez respecto de las muestras del sistema convencional (4.4 y 4.2 % de ácido cítrico, respectivamente). No obstante, la comparación de medias entre cada tratamiento y día de almacenamiento a 12 °C, no permitió hacer una clara diferencia entre los tratamientos (Cuadro 8); aunque se observa una tendencia de incremento de la acidez a medida que transcurrieron los días de almacenamiento a 12 °C (Figura 12). Los valores de acidez se encuentran distribuidos desde el día 12 hasta el día 24 donde se distinguen los tomates almacenados por 24 días de todos los tratamientos analizados, así como aquellos del día 18 procedentes del cultivo orgánico almacenados en aire que tuvieron el mayor contenido de acidez (Cuadro 8 y Figura 12). El incremento de acidez después del día 12 de almacenamiento, parece indicar que durante el climatérico hay una mayor actividad metabólica de degradación de almidón que genera un mayor

contenido de azúcares que son canalizados hacia el metabolismo respiratorio pero que después del climatérico no son metabolizados hacia la producción de CO₂ y ATP generando un mayor contenido de acidez. En la literatura para tomate indeterminado, Žnidarčič & Požrl (2006) no reportan cambios significativos en el contenido de acidez después de 15 días a 10 °C. Respecto de los efectos de especies reactivas de oxígeno, Tzortzakis et al., (2007) no encontraron diferencias de acidez en frutos de tomate almacenados en aire o en atmósferas de aire con 1 μmolmol⁻¹ de ozono; de igual forma Aguayo et al., (2006) no encontraron diferencias importantes en los contenidos de ácido málico y cítrico en tomates 'Thomas' enteros y en rebanadas.

Cuadro 8. Comparación de medias de la acidez titulable de tomates de racimo 'Merlice' de sistemas hidropónicos convencionales u orgánicos almacenados en aire (control) o en aire + ROS (Oxyion) a 12 °C durante 24 días y sus transferencias de 12 °C + 6 días a 20 °C

12 °C		12 °C + 6d 20 °C	
Control, Orgánico, 18	0.41 ^a	Oxyion, Convencional, 18	0.46 ^a
Control, Convencional, 24	0.40 ^{ab}	Oxyion, Orgánico, 6	0.42 ^{ab}
Oxyion, Convencional, 24	0.40 ^{ab}	Control, Orgánico, 12	0.41 ^{ab}
Oxyion, Orgánico, 24	0.40 ^{abc}	Control, Orgánico, 18	0.41 ^{ab}
Control, Orgánico, 24	0.40 ^{abcd}	Control, Orgánico, 24	0.39 ^{bc}
Control, Orgánico, 6	0.38 ^{abcde}	Control, Convencional, 18	0.38 ^{bc}
Control, Orgánico, 12	0.37 ^{abcde}	Oxyion, Orgánico, 18	0.38 ^{bc}
Oxyion, Convencional, 12	0.37 ^{abcde}	Control, Convencional, 24	0.38 ^{bc}
Control, Convencional, 12	0.37 ^{abcdef}	Control, Orgánico, 6	0.37 ^{bc}
Oxyion, Convencional, 6	0.36 ^{bcdefg}	Control, Convencional, 12	0.37 ^{bc}
Control, Orgánico, 0	0.35 ^{cdefgh}	Oxyion, Convencional, 24	0.37 ^{bc}
Oxyion, Convencional, 18	0.35 ^{cdefgh}	Oxyion, Orgánico, 24	0.37 ^{bc}
Oxyion, Orgánico, 6	0.35 ^{cdefgh}	Control, Convencional, 6	0.37 ^{bc}
Control, Convencional, 0	0.35 ^{defgh}	Oxyion, Convencional, 6	0.37 ^{bc}
Oxyion, Orgánico, 12	0.34 ^{efgh}	Oxyion, Convencional, 12	0.35 ^{bc}

Oxyion, Orgánico, 18	0.34 ^{efgh}	Oxyion,Orgánico,12	0.33 ^c
Control, Convencional, 6	0.34 ^{efgh}		
Oxyion, Orgánico, 0	0.33 ^{fgh}		
Oxyion, Convencional, 0	0.32 ^{gh}		
Control, Convencional, 18	0.31 ^h		

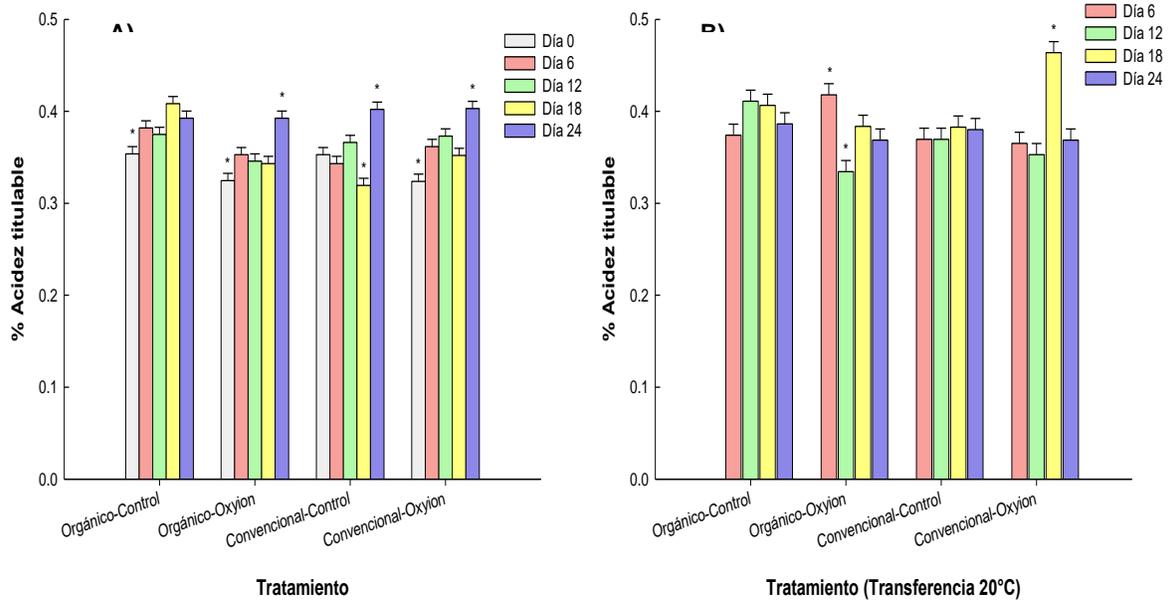


Figura 12. Cambios en el contenido de acidez titulable de muestras de tomate de racimo cv 'Merlice' procedentes de sistemas de cultivo hidropónico convencional y orgánico; almacenados a 12 °C (A) en atmósferas con aire (control) y en atmósferas de aire con especies reactivas de oxígeno y durante sus transferencias de 12 a 20 °C (B). Las barras marcadas con (*) indican diferencias significativas entre los días de almacenamiento.

6.1.3.3 Cambios en el Índice de Sabor

El análisis de varianza de los datos de Índice de sabor, ($^{\circ}\text{Bx}/\text{Acidez}$), de todos los tratamientos almacenados a 12 °C, indicó que el sistema de cultivo, los días de almacenamiento y la interacción almacenamiento*sistema de cultivo*días de

almacenamiento fueron altamente significativas (Anexo 2). De manera similar, para las muestras transferidas de 12 a 20 °C también mostraron diferencias altamente significativas para los mismos factores (Anexo 2).

La comparación de medias (Cuadro 9) muestra que los tomates orgánicos almacenados en aire a 12 °C mostraron los valores más bajos del Índice de sabor mientras que los tomates convencionales almacenados en aire o con ROS tendieron a mostrar los valores más altos. Un comportamiento similar se observó en los frutos transferidos de 12 a 20 °C; no obstante, en estas muestras los valores más altos se registraron a los 24 días de almacenamiento.

Cuadro 9. Comparación de medias del índice sabor (°Bx/acidez) de tomates de racimo ‘Merlice’ de sistemas hidropónicos convencionales u orgánicos almacenados en aire (control) o en aire + ROS (Oxyion) a 12 °C durante 24 días y sus transferencias de 12 °C + 6 días a 20 °C

12 °C		12 °C + 6d 20 °C	
Oxyion, Convencional, 12	13.8 ^a	Oxyion, Convencional, 24	14.0 ^a
Control, Convencional, 12	13.7 ^a	Oxyion, Convencional, 12	13.0 ^{ab}
Control, Convencional, 18	13.4 ^a	Oxyion, Orgánico, 24	12.8 ^{abc}
Control, Orgánico, 12	13.4 ^{ab}	Control, Convencional, 12	12.8 ^{abcd}
Oxyion, Orgánico, 18	12.9 ^{abc}	Control, Convencional, 24	12.4 ^{abcde}
Control, Convencional, 6	12.5 ^{abcd}	Oxyion, Orgánico, 12	12.4 ^{abcde}
Oxyion, Orgánico, 12	12.4 ^{abcde}	Oxyion, Convencional, 6	12.2 ^{abcde}
Oxyion, Convencional, 0	12.4 ^{abcde}	Control, Convencional, 6	12.0 ^{abcde}
Oxyion, Orgánico, 0	12.3 ^{abcde}	Control, Orgánico, 24	12.0 ^{abcde}
Control, Convencional, 0	12.2 ^{abcde}	Oxyion, Orgánico, 18	11.6 ^{abcde}
Oxyion, Convencional, 6	11.9 ^{abcdef}	Control, Convencional, 18	11.2 ^{bcde}
Oxyion, Convencional, 18	11.4 ^{bcdefg}	Oxyion, Convencional, 18	11.2 ^{bcde}
Oxyion, Orgánico, 6	11.3 ^{cdefg}	Control, Orgánico, 6	10.7 ^{bcde}
Control, Convencional, 24	11.0 ^{cdefg}	Control, Orgánico, 12	10.4 ^{cde}
Oxyion, Convencional, 24	11.0 ^{cdefg}	Oxyion, Orgánico, 6	10.3 ^{de}
Oxyion, Orgánico, 24	10.6 ^{defg}	Control, Orgánico, 18	10.2 ^e

Control, Orgánico, 0	10.5 ^{defg}
Control, Orgánico, 6	10.5 ^{efg}
Control, Orgánico, 18	10.2 ^{fg}
Control, Orgánico, 24	9.8 ^g

La Figura 13, muestra que los valores más altos de índice de sabor (13.4 – 13.8) se presentaron el día 12 para el almacenamiento a 12°C, mientras que los frutos transferidos a 20 °C, el valor más alto se registró al final del almacenamiento en tomate convencional almacenado en aire con ROS; el resto de los valores fue similar entre días de almacenamiento, sistemas de cultivo y tipo de almacenamiento. Al final del almacenamiento a 12 °C se observaron valores menores, mientras que en los días 12 y 18 el sabor de los frutos fue más alto.

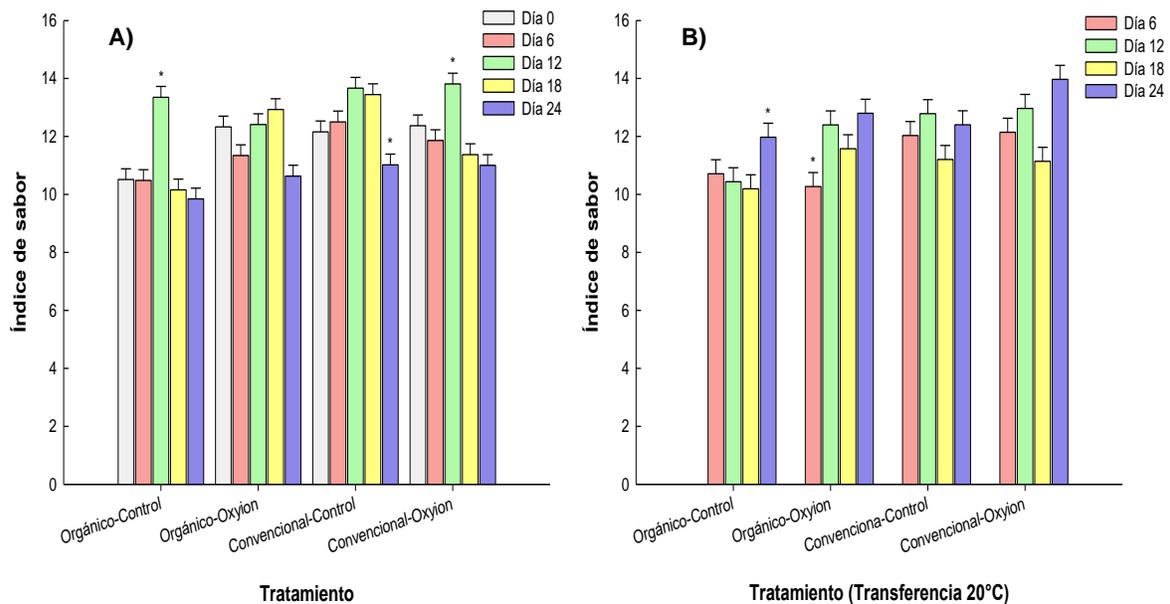


Figura 13. Cambios en el índice de sabor de muestras de tomate de racimo cv ‘Merlice’ procedentes de sistemas de cultivo hidropónico convencional y orgánico; almacenados a 12 °C (A) en atmósferas con aire (control) y en atmósferas de aire con especies reactivas de oxígeno y durante sus transferencias de 12 a 20 °C (B).

Las barras marcadas con (*) indican que existen diferencias significativas entre los días de almacenamiento.

6.1.3.4 Cambios en la apariencia visual y color de los frutos.

Durante el almacenamiento de los frutos en todos los tratamientos, se observó una evolución del color hacia el rojo (Figura 14) indicando una pérdida de clorofila y una síntesis de licopeno responsable del color rojo del tomate; en el día 24 se presentó las tonalidad rojas más intensas. No obstante, no se observaron diferencias entre los tratamientos aplicados.

