

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**EMISIÓN DE ETILENO EN SISTEMAS DE ALMACENAJE DE TOMATES:
EFECTO DE LA PRESENCIA Y AUSENCIA DE LA LUZ EN LA
MADURACIÓN DEL TOMATE (*Solanum lycopersicum* L.)**

NICOLE ISABEL FUENTES SALVO

HABILITACIÓN PROFESIONAL PRESENTADA A
LA FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN, PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERA AGROINDUSTRIAL

CHILLÁN – CHILE

2022

**EMISIÓN DE ETILENO EN SISTEMAS DE ALMACENAJE DE TOMATES:
EFECTO DE LA PRESENCIA Y AUSENCIA DE LA LUZ EN LA
MADURACIÓN DEL TOMATE (*Solanum lycopersicum* L.)**

Aprobado por:

Johannes de Bruijn
Ingeniero en Alimentos, Dr.
Profesor Asociado

Profesor Guía

Leslie Violeta Vidal Jiménez
Prof. Est. Qca. Mg. Dr.
Profesor Asociado

Profesor Asesor

Pedro Santiago Melín Marín
Ingeniero Agrónomo, M.S. Dr (c)
Profesor Asociado

Profesor Asesor

Héctor Valdés Morales
Ingeniero Químico, Dr.
Profesor Titular

Profesor Asesor

Christian Gabriel Folch Cano
Profesor de Química y Cs. Naturales, Dr.
Profesor Asociado

Director de Departamento

María Eugenia González Rodríguez
Ingeniero Agrónomo, Ph. D.
Profesor Asociado

Decana

AGRADECIMIENTOS

Principalmente al proyecto Fondecyt Regular No. 1200858 por hacer posible esta investigación.

Agradecer a la Universidad de Concepción, más específicamente a la Facultad de Ingeniería Agrícola y por su puesto al profesor Johannes de Bruijn por su arduo trabajo en terreno, en el laboratorio y como guía en el camino del desarrollo de la Tesis. También agradezco a los profesores asesores de la comisión por su apoyo intelectual y guía en este proceso:

- Prof. Pedro Melín
- Prof. Leslie Vidal

A los profesionales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de la Santísima Concepción por su importante aporte a la investigación, la cual fue esencial para lograr terminar este trabajo:

- Dr. Héctor Valdés
- Sr. Nelson Díaz, Magíster en Ingeniería Agrícola.

A Don Héctor Morales, agricultor del sector Oro Verde, quién, gracias a su excelente disposición, facilitó los tomates necesarios para esta experimentación.

A mis seres queridos, principalmente a mis padres, que siempre me brindaron el apoyo y lo necesario para poder estudiar.

ÍNDICE DE MATERIAS

		Página
	RESUMEN.....	1
	SUMMARY.....	3
1.	INTRODUCCIÓN.....	5
2.	HIPÓTESIS.....	6
3.	OBJETIVOS.....	7
3.1.	Objetivo general.....	7
3.2.	Objetivos específicos.....	7
4.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	8
4.1.	Tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>): Taxonomía.....	8
4.2.	Composición nutricional de tomate fresco.....	8
4.3.	Importancia económica del tomate.....	10
4.3.1.	Consumo nacional.....	12
4.4.	Tomate Toscano.....	15
4.5.	Parámetros fisiológicos en el almacenamiento.....	16
4.5.1.	Tasa de respiración.....	16
4.5.2.	Producción de etileno.....	17
4.5.3.	Respuestas al etileno.....	17
4.5.4.	Calor de respiración.....	18
4.6.	Almacenamiento.....	18
4.6.1.	Temperaturas y condiciones ambientales recomendadas para el manejo del tomate en postcosecha.....	18
4.6.2.	Temperatura óptima de almacenamiento.....	20
4.6.3.	Daño causado por bajas temperaturas.....	21
4.6.4.	Humedad relativa.....	22
4.7.	Parámetros físicos de calidad.....	22
4.7.1.	Tamaño.....	22
4.7.2.	Color.....	23