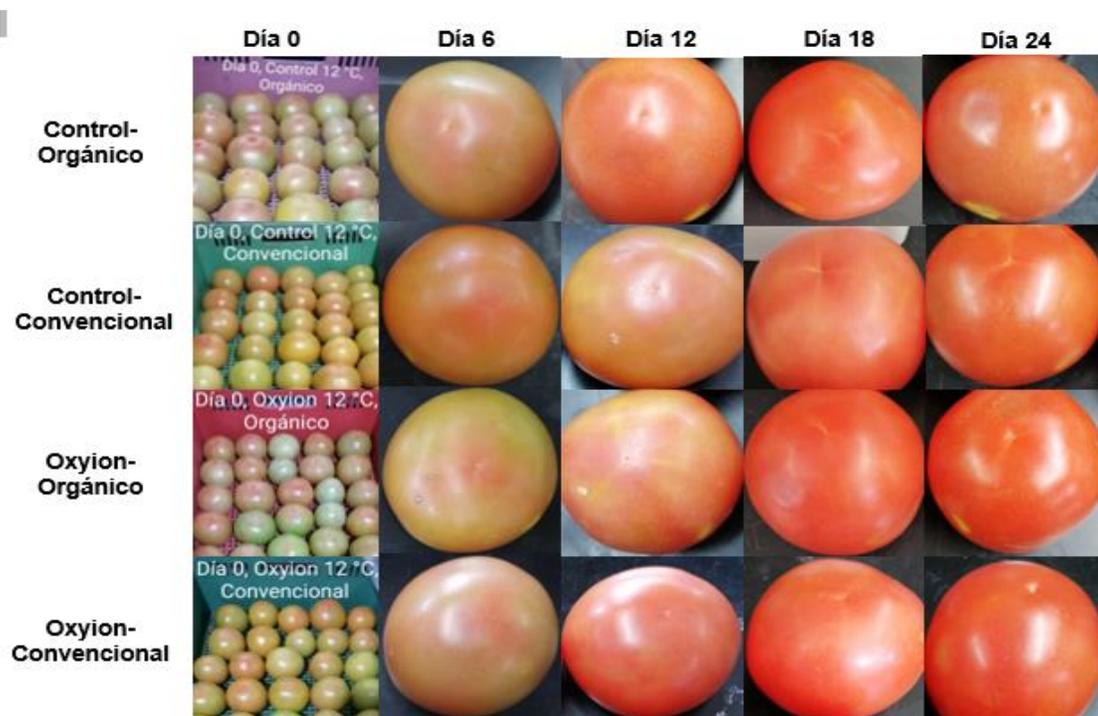


Figura 14. Cambios en la calidad visual de frutos de tomate en racimo cv 'Merlice' cultivados en sistemas hidropónicos orgánico y convencional durante su almacenamiento a 12 °C en aire (control) y en atmósferas ricas en especies reactivas de oxígeno (Oxyion).

El análisis de varianza aplicado a los datos objetivos de la medición de color (a^*/b^* , croma o C^* y el valor de hue) indicaron diferencias significativas debidas al sistema de cultivo y días de almacenamiento, así como las interacciones tipo de

almacenamiento* sistema de cultivo y tipo de almacenamiento*días; mientras que no se encontró diferencia entre el sistema de almacenamiento (Anexo 2).

La comparación de medias del valor de cromaticidad C* señala claramente que los valores más altos se registraron en el día 24 y los menores en el día 0 y que este comportamiento fue independiente del sistema de cultivo y del tipo de atmósfera empleada para conservar los racimos de tomate (Cuadro 10).

Cuadro 10. Comparación de medias de los valores de cromaticidad (C*) en tomates de racimo cv 'Merlice' cultivado en sistema hidropónico convencional u orgánico, almacenado a 12 °C y sus transferencias de 12 a 20 °C en ambientes de aire (control) o en aire + especies reactivas de oxígeno(Oxyion).

12 °C		12 °C + 6d 20 °C	
Control, Convencional, 24	31.1 ^a	Oxyion, Orgánico, 18	29.8 ^a
Oxyion, Orgánico, 24	30.4 ^{ab}	Oxyion, Orgánico, 24	29.7 ^a
Oxyion, Convencional, 24	30.2 ^{ab}	Control, Convencional, 18	29.7 ^a
Control, Orgánico, 24	29.0 ^{abc}	Oxyion, Convencional, 18	29.6 ^{ab}
Control, Convencional, 6	27.3 ^{abcd}	Oxyion, Convencional, 24	29.3 ^{ab}
Control, Convencional, 18	27.2 ^{abcd}	Control, Orgánico, 24	28.7 ^{abc}
Oxyion, Convencional, 12	26.8 ^{abcde}	Control, Convencional, 12	27.8 ^{abcd}
Oxyion, Orgánico, 18	25.6 ^{abcdef}	Control, Convencional, 24	27.7 ^{abcd}
Oxyion, Orgánico, 12	25.5 ^{abcdef}	Control, Orgánico, 18	26.9 ^{abcd}
Oxyion, Convencional, 18	25.2 ^{bcdefg}	Oxyion, Orgánico, 12	26.8 ^{abcd}
Control, Orgánico, 18	24.4 ^{cdefgh}	Control, Orgánico, 12	26.6 ^{abcd}
Control, Convencional, 12	23.3 ^{defgh}	Oxyion, Convencional, 6	25.8 ^{abcd}
Control, Orgánico, 12	23.0 ^{defgh}	Oxyion, Orgánico, 6	25.5 ^{abcd}
Control, Convencional, 0	22.9 ^{defgh}	Oxyion, Convencional, 12	24.7 ^{bcd}
Control, Orgánico, 6	22.8 ^{defgh}	Control, Orgánico, 6	24.0 ^{cd}
Control, Orgánico, 0	21.6 ^{efgh}	Control, Convencional, 6	23.8 ^d
Oxyion, Orgánico, 6	21.3 ^{efgh}		
Oxyion, Convencional, 6	20.3 ^{fgh}		

Oxyion, Convencional, 0 19.8^{gh}

Oxyion, Orgánico, 0 19.5^h

Los valores de cromaticidad (Figura 15) más altos se observaron en el día 24 (final del almacenamiento) a temperaturas de 12°C, esto nos indica que se observaron las tonalidades más fuertes del color rojo, ya que esto está relacionado con la maduración del fruto, conforme madura el fruto con el paso de los días se tornan a tonalidades más rojas de las cuales son responsables pigmentos como el licopeno y caroteno. Independientemente del sistema del cultivo y tipo de tratamiento aplicado el comportamiento fue el mismo en el almacenamiento; mientras que en las transferencias a 20°C no hubo diferencia significativa tal como se muestra en la figura 15a, este comportamiento puede ser relacionado a que desde el día 6 de transferencia los valores de Chroma ya eran altos por la acelerada maduración que se lleva a cabo por efecto de la temperatura, por ello no se muestra diferencia significativa entre los sistemas de cultivo, tratamiento y día de almacenamiento.

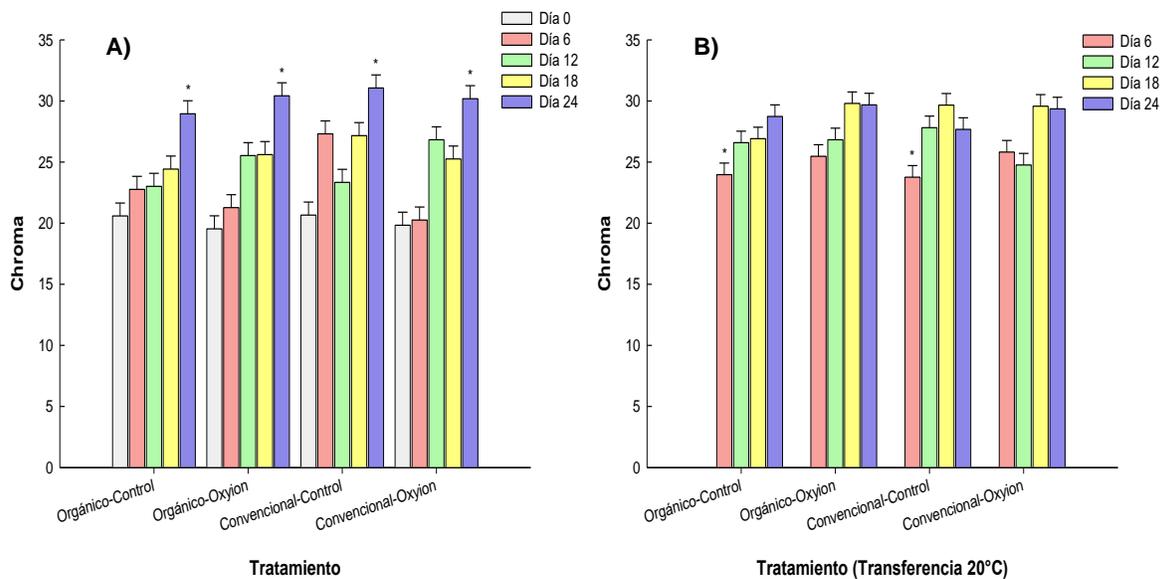


Figura 15. Cambios en el valor Cromo de tomate en racimo cv ‘Merlice’ procedentes de sistemas de cultivo hidropónico convencional y orgánico; almacenados a 12 °C (A) en atmósferas con aire (control) y en atmósferas de aire con especies reactivas

de oxígeno y durante sus transferencias de 12 a 20 °C (B). Las barras marcadas con (*) indican que existen diferencias significativas entre los días de almacenamiento.

Se han reportado los efectos de la presencia cíclica de 4.5 μLL^{-1} de ozono en el aire de conservación cada 3 horas sobre el valor de croma en frutos de tomate entero y en rebanadas y no se observaron diferencias estadísticas atribuibles a la presencia de esta especie reactiva y si a la evolución que presenta el color durante el periodo de conservación (Aguayo et al., 2006). Este comportamiento coincide con lo descrito en este trabajo y señala que el proceso de cambio de color no parece ser alterado por la presencia de especies reactivas de oxígeno en las concentraciones utilizadas.

Cuadro 11. Cambios en los valores de croma y ángulo de matiz de tomate de racimo cv 'Merlice' cultivados en sistemas hidropónicos convencional y orgánico, al inicio del almacenamiento (día 0) y después de 24 días de almacenamiento a 12 °C en aire (grupo control) y en atmósferas ricas en especies reactivas de oxígeno (Oxyion) Letras iguales en la misma columna, indican que no hubo diferencias estadísticamente significativas.

	Día 0		Día 24	
	Chroma	Ángulo de matiz	Chroma	Ángulo de matiz
Orgánico-Control	20.58 ± 1.06 ^a	99.03 ± 2.02 ^a	28.95 ± 1.06 ^a	46.60 ± 2.02 ^{ab}
Orgánico-Oxyion	19.53 ± 1.06 ^a	101.99 ± 2.02 ^a	30.42 ± 1.06 ^a	40.97 ± 2.02 ^b
Convencional-Control	20.66 ± 1.06 ^a	100.27 ± 2.02 ^a	31.06 ± 1.06 ^a	50.19 ± 2.02 ^a
Convencional-Oxyion	19.83 ± 1.06 ^a	99.26 ± 2.02 ^a	30.18 ± 1.06 ^a	44.22 ± 2.02 ^{ab}

6.2 Cambios en el contenido de Licopeno.

El análisis general de varianza del contenido de licopeno durante el almacenamiento de los racimos de tomate 'Merlice' bajo los diferentes tratamientos estudiados y almacenados a 12 °C como en sus transferencias de 12 a 20 °C; señaló que todos

los factores (atmósfera de conservación, sistema de cultivo, tiempo de almacenamiento y las interacciones entre los factores) tuvieron un efecto altamente significativo (Anexo 2).

Este análisis general señaló que durante el almacenamiento a 12 °C. los tomates producidos en sistemas orgánicos mostraron mayor contenido de licopeno que aquellos producidos en el sistema convencional (9.9 y 8.8 respectivamente), de igual forma los racimos almacenados en atmósferas ricas en ROS mostraron un mayor contenido del compuesto respecto de aquellos racimos almacenados en aire (10.2 y 8.5 respectivamente), además se observó que el licopeno se incrementó durante el almacenamiento desde 1.7 en el día 0 hasta 16.7 mg/100 g en el día 24. Durante la transferencia de 12 a 20 °C; también el cultivo orgánico mostró un mayor contenido de licopeno comparado con tomates del cultivo convencional, (22.9 y 21.0 mg/100g respectivamente); además, los racimos almacenados en atmósferas con ROS también mostraron un mayor contenido de este compuesto respecto de su almacenamiento en aire solamente, (23.9 y 20.0 respectivamente). Durante el almacenamiento el contenido de licopeno se incrementó a medida que transcurrieron los periodos de almacenamiento desde 8.0 en el día 6 hasta 27.0 mg/100 g en el día 24. El incremento del contenido de licopeno durante la maduración y almacenamiento de tomate ha sido reportado por otros autores (Clinton, 1998; García et al., 2011).

Dado que todos los factores tuvieron una alta significancia estadística. la comparación de medias de la interacción de todos los factores es la que nos muestra de manera específica los comportamientos de cada uno de los tratamientos durante su almacenamiento a 12 °C y durante su transferencia de 12 a 20 °C (Cuadro 12).

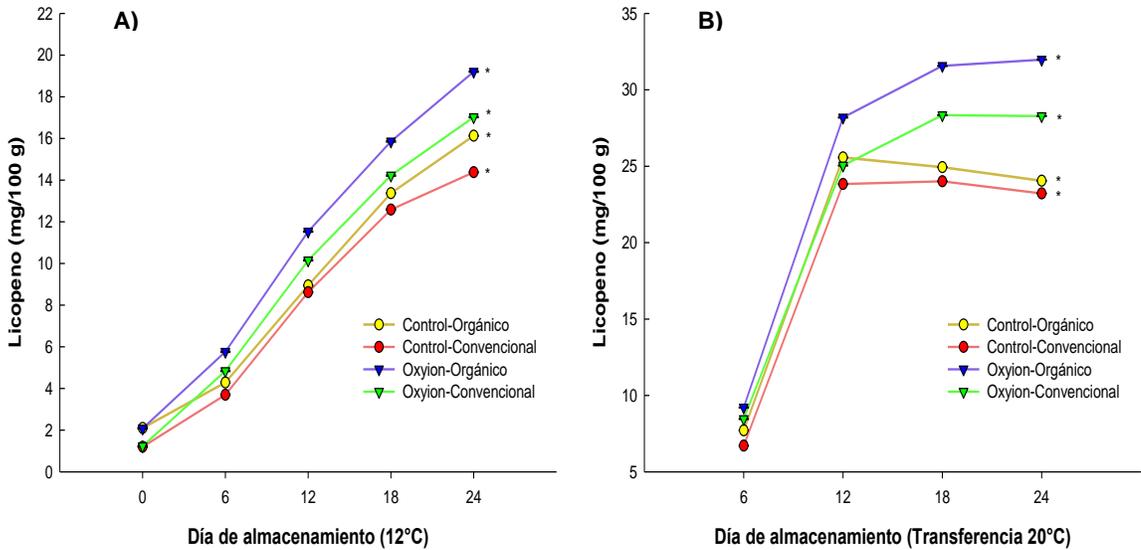
Cuadro 12. Comparación de medias del contenido de licopeno en frutos de tomate 'Merlice' producidos por hidroponía en sistemas convencional u orgánico, almacenados durante 24 días en aire (control) o en aire con especies reactivas de oxígeno (Oxyion) a 12 °C y su transferencia por 6 días de 12 a 20 °C.

12 °C		12 °C + 6d 20 °C	
Oxyion, Orgánico, 24	19.20 ^a	Oxyion, Orgánico, 24	31.98 ^a
Oxyion, Convencional, 24	17.03 ^b	Oxyion, Orgánico, 18	31.56 ^a
Control, Orgánico, 24	16.13 ^b	Oxyion, Convencional, 18	28.34 ^b
Oxyion, Orgánico, 18	15.86 ^{bc}	Oxyion, Convencional, 24	28.29 ^b
Control, Convencional, 24	14.38 ^{cd}	Oxyion, Orgánico, 12	28.19 ^b
Oxyion, Convencional, 18	14.22 ^d	Control, Orgánico, 12	25.57 ^c
Control, Orgánico, 18	13.37 ^{de}	Oxyion, Convencional, 12	25.05 ^{cd}
Control, Convencional, 18	12.59 ^{ef}	Control, Orgánico, 18	24.94 ^{cd}
Oxyion, Orgánico, 12	11.53 ^{fg}	Control, Orgánico, 24	24.05 ^{cd}
Oxyion, Convencional, 12	10.15 ^{gh}	Control, Convencional, 18	24.01 ^{cd}
Control, Orgánico, 12	8.95 ^h	Control, Convencional, 12	23.83 ^{cd}
Control, Convencional, 12	8.62 ^h	Control, Convencional, 24	23.22 ^d
Oxyion, Orgánico, 6	5.76 ⁱ	Oxyion, Orgánico, 6	9.21 ^e
Oxyion, Convencional, 6	4.84 ^{ij}	Oxyion, Convencional, 6	8.46 ^{ef}
Control, Orgánico, 6	4.29 ^{ij}	Control, Orgánico, 6	7.72 ^{ef}
Control, Convencional, 6	3.70 ^{jk}	Control, Convencional, 6	6.71 ^f
Control, Orgánico, 0	2.10 ^{kl}		
Oxyion, Orgánico, 0	2.09 ^{kl}		
Oxyion, Convencional, 0	1.23 ^l		
Control, Convencional, 0	1.20 ^l		

Los resultados de las muestras almacenadas a 12 ° C como de aquellas de transferencia de 12 a 20 °C, indican que el licopeno se sintetiza durante el almacenamiento (climaterio) y que por ello se observan mayores contenidos a los 24 días de almacenamiento. No obstante, es interesante notar, que los tomates producidos bajo el sistema orgánico y almacenados en atmósferas con ROS

mostraron mayores contenidos de licopeno respecto de aquellos producidos bajo el sistema convencional y almacenados en atmósferas de aire (Figura 16).

Figura 16. Cambios en los contenidos de licopeno en tomate de racimo cv ‘Merlice’^{*} producidos en hidropoía en sistema convencional u orgánico y almacenados en



aire (control) o en aire con especies reactivas de oxígeno (Oxyion), durante su almacenamiento a 12 °C (A) y sus transferencias de 12 a 20 °C (B). Las líneas marcadas con (*) al final del tratamiento indican que existe diferencia significativa.

Por otro lado, los tomates del sistema convencional almacenados en aire o con aire con ROS, así como los tomates orgánicos almacenados en aire no mostraron este comportamiento y sus contenidos de licopeno estuvieron por debajo de los tomates orgánicos almacenados en aire con especies reactivas de oxígeno.

Estos resultados llaman la atención, dado que el tomate orgánico se encuentra en estrés nutricional y que al someterlo a un almacenamiento con ROS estaría bajo un estrés oxidativo adicional que debería inducir la disminución de compuestos susceptibles a la oxidación como el licopeno, no obstante, parece que esas condiciones inducen la biosíntesis de licopeno. Estos resultados parecen mostrar que las condiciones de estrés nutricional durante el cultivo, así como el estrés

oxidativo durante el almacenamiento parecen inducir una mayor síntesis de licopeno en los frutos. Zhi-Wei et al., (2008) describen trabajos con el alga *Dunaliella* en la que las ROS funcionan como moléculas mensajeras en sistemas fisiológicos bajo estrés y están involucradas en el arranque de la acumulación de carotenoides, los cuales se forman conforme va madurando el fruto, es decir, predomina el color rojo con la maduración del fruto, y esto a su vez aumenta el contenido de los carotenoides, entre ellos el licopeno (Clinton, 1998). El aumento del contenido de licopeno en los frutos almacenados en atmósferas ricas en ROS, puede ser atribuido al aumento de estrés que estos presentan. Ya que, al ser sometidos a un estrés oxidativo el sistema antioxidante es encendido, el cual es el encargado de combatir los escenarios que se presenten de estrés, y de esta forma aumentar el contenido de compuestos antioxidantes como el licopeno. Vinha et al., (2014), realizaron un estudio comparativo entre tomates orgánicos y convencionales, demostrando que los frutos orgánicos presentaron un incremento del 20% en el contenido de licopeno; esto sugiere que la agricultura orgánica presenta mayores niveles de estrés.

El incremento del contenido de licopeno conforme transcurre el almacenamiento (Figura 16) está de acuerdo a lo reportado por Helyes & Lugasi (2006), quienes señalaron que el cambio más significativo que se presenta durante la maduración del tomate es el aumento de licopeno.

6.3 Cambios en el contenido de Vitamina C.

El análisis estadístico de los contenidos de ácido ascórbico o vitamina C en todos los tratamientos, señaló diferencias estadísticas altamente significativas de todos los factores analizados (Anexo 2)

La comparación de medias de los contenidos de Vitamina C en los frutos almacenados a 12 °C señaló que las muestras de cultivo orgánico almacenadas en atmósferas con ROS por 18 y 24 días tuvieron los contenidos más altos (Cuadro 13); a los que les siguieron las muestras de tomate convencional de 24 días en aire con ROS y los tomates orgánicos almacenados en aire. Las muestras con menores

contenidos de esta vitamina correspondieron a los tomates orgánicos y convencionales almacenados en atmósferas de aire por 0 y 6 días.

En las transferencias de 12 a 20 °C, los frutos de cultivo orgánico y convencional almacenados por 24 días en atmósferas con aire con ROS mostraron los valores más altos a los que les siguieron las muestras de frutos de cultivo convencional y orgánico almacenadas por periodos más cortos de almacenamiento. Los valores más bajos se registraron en frutos de cultivo convencional y orgánico a los 6 días de almacenamiento.

Vinha et al. (2014) indicaron que el contenido de ácido ascórbico en frutos de tomate orgánicos presentó un 26 % más de este compuesto en comparación con los tomates convencionales. En este estudio, al final del almacenamiento los frutos orgánicos también presentaron niveles más altos de vitamina C, sin embargo, los almacenados en cámara con ROS presentaron un incremento del 11.5% respecto de los frutos almacenados en aire; mientras que los frutos convencionales almacenados con atmósferas ricas en ROS también presentaron un incremento del 11.5 % respecto de los almacenados en aire. Periago et al. (2002), reportaron que las condiciones de estrés favorecen la generación de compuestos antioxidantes como el licopeno, y la vitamina C; por ello los frutos en una condición de estrés oxidativo, tenderán a mostrar mayores contenidos de esta vitamina. Helyes & Lugasi (2006), señalaron que la presencia de vitamina C podría ser responsable para la protección de las células contra los ataques de radicales libres.

Cuadro 13. Comparación de medias del contenido de vitamina C en frutos de tomate ‘Merlice’ producidos por hidroponía en sistemas convencional u orgánico, almacenados durante 24 días en aire (control) o en aire con especies reactivas de oxígeno (Oxyion) a 12 °C y su transferencia por 6 días de 12 a 20 °C.

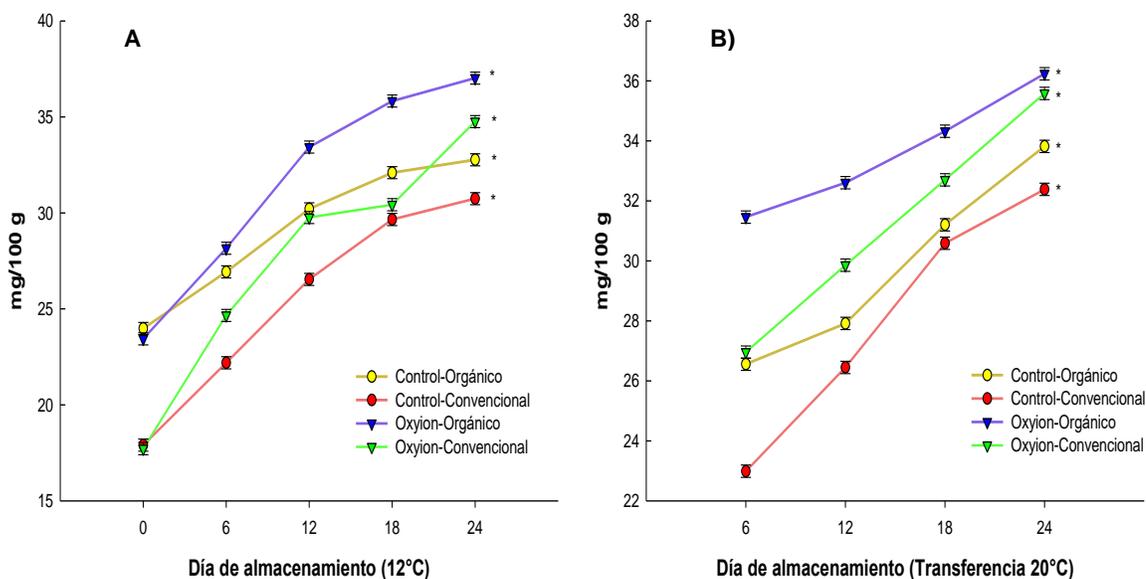
12 °C		12 °C + 6d 20 °C	
Oxyion, Orgánico, 24	37.02 ^a	Oxyion, Orgánico, 24	36.24 ^a

Oxyion, Orgánico, 18	35.83 ^{ab}	Oxyion, Convencional, 24	35.58 ^{ab}
Oxyion, Convencional, 24	34.76 ^{abc}	Oxyion, Orgánico, 18	34.32 ^{abc}
Oxyion, Orgánico, 12	33.43 ^{abcd}	Control, Orgánico, 24	33.82 ^{abcd}
Control, Orgánico, 24	32.77 ^{abcde}	Oxyion, Convencional, 18	32.70 ^{abcd}
Control, Orgánico, 18	32.10 ^{abcdef}	Oxyion, Orgánico, 12	32.61 ^{abcd}
Control, Convencional, 24	30.74 ^{bcdefg}	Control, Convencional, 24	32.39 ^{abcd}
Oxyion, Convencional, 18	30.43 ^{bcdefg}	Oxyion, Orgánico, 6	31.46 ^{abcd}
Control, Orgánico, 12	30.21 ^{bcdefg}	Control, Orgánico, 18	31.20 ^{abcd}
Oxyion, Convencional, 12	29.76 ^{bcdefgh}	Control, Convencional, 18	30.58 ^{abcde}
Control, Convencional, 18	29.66 ^{cdefgh}	Oxyion, Convencional, 12	29.86 ^{abcde}
Oxyion, Orgánico, 6	28.16 ^{defghi}	Control, Orgánico, 12	27.91 ^{bcde}
Control, Orgánico, 6	26.93 ^{efghi}	Oxyion, Convencional, 6	26.96 ^{cde}
Control, Convencional, 12	26.53 ^{fghi}	Control, Orgánico, 6	26.56 ^{cde}
Oxyion, Convencional, 6	24.66 ^{ghi}	Control, Convencional, 12	26.45 ^{de}
Control, Orgánico, 0	23.98 ^{hij}	Control, Convencional, 6	22.99 ^e
Oxyion, Orgánico, 0	23.44 ^{ijk}		
Control, Convencional, 6	22.19 ^{ijk}		
Control, Convencional, 0	17.90 ^{jk}		
Oxyion, Convencional, 0	17.72 ^k		

Durante el almacenamiento a 12 °C y su transferencia a 20 °C, se observó un incremento constante de esta vitamina conforme transcurrió el periodo de almacenamiento (Figura 17), aunque este incremento fue más notable en las muestras de cultivo orgánico almacenadas en aire con ROS aunque sus contenidos iniciales fueron mayores que los frutos de cultivo convencional. En contraste, los frutos de cultivo convencional almacenados en atmósfera con aire fueron los que alcanzaron un menor contenido de esta vitamina aunque también su contenido inicial fue notablemente menor que los frutos de cultivo orgánico (Figura 17). Estos datos indicaron que los frutos orgánicos traen activada su síntesis de ácido

ascórbico probablemente debido al estrés que puede estar sufriendo durante su producción. Al final del almacenamiento se observaron diferencias significativas entre tratamientos, siendo los tomates orgánicos almacenados en aire con ROS los que presentaron los niveles más altos de vitamina C.

Figura 17. Cambios en los contenidos de vitamina C en tomate de racimo cv 'Merlice' producidos en hidroponía en sistema convencional u orgánico. Las líneas marcadas con (*) al final del tratamiento indican que existe diferencia significativa.