4.7.3.	Firmeza.....	24
4.8.	Parámetros químicos de calidad.....	25
4.8.1.	Acidez.....	25
4.8.2.	Sólidos totales y sólidos solubles.....	26
4.8.3.	Sabor.....	28
4.9.	Licopeno.....	29
4.10.	¿Qué es el etileno?.....	31
4.10.1.	Biosíntesis del etileno.....	31
4.10.2.	Autocatálisis.....	33
4.10.3.	Calidad de tomates, como se ven afectados frente al etileno.....	34
4.10.4.	¿Qué son los frutos climatéricos?.....	34
4.11.	Respiración climatérica.....	35
4.11.1.	Tasa respiratoria.....	36
4.11.2.	Proceso de respiración.....	37
4.11.3.	Cociente respiratorio (CR).....	38
4.11.4.	Cómo calcular la tasa respiratoria.....	39
4.12.	Espectro electromagnético: luz visible.....	42
4.12.1.	Efecto de la luz en la planta de tomate (precosecha).....	43
4.12.2.	Iluminación durante el almacenamiento.....	44
4.13.	Proceso de maduración.....	45
4.13.1.	Desarrollo del fruto en la planta.....	45
4.13.2.	Maduración del fruto postcosecha.....	46
4.14.	Deterioro de calidad en tomates.....	48
5.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	50
5.1.	Tratamiento preliminar.....	50
5.2.	Determinación de las propiedades físicas.....	51
5.2.1.	Masa.....	51
5.2.2.	Geometría.....	51
5.2.3.	Determinación de color.....	52

5.3.	Análisis de las propiedades químicas.....	54
5.3.1.	Pretratamiento.....	54
5.3.2.	Humedad.....	54
5.3.3.	Sólidos solubles.....	55
5.3.4.	Acidez titulable.....	56
5.3.5.	Grado de madurez.....	56
5.3.6.	Licopeno.....	57
5.4.	Determinación de compuestos gaseosos.....	58
5.5.	Análisis estadísticos.....	60
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	61
6.1.	Fundamentación bioquímica para explicar las diferencias entre tratamientos con y sin luz para algunos parámetros de calidad.....	61
6.1.1.	Contenido de licopeno.....	61
6.1.2.	Contenido de sólidos solubles.....	65
6.1.3.	Grado de madurez.....	66
6.2.	Compuestos gaseosos.....	67
6.2.1.	Disponibilidad de oxígeno y la limitación de la tasa respiratoria.....	67
6.2.2.	Fotorrespiración.....	69
6.2.3.	Fotosíntesis en el fruto.....	70
6.2.4.	Respiración (Ciclo de Krebs).....	71
6.2.5.	Inhibición de la tasa respiratoria por dióxido de carbono...	71
6.3.	Cociente respiratorio.....	73
6.4.	Producción de etileno.....	75
6.5.	Modelación de algunos parámetros de calidad físicos, químicos y compuestos gaseosos.....	78
7.	CONCLUSIONES.....	82
8.	FINANCIAMIENTO.....	83
9.	LITERATURA CITADA.....	84
10.	APÉNDICE.....	99

10.1.	Compuestos gaseosos remanentes en el espacio de cabeza, con diferencias estadísticamente significativas en relación al tiempo para tratamientos con luz y sin luz en almacenamiento de tomates.....	99
10.2.	Parámetros que no presentaron diferencias significativas según test de Friedman entre los tratamientos con y sin luz entre los días 6 y 12.....	101
10.3.	Modelación de parámetros con cambios estadísticamente significativos en el tiempo (según test de correlación de Spearman).....	103

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Contexto taxonómico del género <i>Lycopersicum</i> (López, 2016).....	8
Tabla 2. Composición química de los frutos del tomate (%) (Moreiras <i>et al.</i> , 2013).....	9
Tabla 3. Producción mundial de tomate entre el año 2007 y 2020 (FaoStat).....	11
Tabla 4. Superficie y volumen producido de tomates por país en el año 2020 (FaoStat. Elaborado: Hortoinfo).....	12
Tabla 5. Clasificación de los frutos del tomate de acuerdo al calibre (Laiton <i>et al.</i> , 2013).....	15
Tabla 6. Tasa de respiración de tomate a diferente temperatura y grado de madurez expresado originalmente en mL CO ₂ / kg h. Modificado a mg CO ₂ / kg h (Jaramillo <i>et al.</i> , 2013).....	16
Tabla 7. Calor de respiración en kcal / kg h para tomate refrigerado y a temperatura ambiente en dos estados de madurez (Jaramillo <i>et al.</i> , 2013).....	18
Tabla 8. Temperaturas críticas de almacenamiento para la aparición de “daños por frío” (Marrero, 2019).....	22
Tabla 9. Parámetros de calidad del tomate con madurez de consumo (Ciruelos <i>et al.</i> , 2008).....	26
Tabla 10. Características principales de los tres métodos de medición de la frecuencia respiratoria (Fonseca <i>et al.</i> , 2001).....	41
Tabla 11. Modelos de frecuencia respiratoria de tomate presentados en la literatura (Fonseca <i>et al.</i> , 2001; Castellanos <i>et al.</i> , 2015).....	42
Tabla 12. Pérdida de masa de tomate (%), temperatura ambiente: 22°C, temperatura de refrigeración: entre 8 y 10°C (Cortez <i>et al.</i> , 2016).....	49