6.4 Cambios en la capacidad antioxidante por los métodos ABTS y DPPH

6.4.1 Capacidad antioxidante por método DPPH

La capacidad de atrapar radicales libres en una muestra se evalúa mediante el uso de moléculas donadoras de protones que evitan el desarrollo de reacciones en cadena por la presencia de radicales libres.

El análisis de varianza de los datos de capacidad antioxidante obtenidos por el método DPPH para las muestras almacenadas a 12 °C bajo los tratamientos estudiados, no indicó diferencias significativas entre el sistema de producción del tomate ni entre los ambientes de conservación de las muestras (aire o aire con ROS). No obstante, se observaron diferencias significativas durante los días de almacenamiento y su interacción con el sistema de cultivo.

Para las muestras transferidas de 12 a 20 °C, el análisis de varianza solo evidenció diferencias significativas para los días de almacenamiento y la interacción sistema de almacenamiento*días (Anexo 2).

La comparación de medias entre los tratamientos aplicados a 12 °C, señaló que a excepción del tratamiento de tomate convencional almacenado en aire por 12 días que registro los menores valores de capacidad antioxidante (525.4 Eq de Trolox), todos los demás tratamientos mostraron capacidades antioxidantes estadísticamente similares y cuyos valores variaron entre 625.3 – 790.0 Eq. de Trolox (Cuadro 14 y Figura 18). No obstante, esta misma comparación de medias muestra que los tomates convencionales almacenados en aire disminuyeron su capacidad antioxidante observada el día 0 y 6 hasta los valores que se muestran en el día 12 recuperándose después de ese periodo.

Las muestras transferidas por 6 días de 12 a 20 °C, también mostraron capacidades antioxidantes estadísticamente iguales entre todos los tratamientos (Cuadro 15) variando sus valores desde 633 – 755 Eq de Trolox. No obstante, en el día 12, tanto los tomates orgánicos como los convencionales almacenados en aire mostraron las más bajas capacidades antioxidantes (Figura 18). Estos datos indican que la capacidad antioxidante, determinada por este método, no se ve afectada significativamente durante la comercialización ni por el sistema de cultivo ni por la presencia de especies reactivas de oxígeno en el ambiente.

Cuadro 14. Comparación de medias de la capacidad antioxidante, por el método DPPH, de tomate de racimo cv 'Merlice' procedente de sistemas de producción hidropónico convencional y orgánico almacenados en aire, (control) o en aire con especies reactivas de oxígeno, (Oxyion), a 12 °C y sus transferencias de 12 a 20 °C durante 24 días.

12 °C		12 °C + 6d 20 °C	
Oxyion, Orgánico, 24	790.0 ^a	Control, Orgánico, 24	755.3 ^a
Control, Convencional, 6	755.1 ^a	Control, Orgánico, 6	728.2 ^{ab}
Oxyion, Convencional, 18	740.9 ^a	Control, Orgánico, 18	724.5 ^{ab}
Control, Convencional, 0	725.1 ^a	Control, Convencional, 6	723.2 ^{ab}
Oxyion, Orgánico, 6	672.2 ^{ab}	Oxyion, Orgánico, 18	700.7 ^{abc}
Control, Orgánico, 24	671.2 ^{ab}	Oxyion, Orgánico, 6	685.3 ^{abc}
Control, Convencional, 24	663.9 ^{ab}	Control, Convencional, 18	684.9 ^{abc}
Control, Orgánico, 0	663.7 ^{ab}	Oxyion, Convencional, 6	679.1 ^{abc}
Control, Convencional, 18	662.8 ^{ab}	Oxyion, Convencional, 24	676.8 ^{abc}
Control, Orgánico, 12	662.4 ^{ab}	Oxyion, Convencional, 18	671.2 ^{abc}
Oxyion, Orgánico, 0	662.2 ^{ab}	Control, Convencional, 24	667.3 ^{abc}
Control, Orgánico, 6	652.1 ^{ab}	Oxyion, Orgánico, 12	656.0 ^{abc}
Oxyion, Convencional, 12	651.9 ^{ab}	Oxyion, Convencional, 12	654.9 ^{abc}
Oxyion, Orgánico, 18	651.5 ^{ab}	Oxyion, Orgánico, 24	633.0 ^{abc}
Control, Orgánico, 18	633.1 ^{ab}	Control, Convencional, 12	542.7 ^{bc}
Oxyion, Convencional, 0	628.6 ^{ab}	Control, Orgánico, 12	516.8 ^c
Oxyion, Convencional, 24	626.0 ^{ab}		
Oxyion, Convencional, 6	625.9 ^{ab}		
Oxyion, Orgánico, 12	625.3 ^{ab}		
Control, Convencional, 12	525.4 ^b		

Los datos aquí reportados coinciden con lo encontrado por Tzortzakis et al., (2007) quienes aplicaron atmósferas enriquecidas con ozono ($1 \mu\text{mol mol}^{-1}$ a $13 \text{ }^\circ\text{C}$) y no observaron cambios en la capacidad antioxidante de los frutos de tomate cv 'Carousel' quienes explicaron esos resultados señalando que la baja concentración de ozono aplicada no era capaz de desarrollar efectos negativos en el sistema fisiológico y bioquímico de los tejidos.

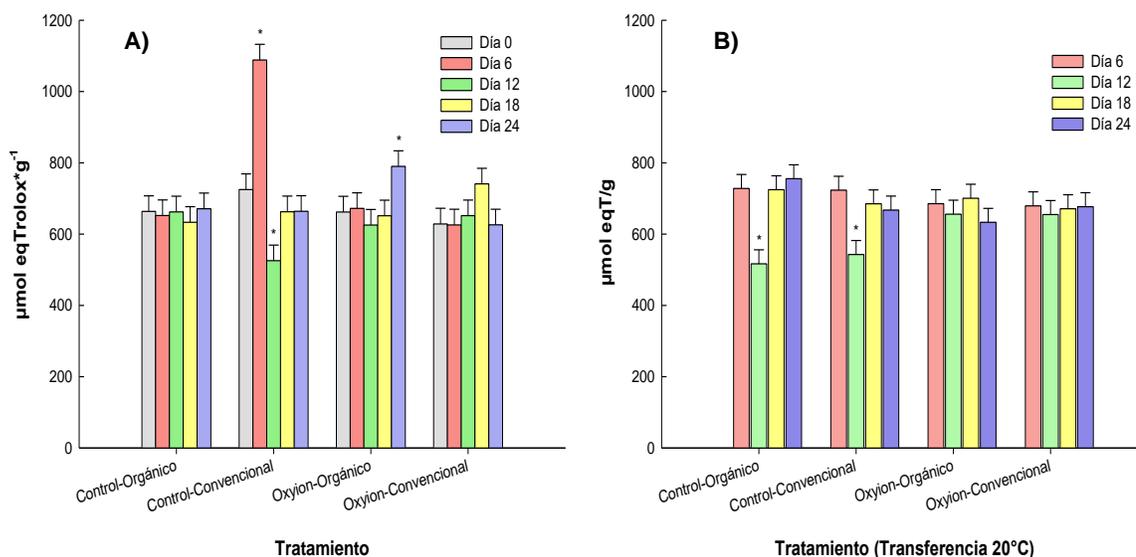


Figura 18. Cambios en la capacidad antioxidante por el método de DPPH de tomate en racimo cv 'Merlice' cultivados bajo los sistemas hidropónicos orgánico y convencional durante su de almacenamiento a $12 \text{ }^\circ\text{C}$ (A) y durante sus transferencias de 12 a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (B). Las barras marcadas con (*) indican que existen diferencias significativas entre los días de almacenamiento.

6.4.2 Capacidad antioxidante por el método ABTS.

El análisis de varianza de los datos de capacidad antioxidante obtenidos por el método ABTS para las muestras almacenadas a $12 \text{ }^\circ\text{C}$ bajo los tratamientos aplicados, tampoco indicó diferencias significativas entre el sistema de cultivo del tomate ni entre los ambientes de conservación de las muestras (aire o aire con

ROS). No obstante, también se observaron diferencias significativas durante los días de almacenamiento y la interacción días*sistema de cultivo. Para las muestras transferidas de 12 a 20 °C, el análisis de varianza no encontró diferencias significativas entre todos los tratamientos analizados (Anexo 2).

La comparación de medias entre los tratamientos aplicados a 12 °C señaló que a excepción de los tratamientos de tomates orgánico almacenado tanto en aire como en aire con ROS por 6 días presentaron las menores capacidades antioxidante (551.3 y 629.7 Eq. de Trolox) mientras que todos los demás tratamientos mostraron capacidades antioxidantes estadísticamente similares y cuyos valores variaron entre 685-810 Eq. de Trolox (Cuadro 15). No obstante, es posible observar que los tomates orgánicos almacenados en las dos atmosferas estudiadas, disminuyeron su capacidad antioxidante desde el día 0 hasta los 6 días de almacenamiento a 12 °C y esta se recuperó después de ese periodo. Este dato parece señalar un mayor estado de estrés del tomate orgánico (Barrett et al., 2007; Oliveira et al., 2013), que al verse sometido a condiciones de refrigeración o de ROS durante los primeros días de almacenamiento disminuye su capacidad antioxidante, aunque los datos posteriores señalan que esa capacidad se recupera (Figura 19).

Las muestras transferidas por 6 días de 12 a 20 °C mostraron capacidades antioxidantes estadísticamente iguales entre todos los tratamientos (715 – 794 Eq de Trolox). Estos datos indican que la capacidad antioxidante, determinada por este método, no se ve afectada durante el proceso de comercialización en los tomates producidos bajo ambos sistemas de producción ni por la presencia de ROS en el ambiente (Figura 19).

Cuadro 15. Comparación de medias de la capacidad antioxidante, por el método ABTS, de tomate de racimo cv 'Merlice' procedente de sistemas de producción hidropónico convencional y orgánico almacenados en aire, (control) o en aire con especies reactivas de oxígeno, (Oxyion), a 12 °C y sus transferencias de 12 a 20 °C durante 24 días.

12 °C		12 °C + 6d 20 °C	
Control, Convencional, 18	810.6 ^a	Oxyion, Orgánico, 6	794.7 ^a
Oxyion, Convencional, 18	805.3 ^a	Oxyion, Orgánico, 18	789.4 ^a
Oxyion, Orgánico, 12	804.4 ^a	Control, Orgánico, 24	784.1 ^a
Control, Convencional, 6	804.0 ^a	Control, Convencional, 24	774.3 ^a
Oxyion, Convencional, 12	798.0 ^a	Oxyion, Orgánico, 24	774.3 ^a
Control, Orgánico, 24	794.2 ^a	Oxyion, Convencional, 24	772.1 ^a
Oxyion, Orgánico, 18	782.7 ^a	Oxyion, Convencional, 18	769.5 ^a
Oxyion, Orgánico, 24	782.7 ^a	Oxyion, Orgánico, 12	767.7 ^a
Control, Orgánico, 18	779.6 ^a	Control, Convencional, 18	766.8 ^a
Control, Orgánico, 12	749.1 ^{ab}	Control, Orgánico, 12	765.0 ^a
Control, Convencional, 24	728.8 ^{ab}	Control, Orgánico, 18	763.3 ^a
Control, Convencional, 0	726.4 ^{ab}	Oxyion, Convencional, 6	761.5 ^a
Oxyion, Convencional, 6	720.4 ^{ab}	Control, Convencional, 12	738.5 ^a
Control, Orgánico, 0	712.0 ^{ab}	Control, Orgánico, 6	738.1 ^a
Control, Convencional, 12	709.8 ^{ab}	Control, Convencional, 6	737.6 ^a
Oxyion, Orgánico, 0	705.8 ^{ab}	Oxyion, Convencional, 12	715.5 ^a
Oxyion, Convencional, 24	690.3 ^{ab}		
Oxyion, Convencional, 0	685.4 ^{ab}		
Oxyion, Orgánico, 6	629.7 ^{bc}		
Control, Orgánico, 6	551.0 ^c		

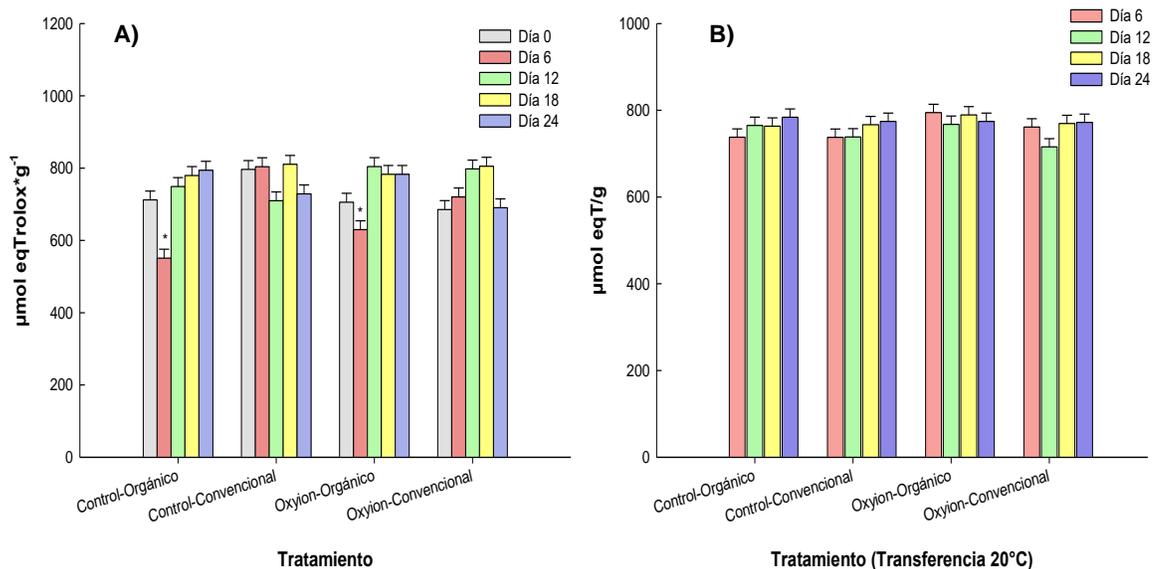


Figura 19. Capacidad antioxidante evaluada por el método de ABTS de frutos de tomate cv 'Merlice' producidos por hidroponía en sistema orgánico y convencional almacenados durante 24 días a 12 °C (A) y sus transferencias de 12 a 20 °C (B). Las barras marcadas con (*) indican que existen diferencias significativas entre los días de almacenamiento.

6.5 Cambios en la actividad específica de enzimas antioxidantes.

6.5.1 Cambios en la actividad específica de la Superóxido Dismutasa.

Independientemente de la condición impuesta en este proyecto, de evaluar ROS en la atmósfera de conservación para inducir cambios metabólicos que mejoren la vida de anaquel de los frutos; es importante señalar que las ROS se producen de manera natural dentro de los tejidos y estos están equipados con un sistema de defensa enzimático que limita la acumulación de estas especies al interior de los tejidos. Este sistema de defensa enzimático lo componen la superóxido dismutasa (SOD), la catalasa (CAT), la glutatión per oxidasa (GPX) y la ascorbato per oxidasa (APX)

Ighodaro y Akinloye (2018). Estas enzimas respectivamente dismutan el anión superóxido, degradan el peróxido de hidrógeno e hidroperóxidos generando moléculas mucho menos reactivas; por ello la evaluación de la actividad de cada una de estas enzimas, da una idea del estado en que se encuentran los tejidos para responder al ataque oxidativo de sus propios sistemas o de los impuestos por los sistemas de conservación.

El análisis de varianza general aplicado de los datos de actividad específica de la enzima superóxido dismutasa de todos los tratamientos aplicados indicó que bajo el almacenamiento continuo a 12 °C todos los factores, sistema de cultivo, ambiente de almacenamiento y la interacción sistema de almacenamiento*cultivo*días, mostraron diferencias estadísticas altamente significativas (Anexo 2).

Las muestras procedentes del sistema orgánico tuvieron valores de actividad específica de SOD mayores que las muestras del sistema convencional (58.8 a 34.9 UAE respectivamente). Por otro lado, durante el periodo de almacenamiento se observó un máximo de actividad en los días 12 y 18 (58.2 a 57.3 UAE) y valores menores en los días 6 y 24 y el mínimo el día 0 (31.0 UAE).

También en las muestras transferidas de 12 a 20 °C, el análisis de varianza general indicó que todos los factores analizados, (sistema de cultivo, ambiente de conservación y días de almacenamiento) y sus interacciones tuvieron efectos altamente significativos (Cuadro 16). También la actividad de esta enzima fue mayor en los tomates producidos bajo el sistema orgánico respecto de los tomates del sistema convencional (57.5 y 31.3 UAE respectivamente); de igual forma las muestras almacenadas en ambientes de aire con ROS mostraron una mayor actividad que las muestras almacenadas solo en aire (57.4 y 31.4 UAE respectivamente) y las muestras que se almacenaron durante 6 días a 12 °C que fueron transferidas a 20 °C por 6 días mostraron una actividad menor que las muestras que estuvieron por 12, 18 y 24 días a 12 °C y transferidas a 20 °C (34.9 hasta 48.7 UAE).

Cuadro 16. Comparación de medias de la actividad específica de la enzima SOD en tomate cv 'Merlice' producidos bajo invernadero hidropónico en sistemas convencional y orgánico y almacenados en atmosferas de aire (control) o con aire con especies reactivas de oxígeno (Oxyion) a 12 °C de forma continua o transferidos de 12 a 20 °C por 6 días.

12 °C		12 °C + 6d 20 °C	
Oxyion, Orgánico, 6	83.2 ^a	Oxyion, Orgánico, 24	76.5 ^a
Oxyion, Orgánico, 12	74.4 ^b	Oxyion, Orgánico, 18	72.1 ^{ab}
Control, Orgánico, 12	65.2 ^c	Oxyion, Orgánico, 12	70.5 ^{ab}
Oxyion, Orgánico, 18	64.8 ^c	Oxyion, Orgánico, 6	67.0 ^b
Oxyion, Convencional, 12	61.7 ^c	Oxyion, Convencional, 24	58.3 ^c
Oxyion, Convencional, 24	60.6 ^{cd}	Control, Orgánico, 12	54.4 ^{cd}
Control, Orgánico, 18	59.0 ^{cde}	Oxyion, Convencional, 18	49.4 ^{de}
Oxyion, Convencional, 18	58.8 ^{cde}	Oxyion, Convencional, 12	49.1 ^{de}
Oxyion, Orgánico, 24	53.3 ^{def}	Control, Orgánico, 6	48.2 ^e
Control, Convencional, 18	52.4 ^{ef}	Control, Orgánico, 18	42.0 ^f
Control, Orgánico, 0	51.8 ^{ef}	Control, Convencional, 24	30.5 ^g
Control, Orgánico, 6	50.9 ^f	Control, Orgánico, 24	29.6 ^g
Oxyion, Orgánico, 0	49.1 ^f	Control, Convencional, 18	24.8 ^g
Control, Orgánico, 24	36.6 ^g	Oxyion, Convencional, 6	16.5 ^h
Oxyion, Convencional, 6	28.1 ^h	Control, Convencional, 12	13.9 ^h
Control, Convencional, 12	27.8 ^h	Control, Convencional, 6	7.8 ⁱ
Control, Convencional, 24	23.3 ^h		
Control, Convencional, 6	13.0 ⁱ		
Control, Convencional, 0	11.6 ⁱ		
Oxyion, Convencional, 0	11.4 ⁱ		

En los primeros 12 días de almacenamiento, los frutos producidos bajo el sistema orgánico y almacenados en aire con ROS a 12 °C mostraron las actividades más

altas de esta enzima; de igual forma los tomates orgánicos almacenados en aire también mostraron actividades altas de esta enzima hasta el día 18 (Figura 20 y Cuadro 17). Estas altas actividades mostradas además de los altos datos de actividad al inicio del experimento indican un mayor estrés oxidativo en el sistema de producción orgánico en comparación con el sistema de producción convencional que mostraron valores iniciales más bajos. Estos datos confirman los resultados de Oliveira et al., (2013) quienes también informaron que en tomate cv 'Debora' cultivado orgánicamente a cielo abierto mostró mayor actividad de SOD en comparación con los tomates de plantas cultivadas por el sistema convencional interpretando que bajo el sistema orgánico hay una mayor producción de anión superóxido el cual por la acción de la SOD genera mayores cantidades de peróxido de hidrógeno.

Los frutos de tomate del sistema convencional almacenados en aire con ROS, también mostraron un incremento significativo de la actividad SOD, y alcanzo valores máximos a partir del día 12 hasta el día 24; estos datos señalan que la presencia de ROS inducen la actividad de la SOD como un mecanismo de defensa contra el estrés oxidativo impuesto por el ambiente de almacenamiento (Figura 20A) y también por el almacenamiento refrigerado a 12 °C puesto que las muestras conservadas en atmósferas de aire también se indujo el incremento de la actividad de la SOD; no obstante, las actividades fueron las más bajas en comparación con los otros tratamientos.

Todos estos datos señalan que el almacenamiento en refrigeración induce un estrés oxidativo y que este se ve incrementado por el estrés del cultivo orgánico y la presencia de ROS en la atmósfera de conservación.

Los datos de las muestras transferidas de 12 a 20 °C indican que el tomate orgánico mantiene altas actividades de SOD y que esta actividad se ve potenciada por la presencia de especies reactivas en la atmósfera de conservación (Figura 20B). Por otro lado, las muestras de tomate orgánico almacenadas en aire disminuyen su

actividad de SOD después de 12 días pudiendo indicar una disminución del estrés oxidativo de estas muestras.

Las altas actividades de SOD están asociadas a disminuir la presencia del anión superóxido generando peróxido de hidrógeno el cual debe ser degradado por la catalasa para superar el estrés oxidativo al que está sometido el tejido.

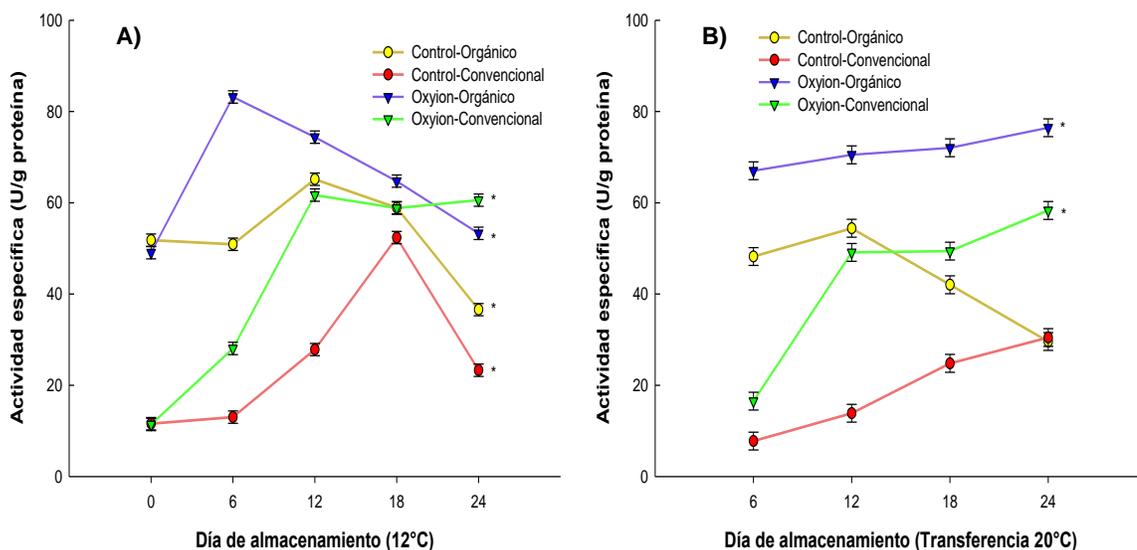


Figura 20. Cambios en la actividad específica de la enzima SOD de frutos de tomate en racimo cv 'Merlice' cultivados en sistemas hidropónicos convencional y orgánico almacenados durante 24 días a 12 °C (A) y sus transferencias de 12 a 20 °C, almacenados en aire (control) y en atmósferas con ROS (Oxyion). Las líneas marcadas con (*) al final del tratamiento indican diferencias significativas.

6.5.2 Cambios en la actividad específica de catalasa.

El análisis de varianza general aplicado de los datos de actividad específica de la enzima catalasa de todos los tratamientos aplicados indicó que bajo el almacenamiento continuo a 12 °C todos los factores, sistema de cultivo, ambiente

de almacenamiento y la interacción sistema de almacenamiento*cultivo*días, mostraron diferencias estadísticamente significativas (Anexo 2).

De forma general se identificó que los tomates producidos en el sistema de producción orgánico mostraron una mayor actividad catalasa que los convencionales (33 a 30.6 UAE respectivamente Cuadro 18); así como muestras conservadas en aire con ROS mostró mayor actividad que las muestras almacenadas en aire (36 a 27.6 UAE respectivamente) y que esta actividad aumentó a medida que transcurrió el almacenamiento de 0 a 24 días (16.7 a 44.6 UAE respectivamente).

También en las muestras transferidas de 12 a 20 °C, el análisis de varianza general indicó que todos los factores analizados, (sistema de cultivo, ambiente de conservación y días de almacenamiento) y sus interacciones dobles tuvieron efectos altamente significativos (Cuadro 17). Las muestras de tomate orgánico mostraron actividades mayores que las muestras de tomate convencional (41.7 y 36.6 UAE respectivamente), y de igual forma, aquellas muestras almacenadas en aire con ROS, mostraron mayores actividades que las almacenadas en aire puro (43.7 y 34.6 UAE) y que de forma general las muestras con menos exposición a 12 °C y transferidas a 20 °C tuvieron las menores actividades respecto de las que permanecieron más tiempo en refrigeración (28.7 a los 6 días y 45.1 UAE a los 24 días).

La actividad específica de esta enzima mostró un comportamiento a incrementarse durante el almacenamiento (Figura 21 y Cuadro 17); siendo más pronunciado este incremento en las muestras almacenadas de forma continua a 12 °C respecto de las muestras de transferencia de 12 a 20 °C. Bajo condiciones de almacenamiento a 12 °C, las muestras de cultivo orgánico y convencional almacenadas en atmósferas de aire con ROS mostraron los mayores incrementos y se separaron claramente de aquellas muestras almacenados en atmósferas de aire procedentes de ambos cultivos (Figura 21). Estos datos claramente señalan el efecto estimulador que tuvo la atmósfera con ROS en promover la actividad de esta enzima. No

obstante, el propio almacenamiento en aire tuvo también un efecto inductor de la actividad de esta enzima.

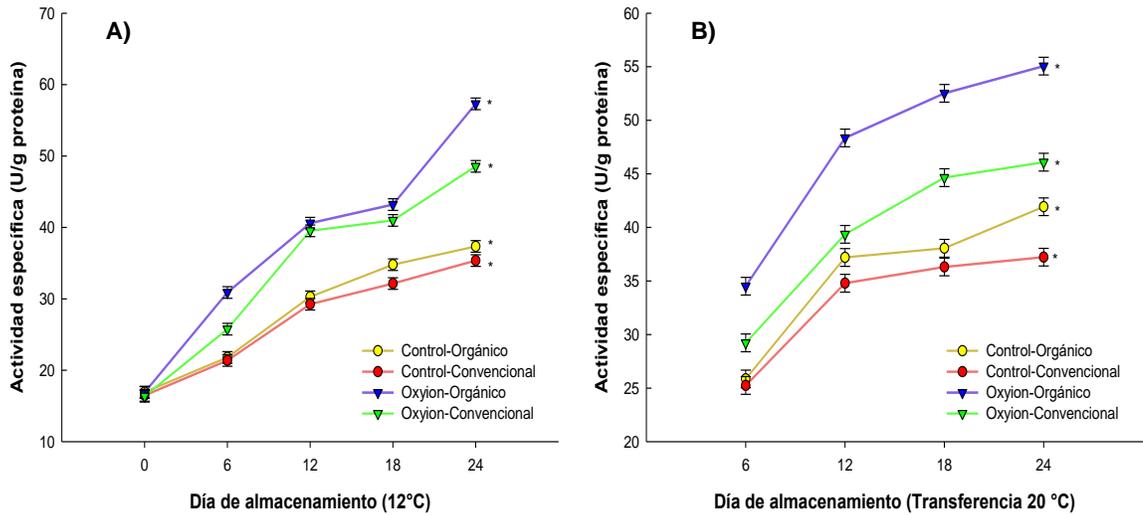


Figura 21. Cambios en la actividad específica de catalasa en frutos de tomate en racimo cv ‘Merlice’ cultivados en sistemas hidropónicos convencional y orgánico almacenados durante 24 días a 12 °C (A) y sus transferencias de 12 a 20 °C (B), en atmósferas de aire (control) y en atmósferas ricas en especies reactivas de oxígeno (Oxyion). Las líneas marcadas con (*) al final del tratamiento indican que existe diferencia significativa.

Si se consideran los datos de la actividad de la SOD en las muestras del sistema orgánico descrito en la sección anterior, llama la atención que la actividad de la catalasa no se encuentre con alta actividad desde el inicio del almacenamiento. Estos datos sugieren que el cultivo orgánico induce un estrés oxidativo por peróxido de hidrógeno debido a una baja actividad de la catalasa. No obstante, hay datos reportados para garbanzo que señalan que la aplicación de ozono ambiental indujo una mayor actividad de la SOD y una menor inducción de la actividad de catalasa Bathia et al., (2021); nuestros resultados también señalan que la presencia de ROS

en el ambiente indujo una mayor actividad de la SOD durante el almacenamiento, aunque con menores actividades de catalasa. No obstante, se requieren más estudios para clarificar el balance oxidativo en el tejido durante el crecimiento del tomate orgánico.

Cuadro 17. Comparación de medias de las actividades específicas de catalasa de muestras de tomate cv 'Merlice' producidos en hidroponía bajos sistemas orgánico y convencional, almacenados durante 24 días en atmósferas de aire (control) y de aire con especies reactivas de oxígeno (Oxyion) a 12 °C y trasferidos de 12 a 20 °C

12 °C		12 °C + 6d 20 °C	
Oxyion, Orgánico, 24	57.3 ^a	Oxyion, Orgánico, 24	55.1 ^a
Oxyion, Convencional, 24	48.6 ^b	Oxyion, Orgánico, 18	52.5 ^{ab}
Oxyion, Orgánico, 18	43.2 ^c	Oxyion, Orgánico, 12	48.4 ^{bc}
Oxyion, Convencional, 18	41.0 ^{cd}	Oxyion, Convencional, 24	46.1 ^{cd}
Oxyion, Orgánico, 12	40.6 ^{cd}	Oxyion, Convencional, 18	44.7 ^{cd}
Oxyion, Convencional, 12	39.5 ^{cde}	Control, Orgánico, 24	41.9 ^{de}
Control, Orgánico, 24	37.4 ^{def}	Oxyion, Convencional, 12	39.4 ^{ef}
Control, Convencional, 24	35.4 ^{efg}	Control, Orgánico, 18	38.1 ^{efg}
Control, Orgánico, 18	34.8 ^{fgh}	Control, Convencional, 24	37.2 ^{fg}
Control, Convencional, 18	32.2 ^{ghi}	Control, Orgánico, 12	37.2 ^{fg}
Oxyion, Orgánico, 6	30.9 ^{ghi}	Control, Convencional, 18	36.3 ^{fg}
Control, Orgánico, 12	30.3 ^{hij}	Control, Convencional, 12	34.8 ^{fg}
Control, Convencional, 12	29.2 ^{ij}	Oxyion, Orgánico, 6	34.5 ^g
Oxyion, Convencional, 6	25.8 ^{jk}	Oxyion, Convencional, 6	29.2 ^h
Control, Orgánico, 6	21.8 ^k	Control, Orgánico, 6	25.9 ^h
Control, Convencional, 6	21.4 ^{kl}	Control, Convencional, 6	25.3 ^h
Control, Orgánico, 0	16.9 ^{lm}		
Oxyion, Orgánico, 0	16.9 ^{lm}		
Control, Convencional, 0	16.5 ^m		

4 Conclusiones

El almacenamiento de tomates de racimo 'Merlice' producidos en sistema convencional u orgánico en atmósferas de aire con ROS redujo la pérdida de peso alargando su vida de anaquel. Esta tecnología permite pérdidas de peso menores a 5 % durante 19 días en tomate orgánico y 26 días en tomate convencional.

Tanto en muestras de tomate convencional como orgánico, la pérdida de firmeza fue ralentizada ligeramente mediante el almacenamiento de los frutos en atmósferas con especies reactivas de oxígeno.

Aunque el almacenamiento en aire con ROS no modificó el momento de aparición del pico climatérico, si disminuyó la tasa de respiración de en ambos tipos de tomate. Esto parece explicar la eficacia de esta tecnología para el almacenamiento de los frutos independientemente del origen de su producción.

La mayor vida de anaquel estimada fue para los tomates producidos por el sistema convencional y almacenados en atmosferas con ROS (26 días); no obstante, esta vida de anaquel se reduce a 20 días si se almacenan en aire a 12 °C. Mientras que los tomates hidropónicos orgánicos también incrementaron su vida a 19 días cuando se almacenaron a 12 °C en atmósferas con ROS en comparación de la vida de anaquel lograda en atmósferas de aire (16 días).

Además, se demostró que el equipo Oxyion mejoró algunos aspectos de calidad en frutos de tomate orgánico como firmeza y color, favoreciendo la atracción visual que es un factor importante para productores, comercializadores y consumidores.

Los frutos orgánicos presentaron mayor capacidad antioxidante que los convencionales independientemente del almacenamiento, sin embargo, la presencia de ROS provocó un aumento al término del almacenamiento para los tomates de producción orgánica, mientras que para los frutos de producción convencional se mantuvo.

Los compuestos bioactivos cuantificados al final del almacenamiento fueron superiores en los tomates almacenados en aire con ROS; se asocia este incremento significativo de licopeno y vitamina C debido al estrés que fueron sometidos esos frutos y a las propiedades antioxidantes de estos compuestos.

El estudio de actividad de las enzimas del sistema antioxidante permitió identificar que desde la cosecha los tomates producidos en sistema orgánico tienen un nivel de estrés oxidativo mayor que los tomates del sistema convencional y que ese estrés oxidativo se va incrementado por el almacenamiento refrigerado y por la exposición a las ROS en el ambiente.

No obstante, estas mismas muestras mostraron incrementos significativamente mayores de la catalasa lo cual pareció amortiguar el estrés oxidativo y soportar el tratamiento de almacenamiento refrigerado en aire con ROS.

El contenido de licopeno fue mayor en las muestras de tomate orgánico cuando los frutos fueron almacenados en atmósferas con especies reactivas de oxígeno. No obstante, también los tomates convencionales almacenados en este mismo ambiente mostraron mayores contenidos de este compuesto.

De manera general, los resultados encontrados en el presente estudio permitieron señalar que la conservación de tomates hidropónicos de racimo cv 'Merlice' tanto convencionales como orgánicos ven incrementada su vida de anaquel cuando se almacenan en atmósferas con ROS. Aunque, los tomates convencionales son los que tuvieron mayor vida de anaquel.

5 Referencias

- Adams, D. O., & Yang, S. F. (1979). Ethylene biosynthesis: Identification of 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid as an intermediate in the conversion of methionine to ethylene. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 76(1), 170–174. <https://doi.org/10.1073/pnas.76.1.170>
- Alexander, L., & Grierson, D. (2002). Ethylene biosynthesis and action in tomato: a model for climacteric fruit ripening. *Journal of Experimental Botany*, 53(377), 2039–2055. <https://doi.org/10.1093/jxb/erf072>
- Aranda, V., Macci, C., Peruzzi, E., & Masciandaro, G. (2015). Biochemical activity and chemical-structural properties of soil organic matter after 17 years of amendments with olive-mill pomace co-compost. *Journal of Environmental Management*, 147, 278–285. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.08.024>
- Balaji, V., Mayrose, M., Sherf, O., Jacob-Hirsch, J., Eichenlaub, R., Iraki, N., Manulis-Sasson, S., Rechavi, G., Barash, I., & Sessa, G. (2008). Tomato transcriptional changes in response to *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis* reveal a role for ethylene in disease development. *Plant Physiology*, 146(4), 1797–1809. <https://doi.org/10.1104/pp.107.115188>
- Barrett, D. M., Weakley, C., Diaz, J. V., & Watnik, M. (2007). Qualitative and nutritional differences in processing tomatoes grown under commercial organic and conventional production systems. *Journal of Food Science*, 72(9). <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00500.x>
- Barros, L., Dueñas, M., Pinela, J., Carvalho, A. M., Buelga, C. S., & Ferreira, I. C. F. R. (2012). Characterization and quantification of phenolic compounds in four tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) farmers varieties in Northeastern Portugal homegardens. *Plant Foods for Human Nutrition*, 67(3), 229–234. <https://doi.org/10.1007/s11130-012-0307-z>
- Barry, C. S., Blume, B., Bouzayen, M., Cooper, W., Hamilton, A. J., & Grierson, D. (1996). Differential expression of the 1-aminocyclopropane-1-carboxylate

oxidase gene family of tomato. In *Plant Journal* (Vol. 9, Issue 4, pp. 525–535).
<https://doi.org/10.1046/j.1365-313X.1996.09040525.x>

- Belimov, A. A., Hontzeas, N., Safronova, V. I., Demchinskaya, S. V., Piluzza, G., Bullitta, S., & Glick, B. R. (2005). Cadmium-tolerant plant growth-promoting bacteria associated with the roots of Indian mustard (*Brassica juncea* L. Czern.). *Soil Biology and Biochemistry*, 37(2), 241–250.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.07.033>
- Belimov, Andrei A., Safronova, V. I., Sergeyeveva, T. A., Egorova, T. N., Matveyeva, V. A., Tsyganov, V. E., Borisov, A. Y., Tikhonovich, I. A., Kluge, C., Preisfeld, A., Dietz, K.-J., & Stepanok, V. V. (2001). Characterization of plant growth promoting rhizobacteria isolated from polluted soils and containing 1-aminocyclopropane-1-carboxylate deaminase. *Canadian Journal of Microbiology*, 47(7), 642–652. <https://doi.org/10.1139/cjm-47-7-642>
- Bhatia, A., Mina, U., Kumar, V., Tomer, R., Kumar, A., Chakrabarti, B., Singh, R. N., & Singh, B. (2021). Effect of elevated ozone and carbon dioxide interaction on growth, yield, nutrient content and wilt disease severity in chickpea grown in Northern India. *Heliyon*, 7(1). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06049>
- Blackwell, R. D., Murray, A. J. S., & Lea, P. J. (1990). Enzymes of the photorespiratory carbon pathway. *Academic Press Limited*, 3, 129–144.
<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-461013-2.50015-0>
- Brody, J. (1997). New candidate is named in dietary fight against cancer. *New York Times*, 147: 10.
- Cantwell, M., Nie, X., & Hong, G. (2009). Impact of Storage Conditions on Grape Tomato Quality. *Symposium A Quarterly Journal In Modern Foreign Literatures*, January 2009, 3–10.
- Cao, S., Hu, Z., & Pang, B. (2010). Optimization of postharvest ultrasonic treatment of strawberry fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 55(3), 150–

153. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2009.11.002>

Chen, Z., & Zhu, C. (2011). Combined effects of aqueous chlorine dioxide and ultrasonic treatments on postharvest storage quality of plum fruit (*Prunus salicina* L.). *Postharvest Biology and Technology*, 61(2–3), 117–123. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.03.006>

Ciardi, J., & Klee, H. (2001). Regulation of ethylene-mediated responses at the level of the receptor. *Annals of Botany*, 88(5), 813–822. <https://doi.org/10.1006/anbo.2001.1523>

Clinton, S. K. (1998). Lycopene: Chemistry, biology, and implications for human health and disease. *Nutrition Reviews*, 56(2 I), 35–51. <https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.1998.tb01691.x>

Cole, E. R., & Kapur, N. S. (1957a). The stability of lycopene. I.—Degradation by oxygen. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 8(6), 360–365. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740080610>

Cole, E. R., & Kapur, N. S. (1957b). The stability of lycopene. II.—Oxidation during heating of tomato pulps. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 8(6), 366–368. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740080611>

Cruz, R. M., González, J., & Sánchez, P. (2013). Propiedades funcionales y beneficios para la salud del licopeno. *Nutrición Hospitalaria*, 28(1), 6–15. <https://doi.org/10.3305/nh.2013.28.1.6302>

D’Amico, D. J., Silk, T. M., Wu, J., & Guo, M. (2006). Inactivation of microorganisms in milk and apple cider treated with ultrasound. *Journal of Food Protection*, 69(3), 556–563. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-69.3.556>

Dannehl, D., Josuttis, M., Ulrichs, C., & Schmidt, U. (2014). The potential of a confined closed greenhouse in terms of sustainable production, crop growth, yield and valuable plant compounds of tomatoes. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 87(November), 210–219.

<https://doi.org/10.5073/JABFQ.2014.087.030>

- de la Cruz, E., Estrada, M., Robledo, V., Osorio, R., Márquez, C., & Sánchez, R. (2009). *Producción de tomate en invernadero con composta y vermicomposta como sustrato*. 25(1), 59–67.
- de León, L., Siverio, F., López, M. M., & Rodríguez, A. (2011). *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis*, a seedborne tomato pathogen: Healthy seeds are still the goal. *Plant Disease*, 95(11), 1328–1339.
<https://doi.org/10.1094/PDIS-02-11-0091>
- Deikman, J. (1997). Molecular mechanisms of ethylene regulation of gene transcription. *Physiologia Plantarum*, 1, 100 (3), 561–566.
<https://doi.org/doi:10.1111/j.1399-3054.1997.tb03061.x>
- Di, X., Gomila, J., & Takken, F. L. W. (2017). Involvement of salicylic acid, ethylene and jasmonic acid signalling pathways in the susceptibility of tomato to *Fusarium oxysporum*. *Molecular Plant Pathology*, 18(7), 1024–1035.
<https://doi.org/10.1111/mpp.12559>
- Diouf, I. A., Derivot, L., Bitton, F., Pascual, L., & Causse, M. (2018). Water deficit and salinity stress reveal many specific QTL for plant growth and fruit quality traits in tomato. *Frontiers in Plant Science*, 9(March), 1–13.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00279>
- Dotto, M. C., Pombo, M. A., Martínez, G. A., & Civello, P. M. (2011). Heat treatments and expansin gene expression in strawberry fruit. *Scientia Horticulturae*, 130(4), 775–780. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.09.002>
- Dreezens, E., Martijn, C., Tenbült, P., Kok, G., & De Vries, N. K. (2005). Food and values: An examination of values underlying attitudes toward genetically modified and organically grown food products. *Appetite*, 44(1), 115–122.
<https://doi.org/10.1016/j.appet.2004.07.003>
- Dutta, S., & Biggs, R. H. (1991). Regulation of ethylene biosynthesis in citrus

- leaves infected with *Xanthomonas campestris* pv. *citri*. *Physiologia Plantarum*, 82(2), 225–230. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1991.tb00085.x>
- Eichenlaub, R., & Gartemann, K.-H. (2011). The *Clavibacter michiganensis* subspecies: Molecular investigation of gram-positive bacterial plant pathogens. *Annual Review of Phytopathology*, 49(1), 445–464. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-072910-095258>
- Fallik, E. (2004). Prestorage hot water treatments (immersion, rinsing and brushing). *Postharvest Biology and Technology*, 32(2), 125–134. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2003.10.005>
- FAO. (1979). *Recommended Practices for the Prevention of Mycotoxins in Food, Feed, and Their Products*.
- FAOSTAT. (2018). *Producción Agrícola a Nivel Mundial*.
- FiBL & IFOAM, O. I. (2019). The World of Organic Agriculture Statistics and Emerging Trends 2019. In *FiBL*. <https://doi.org/10.4324/9781849775991>
- FIRA. (2019). Panorama Agroalimentario. Tomate Rojo 2019. In *Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Sectorial*.
- Fluhr, R., Mattoo, A. K., & Dilley, D. R. (1996). Ethylene — Biosynthesis and perception. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 15:5-6, 479–523. <https://doi.org/10.1080/07352689609382368>
- Fukumoto, L. R., & Mazza, G. (2000). Assessing antioxidant and prooxidant activities of phenolic compounds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(8), 3597–3604. <https://doi.org/10.1021/jf000220w>
- Gapper, C., & Dolan, L. (2006). Control of plant development by reactive oxygen species. *Plant Physiology*, 141(2), 341–345. <https://doi.org/10.1104/pp.106.079079>
- García, M. J., Suárez, V., Romera, F. J., Alcántara, E., & Pérez-Vicente, R. (2011).

- A new model involving ethylene, nitric oxide and Fe to explain the regulation of Fe-acquisition genes in Strategy I plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 49(5), 537–544. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2011.01.019>
- Gärtner, C., Stahl, W., & Sies, H. (1997). Lycopene is more bioavailable from tomato paste than from fresh tomatoes. *American Journal of Clinical Nutrition*, 66(1), 116–122. <https://doi.org/10.1093/ajcn/66.1.116>
- Gazzarrini, S., & McCourt, P. (2001). Genetic interactions between ABA, ethylene and sugar signaling pathways. *Current Opinion in Plant Biology*, 387–391. [https://doi.org/10.1016/s1369-5266\(00\)00190-4](https://doi.org/10.1016/s1369-5266(00)00190-4)
- Giovanelli, G., Lavelli, V., Peri, C., & Nobili, S. (1999). Variation in antioxidant components of tomato during vine and post-harvest ripening. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 79(12), 1583–1588. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(199909\)79:12<1583::AID-JSFA405>3.0.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(199909)79:12<1583::AID-JSFA405>3.0.CO;2-J)
- Giovannoni, J. (2001). Molecular Biology of Fruit Maturation and Ripening. *Plant Physiol*, 52:725-49. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.52.1.725>
- Giovannucci, E. (1999). *Tomatoes, Tomato-Based Products, Lycopene, and Cancer: Review of the Epidemiologic Literature*. 91(4), 317–331.
- Gleason, M. L., Gitaitis, R. D., & Ricker, M. D. (1993). Recent progress in understanding and controlling bacterial canker of tomato in eastern North America. *Plant Disease*, 77(11), 1069–1076. <https://doi.org/10.1094/PD-77-1069>
- Glick, B. R., Karaturovic, D. M., & Newell, P. C. (1995). A novel procedure for rapid isolation of plant growth promoting pseudomonads. *Canadian Journal of Microbiology*, 41(6), 533–536. <https://doi.org/10.1139/m95-070>
- Glick, Bernard R., Penrose, D. M., & Li, J. (1998). A model for the lowering of plant

- ethylene concentrations by plant growth-promoting bacteria. *Journal of Theoretical Biology*, 190(1), 63–68. <https://doi.org/10.1006/jtbi.1997.0532>
- Gray, J. E., Picton, S., Giovannoni, J. J., & Grierson, D. (1994). The use of transgenic and naturally occurring mutants to understand and manipulate tomato fruit ripening. *Plant, Cell & Environment*, 17(5), 557–571. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1994.tb00149.x>
- Hanafi, A. (2003). Integrated production and protection today and in the future in greenhouse crops in the mediterranean region. *Acta Horticulturae*, 614, 755–765. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2003.614.112>
- Helyes, L., & Lugasi, A. (2006). Formation of certain compounds having technological and nutritional importance in tomato fruits during maturation. *Acta Alimentaria*, 35(2), 183–193. <https://doi.org/10.1556/AAlim.35.2006.2.5>
- Hiwasa, K., Kinugasa, Y., Amano, S., Hashimoto, A., Nakano, R., Inaba, A., & Kubo, Y. (2003). Ethylene is required for both the initiation and progression of softening in pear (*Pyrus communis* L.) fruit. *Journal of Experimental Botany*, 54(383), 771–779. <https://doi.org/10.1093/jxb/erg073>
- Holden, J. M., Eldridge, A. L., Beecher, G. R., Marilyn Buzzard, I., Bhagwat, S., Davis, C. S., Douglass, L. W., Gebhardt, S., Haytowitz, D., & Schakel, S. (1999). Carotenoid content of U.S. foods: An update of the database. *Journal of Food Composition and Analysis*, 12(3), 169–196. <https://doi.org/10.1006/jfca.1999.0827>
- Holdsworth, M. J., Schuch, W., & Grierson, D. (1988). Organisation and expression of a wound/ripening-related small multigene family from tomato. *Plant Molecular Biology*, 11(2), 81–88. <https://doi.org/10.1007/BF00015661>
- Huang, T. S., Xu, C., Walker, K., West, P., Zhang, S., & Weese, J. (2006). Decontamination efficacy of combined chlorine dioxide with ultrasonication on apples and lettuce. *Journal of Food Science*, 71(4), 134–139.

<https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2006.00015.x>

- Hunziker, A. T. (1979). *South American Solanaceae: A Synoptic Survey*.
https://books.google.com.mx/books/about/South_American_Solanaceae.html?id=r55EcAAACAAJ&redir_esc=y
- Ighodaro, O. M., & Akinloye, O. A. (2018). First line defence antioxidants-superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) and glutathione peroxidase (GPX): Their fundamental role in the entire antioxidant defence grid. *Alexandria Journal of Medicine*, *54*(4), 287–293.
<https://doi.org/10.1016/j.ajme.2017.09.001>
- Ishida, B. K. (2000). Inhibitor-resistant early ethylene production during tomato fruit development. *Plant Physiology and Biochemistry*, *38*(4), 325–331.
[https://doi.org/10.1016/S0981-9428\(00\)00744-0](https://doi.org/10.1016/S0981-9428(00)00744-0)
- ITC. International Trade Centre. (2018). *Trade statistics for international business development (TRADE MAP)*. <https://www.trademap.org/Index.aspx>
- Kenyon, J. S., & Turner, J. G. (1992). The stimulation of ethylene synthesis in *Nicotiana tabacum* leaves by the phytotoxin coronatine. *Plant Physiology*, *100*(1), 219–224. <https://doi.org/10.1104/pp.100.1.219>
- Khan, Z., Kim, Y. H., Kim, S. G., & Kim, H. W. (2007). Observations on the suppression of root-knot nematode (*Meloidogyne arenaria*) on tomato by incorporation of cyanobacterial powder (*Oscillatoria chlorina*) into potting field soil. *Bioresource Technology*, *98*(1), 69–73.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.11.029>
- Kreslavski, V. D., Los, D. A., Allakhverdiev, S. I., & Kuznetsov, V. V. (2012). Signaling role of reactive oxygen species in plants under stress. *Russian Journal of Plant Physiology*, *59*(2), 141–154.
<https://doi.org/10.1134/S1021443712020057>
- Leonardi, C., Ambrosino, P., Esposito, F., & Fogliano, V. (2000). Antioxidative

- activity and carotenoid and tomatine contents in different typologies of fresh consumption tomatoes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(10), 4723–4727. <https://doi.org/10.1021/jf000225t>
- Lewis, J. A., Lumsden, R. D., & Locke, J. C. (1996). Biocontrol of damping-off diseases caused by *Rhizoctonia solani* and *Pythium ultimum* with Alginate Prills of *Gliocladium virens*, *Trichoderma hamatum* and various food bases. *Biocontrol Science and Technology*, 6(2), 163–174. <https://doi.org/10.1080/09583159650039368>
- Lieberman, M. (1979). Biosynthesis and action of ethylene. *Annual Review of Plant Physiology*, 30(1), 533–591. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.30.060179.002533>
- Maksimović, J. J. D., & Živanović, B. D. (2012). Quantification of the antioxidant activity in salt-stressed tissues. *Methods in Molecular Biology*, 913, 237–250. https://doi.org/10.1007/978-1-61779-986-0_16
- Márquez, C., Cano, P., Chew, Y. I., Moreno, A., & Rodríguez, N. (2006). Sustratos en la producción orgánica de tomate cherry bajo invernadero. *REVISTA CHAPINGO SERIE HORTICULTURA*, 12(2), 183-188. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=60912208>
- Martí, R., Roselló, S., & Cebolla-cornejo, J. (2016). Tomato as a source of carotenoids and polyphenols targeted to cancer prevention. *Cancers*, 1–28. <https://doi.org/10.3390/cancers8060058>
- Mclellan, M. R., Lind, L. R., & Kime, R. W. (1994). Hue angle determinations and statistical. *Journal of Food Quality*, 18(1995), 235–240.
- Melfi, M. T., Nardiello, D., Cicco, N., Candido, V., & Centonze, D. (2018). Simultaneous determination of water- and fat-soluble vitamins, lycopene and beta-carotene in tomato samples and pharmaceutical formulations: Double injection single run by reverse-phase liquid chromatography with UV detection.

Journal of Food Composition and Analysis, 70(March), 9–17.

<https://doi.org/10.1016/j.jfca.2018.04.002>

Meng, X., Zhang, M., & Adhikari, B. (2014). The effects of ultrasound treatment and nano-zinc oxide coating on the physiological activities of fresh-cut kiwifruit. *Food and Bioprocess Technology*, 7(1), 126–132.

<https://doi.org/10.1007/s11947-013-1081-0>

Mercado-Silva, E., Rivera-Pastrana, D., Flores-Sosa, R., & Vázquez Barrios, E. (2002). *Manual de Manejo Poscosecha de Tomate*. 1–44.

http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual_ciencia/tec-poscosecha-tomate-introd.pdf

Minoggio, M., Bramati, L., Simonetti, P., Gardana, C., Iemoli, L., Santangelo, E., Mauri, P. L., Spigno, P., Soressi, G. P., & Pietta, P. G. (2003). Polyphenol pattern and antioxidant activity of different tomato lines and cultivars. *Annals of Nutrition and Metabolism*, 47(2), 64–69. <https://doi.org/10.1159/000069277>

Montgomery, J., Goldman, S., Deikman, J., Margossian, L., & Fischer, R. L. (1993). Identification of an ethylene-responsive region in the promoter of a fruit ripening gene. *Plant Biology*, 90(13), 5939–5943.

<https://doi.org/10.1073/pnas.90.13.5939>

Morales, J., Bourges, H., & Camacho, M. E. (2015). *Tables of composition of food and food products (Condensed version 2015)*.

https://www.incmnsz.mx/2019/TABLAS_ALIMENTOS.pdf

Nadeau, J. A., Zhang, X. S., Nair, H., & O'Neill, S. D. (1993). Temporal and spatial regulation of 1-aminocyclopropane-1-carboxylate oxidase in the pollination-induced senescence of orchid flowers. *Plant Physiology*, 103(1), 31–39.

<https://doi.org/10.1104/pp.103.1.31>

Nagata, M., & Ichiji, Y. (1992). Simple method for simultaneous determination of chlorophyll and carotenoids in tomato fruit. *The Japanese Society for Food*

Science and Technology, 39(10), 925–928.

- Nakatsuka, A., Murachi, S., Okunishi, H., Shiomi, S., Nakano, R., Kubo, Y., & Inaba, A. (1998). Differential expression and internal feedback regulation of 1-Aminocyclopropane-1-Carboxylate Synthase, 1-Aminocyclopropane-1-Carboxylate Oxidase, and ethylene receptor genes in tomato fruit during development and ripening. *Plant Physiology*, 118(4), 1295 LP – 1305. <https://doi.org/10.1104/pp.118.4.1295>
- Nandi, M., Macdonald, J., Liu, P., Weselowski, B., & Yuan, Z. C. (2018). *Clavibacter michiganensis* ssp. *michiganensis*: bacterial canker of tomato, molecular interactions and disease management. *Molecular Plant Pathology*, 19(8), 2036–2050. <https://doi.org/10.1111/mpp.12678>
- Noctor, G., Reichheld, J. P., & Foyer, C. H. (2017). ROS-related redox regulation and signaling in plants. *Seminars in Cell and Developmental Biology*, 80, 3–12. <https://doi.org/10.1016/j.semcdb.2017.07.013>
- Ntinis, G. K., Neumair, M., Tsadilas, C. D., & Meyer, J. (2017). Carbon footprint and cumulative energy demand of greenhouse and open-field tomato cultivation systems under Southern and Central European climatic conditions. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3617–3626. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.106>
- Oeller, P. W., Min-Wong, L. U., Taylor, L. P., Pike, D. A., & Theologis, A. (1991). Reversible inhibition of tomato fruit senescence by antisense RNA. *Science*, 254(5030), 437–439. <https://doi.org/10.1126/science.1925603>
- Olivain, C., & Alabouvette, C. (1999). Process of tomato root colonization by a pathogenic strain of *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* in comparison with a non-pathogenic strain. *New Phytologist*, 141(3), 497–510. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1999.00365.x>
- Oliveira, A. B., Moura, C. F. H., Gomes-Filho, E., Marco, C. A., Urban, L., &

- Miranda, M. R. A. (2013). The impact of organic farming on quality of tomatoes is associated to increased oxidative stress during fruit development. *PLOS ONE*, 8(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0056354>
- Oxyion. (2018). *Tecnología Oxyion*. <https://www.oxyion.com/es>
- Pegg, G. F., & Cronshaw, D. K. (1976). The relationship of in vitro to in vivo ethylene production in *Pseudomonas solanacearum* infection of tomato. *Physiological Plant Pathology*, 9(2), 145–154. [https://doi.org/10.1016/0048-4059\(76\)90034-5](https://doi.org/10.1016/0048-4059(76)90034-5)
- Pfander, H. (1992). Carotenoids: An overview. *Methods in Enzymology*, 213(1985), 3–13. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(92\)13105-7](https://doi.org/10.1016/0076-6879(92)13105-7)
- Picton, S., Barton, S. L., Bouzayen, M., Hamilton, A. J., & Grierson, D. (1993). Altered fruit ripening and leaf senescence in tomatoes expressing an antisense ethylene-forming enzyme transgene. *The Plant Journal*, 3(3), 469–481. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.1993.tb00167.x>
- Pinela, J., Barros, L., Carvalho, A. M., & Ferreira, I. C. F. R. (2012). Nutritional composition and antioxidant activity of four tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) farmer varieties in Northeastern Portugal homegardens. *Food and Chemical Toxicology*, 50(3–4), 829–834. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2011.11.045>
- Pinheiro, J., Silva, C. L. M., Alegria, C., Abreu, M., Sol, M., & Gonçalves, E. M. (2012). Impact of water heat treatment on physical-chemical, biochemical and microbiological quality of whole tomato (*Solanum lycopersicum*) fruit. *Acta Horticulturae*, 934, 1269–1276. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.934.172>
- Raiola, A., Rigano, M. M., Calafiore, R., Frusciante, L., & Barone, A. (2014). Enhancing the health-promoting effects of tomato fruit for biofortified food. *Mediators of Inflammation*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/139873>

- Ramírez, R. A., Jiménez, A., Pérez, C. P., & Restrepo, L. A. (2017). Evaluation of the use of reactive oxygen species (ROS) generated through oxyion® technology in strawberry (*Fragaria x ananassa* (Duchesne ex Weston) Duchesne ex Rozier cv. Monterrey) storage. *Acta Agronomica*, 67(2), 223–230. <https://doi.org/10.15446/acag.v67n2.66580>
- Rao, A. V., & Agarwal, S. (1999). Role of lycopene as antioxidant carotenoid in the prevention of chronic diseases: A review. *Nutrition Research*, 19(2), 305–323. [https://doi.org/10.1016/S0271-5317\(98\)00193-6](https://doi.org/10.1016/S0271-5317(98)00193-6)
- SAGARPA. (2017). *Planeación Agrícola Nacional 2017-2030. JITOMATE*. [http://www.consejagri.mx/images/PLANEACION AGRINAL MEX/CON POTENCIAL DE MERCADO/Potencial-Jitomate.pdf](http://www.consejagri.mx/images/PLANEACION_AGRINAL_MEX/CON_POTENCIAL_DE_MERCADO/Potencial-Jitomate.pdf)
- Sandström, B., Astrup, A. V., Dyerberg, J., Hølmer, G., Poulsen, H. E., Stender, S., Kondrup, J., & Gudmand-Høyer, E. (1994). The effect on health of dietary antioxidants and antioxidant supplements. *Ugeskrift for Læger*, 156(51), 7675—7679. recuperado: <http://europepmc.org/abstract/MED/7839531>
- Seymour, I. J., Burfoot, D., Smith, R. L., Cox, L. A., & Lockwood, A. (2002). Ultrasound decontamination of minimally processed fruits and vegetables. *International Journal of Food Science and Technology*, 37(5), 547–557. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2621.2002.00613.x>
- Shah Jahan, M., Wang, Y., Shu, S., Zhong, M., Chen, Z., Wu, J., Sun, J., & Guo, S. (2019). Exogenous salicylic acid increases the heat tolerance in Tomato (*Solanum lycopersicum* L) by enhancing photosynthesis efficiency and improving antioxidant defense system through scavenging of reactive oxygen species. *Scientia Horticulturae*, 247(July 2018), 421–429. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.12.047>
- Shi, J., Dai, Y., Kakuda, Y., Mittal, G., & Xue, S. J. (2008). Effect of heating and exposure to light on the stability of lycopene in tomato purée. *Food Control*, 19(5), 514–520. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2007.06.002>

- SIACON. (2021). *Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON)*.
<https://www.gob.mx/siap/documentos/siacon-ng-161430>
- SIAP. (2019). *Boletín mensual de producción Tomate rojo (Jitomate)*.
- SIAP. (2020). *Panorama Agroalimentario 2020*.
- SIAP, & Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2021). *Escenario mensual de productos agroalimentarios*. 1–2.
- Soto, G., Yahia, E. M., Brecht, J. K., & Gardea, A. (2004). Effects of postharvest hot air treatments on the quality and antioxidant levels in tomato fruit. *LWT - Food Science and Technology*, 38(6), 657–663.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2004.08.005>
- Stahl, W., & Sies, H. (1996). Lycopene: A biologically important carotenoid for humans? *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 336(1), 1–9.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1006/abbi.1996.0525>
- Stolz, H., Stolze, M., Janssen, M., & Hamm, U. (2011). Preferences and determinants for organic, conventional and conventional-plus products - The case of occasional organic consumers. *Food Quality and Preference*, 22(8), 772–779. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2011.06.011>
- Suslow, T. V., & Cantwell, M. (1997). *Tomato. Recommendations for Maintaining Postharvest Quality*. Postharvest Technology Center.
- Tang, G. Y., Meng, X., Li, Y., Zhao, C. N., Liu, Q., & Li, H. Bin. (2017). Effects of vegetables on cardiovascular diseases and related mechanisms. *Nutrients*, 9(8), 20–23. <https://doi.org/10.3390/nu9080857>
- Tejacal, I. A., Colinas, M. T., Martínez, M. T., & Solo, R. M. (2005). Daños por frío en zapote mamey (*Pouteria sapota* (Jacq.) H. E. Moore and Stearn). II. Cambios en fenoles totales y actividad enzimática. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 28(1), 17–24. <https://www.researchgate.net/publication/26477467>

- Theologis, A., Oeller, P. W., Wong, L. -m, Rottmann, W. H., & Gantz, D. M. (1993). Use of a tomato mutant constructed with reverse genetics to study fruit ripening, a complex developmental process. *Developmental Genetics*, *14*(4), 282–295. <https://doi.org/10.1002/dvg.1020140406>
- Tigist, M., Workneh, T. S., & Woldetsadik, K. (2013). Effects of variety on the quality of tomato stored under ambient conditions. *Journal of Food Science and Technology*, *50*(3), 477–486. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0378-0>
- Toma, R. B., Frank, G. C., Nakayama, K., & Tawfik, E. (2008). Lycopene content in raw tomato varieties and tomato products. *Journal of Foodservice*, *19*(2), 127–132. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4506.2008.00094.x>
- Tonucci, L. H., Holden, J. M., Beecher, G. R., Khachik, F., Davis, C. S., & Mulokozi, G. (1995). Carotenoid content of thermally processed tomato-based food products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *43*(3), 579–586. <https://doi.org/10.1021/jf00051a005>
- Tringovska, I., Yankova, V., Markova, D., & Mihov, M. (2015). Effect of companion plants on tomato greenhouse production. *Scientia Horticulturae*, *186*, 31–37. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.02.016>
- Tzortzakis, N., Borland, A., Singleton, I., & Barnes, J. (2007). Impact of atmospheric ozone-enrichment on quality-related attributes of tomato fruit. *Postharvest Biology and Technology*, *45*(3), 317–325. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.03.004>
- Varit, S., & Songsin, P. (2011). Effects of hot water treatments on the physiology and quality of “Kluai Khai” banana. *International Food Research Journal*, *18*(3), 1013–1016. https://www.researchgate.net/publication/263618872_C_All_Rights_Reserved_Effects_of_hot_water_treatments_on_the_physiology_and_quality_of_'Kluai_Khai'_banana

- Vinha, A. F., Barreira, S. V. P., Costa, A. S. G., Alves, R. C., & Oliveira, M. B. P. P. (2014). Organic versus conventional tomatoes: Influence on physicochemical parameters, bioactive compounds and sensorial attributes. *Food and Chemical Toxicology*, *67*, 139–144. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2014.02.018>
- Viuda, M., Sanchez, E., Sayas, E., Sendra, E., Pérez, J. A., & Fernández, J. (2014). Tomato and tomato byproducts. Human health benefits of lycopene and its application to meat products: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *54*(8), 1032–1049. <https://doi.org/10.1080/10408398.2011.623799>
- Weisburger, J. H. (1998). Evaluation of the evidence on the role of tomato products in disease prevention. *Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine. Society for Experimental Biology and Medicine (New York, N. Y.)*, *218*(2), 140—143. <https://doi.org/10.3181/00379727-218-44281>
- Wongsa-Ngasri, P., & Sastry, S. K. (2016). Tomato peeling by ohmic heating: Effects of lye-salt combinations and post-treatments on weight loss, peeling quality and firmness. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, *34*, 148–153. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.01.013>
- Xu, Z., Mahmood, K., & Rothstein, S. J. (2017). ROS induces anthocyanin production via late biosynthetic genes and anthocyanin deficiency confers the hypersensitivity to ROS-generating stresses in arabidopsis. *Plant and Cell Physiology*, *58*(8), 1364–1377. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcx073>
- Zegzouti, H., Jones, B., Frasse, P., Marty, C., Maitre, B., Latché, A., Pech, J. C., & Bouzayen, M. (1999). Ethylene-regulated gene expression in tomato fruit: Characterization of novel ethylene-responsive and ripening-related genes isolated by differential display. *Plant Journal*, *18*(6), 589–600. <https://doi.org/10.1046/j.1365-313X.1999.00483.x>
- Zhang, Y., Zhao, G., Cheng, P., Yan, X., Li, Y., Cheng, D., Wang, R., Chen, J., & Shen, W. (2019). Nitrite accumulation during storage of tomato fruit as

prevented by hydrogen gas. *International Journal of Food Properties*, 22(1), 1425–1438. <https://doi.org/10.1080/10942912.2019.1651737>

Žnidarčič, D., & Požrl, T. (2006). Comparative study of quality changes in tomato cv. “Malike” (*Lycopersicon esculentum* Mill.) whilst stored at different temperatures. *Acta Agriculturae Slovenica*, 87(2), 235–243. <http://aas.bf.uni-lj.si/september2006/05znidarcic.pdf>

6

7 Anexos

Anexo 1. ANOVA del % de pérdida de peso de tomate de racimo cv 'Merlice' producido bajo sistemas hidropónicos convencional y orgánico; almacenados en aire o en aire con especies ricas en especies reactivas de oxígeno a 12 °C y su transferencia a 20 °C.

Probabilidad estadística del efecto de los factores analizados en la pérdida de peso de tomate Merlice, producido en invernadero bajo sistemas convencional y orgánico almacenados a 12 °C por diferentes días.

Fuente	PAR	GL	Σ cuadrados	Valor f	Prob > f
Almacenamiento	1	1	5.66048	16289.1511	<.0001
Sist de cultivo	1	1	9.11250	26223.0216	<.0001
Almacen* cultivo	1	1	0.14281	410.9496	<.0001
Días de alma	4	4	167.36391	120405.6924	<.0001
Almacen*días	4	4	2.82683	2033.6924	<.0001
Cultivo*días	4	4	5.11771	3681.8076	<.0001
Alm*cultivo*días	4	4	0.15078	108.4766	<.0001

Probabilidad estadística del efecto de los factores analizados en la pérdida de peso de tomate 'Merlice', producido en invernadero bajo sistemas convencional y orgánico almacenados a 12 °C y transferidos 6 días a 20 °C

Fuente	PAR	GL	Σ cuadrados	Valor f	Prob > f
Almacenamiento	1	1	10.37520	83840.0101	<.0001
Sist de cultivo	1	1	10.90026	88082.9192	<.0001
Almacen* cultivo	1	1	0.02211	178.6768	<.0001
Días de alma	4	4	338.11464	683059.8838	<.0001
Almacen*días	4	4	4.07829	8238.9747	<.0001
Cultivo*días	4	4	6.36713	12862.8939	<.0001

Alma*cultivo*días 4 4 0.17278 349.0556 <.0001

Anexo 2. ANOVA de la firmeza de tomate de racimo cv 'Merlice' producido bajo sistemas hidropónicos convencional y orgánico; almacenados en aire o en aire con especies ricas en especies reactivas de oxígeno a 12 °C y su transferencia a 20 °C.

FIRMEZA 12 °C

Fuente de variación	Param	GL	Suma Cuadrados	f	pro>f
Almacenamiento	1	1	0.9116	0.0482	0.8269
Cultivo	1	1	110.9205	5.8685	0.0185
Almacenamiento*Cultivo	1	1	6.6586	0.3523	0.5551
Días	4	4	6425.9039	84.9944	<.0001
Almacenamiento*Días	4	4	242.9156	3.213	0.0186
Cultivo*Días	4	4	86.2923	1.1414	0.3458
Almacenamiento*Cultivo*Días	4	4	383.0722	5.0668	0.0014

FIRMEZA 12 °C + 6d 20 °C

Fuente de Variación	Param	GL	Suma Cuadrados	f	pro>f
Almacenamiento	1	1	2.600156	0.4446	0.5081
Cultivo	1	1	0.0144	0.0025	0.9606
Almacenamiento*Cultivo	1	1	1.6641	0.2846	0.5962
Días	3	3	80.432406	4.5846	0.0067
Almacenamiento*Días	3	3	28.439381	1.621	0.1968
Cultivo*Días	3	3	10.448662	0.5956	0.621
Almacenamiento*Cultivo*Días	3	3	64.795087	3.6933	0.018