Tabla 13.	Concentración de licopeno en tomates Toscano en almacenamiento postcosecha en función del tiempo con tratamientos con luz y sin luz.....	62
Tabla 14.	Sólidos solubles del tomate Toscano en almacenamiento postcosecha en función del tiempo con tratamientos con luz y sin luz.....	65
Tabla 15.	Grado de madurez del tomate Toscano en almacenamiento postcosecha en función del tiempo con tratamientos con luz y sin luz.....	66
Tabla 16.	Tasa de producción de dióxido de carbono en postcosecha de tomate Toscano, para cada tratamiento, desde el día cero hasta el último día correspondiente a cada tratamiento (12 y 17 días respectivamente), considerando una concentración de CO ₂ inicial igual en cada caso.....	72
Tabla 17.	Promedio y desviación estándar del cociente respiratorio del tomate.....	74
Tabla 18.	Modelación, tipo Ley de Potencia, de parámetros de calidad físicas y químicas del tomate.....	79
Tabla 19.	Modelación, tipo Ley de Potencia, de compuestos gaseosos, producidos durante la respiración celular, fotorrespiración y fotosíntesis	80
Tabla 20.	Oxígeno exógeno remanente.....	99
Tabla 21.	Dióxido de carbono exógeno remanente.....	99
Tabla 22.	Etileno exógeno remanente.....	100
Tabla 23.	Contenido de humedad en relación con el tiempo en tratamientos de almacenamiento postcosecha de tomates Toscano con luz y sin luz.....	101
Tabla 24.	Pérdida de masa en relación con el tiempo en tratamientos de almacenamiento de tomates con luz y sin luz.....	101
Tabla 25.	Pérdida de volumen en relación con el tiempo en tratamientos de almacenamiento de tomates con luz y sin luz.....	101

Tabla 26.	Contenido de acidez en relación con el tiempo en tratamientos de almacenamiento de tomates con luz y sin luz.....	101
Tabla 27.	Tono de tomates en relación con el tiempo en tratamientos de almacenamiento de tomates con luz y sin luz.....	102
Tabla 28.	Saturación en tomates en relación con el tiempo en tratamientos de almacenamiento de tomates con luz y sin luz.....	102
Tabla 29.	Diferencia de color en tomates en relación con el tiempo en tratamientos de almacenamiento de tomates con luz y sin luz.....	102
Tabla 30.	Fotos de cada una de las muestras de tomate a través del tiempo en presencia de luz artificial visible.....	110
Tabla 31.	Fotos de cada una de las muestras de tomate a través del tiempo en ausencia de luz artificial visible.....	111

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Evolución de la superficie de tomate para consumo fresco e industrial (Muñoz, 2020).....	13
Figura 2. Evolución de la producción de tomate para consumo fresco e industrial (FaoStat).....	14
Figura 3. Superficie plantada con tomate para consumo fresco, por región en 2013 (ha;%) (Muñoz, 2020).....	14
Figura 4. Rango de temperaturas de maduración del tomate (Genta <i>et al.</i> , 1992).....	19
Figura 5. Temperatura muy alta para la maduración (Genta <i>et al.</i> , 1992).....	19
Figura 6. Parte izquierda: Temperatura de maduración correcta. Parte derecha: Temperatura de maduración muy alta (Genta <i>et al.</i> , 1992).....	20
Figura 7. Color del tomate maduro en RGB (Gallego y Sanz, 2005).....	23
Figura 8. Grados de madurez del tomate (López, 2003).....	24
Figura 9. Estructura química de una molécula de licopeno (Devlin, 1982).....	29
Figura 10. Esquema de la ruta de biosíntesis del etileno, agentes bloqueantes de la síntesis o acción del etileno y los posibles sitios de actuación de los mismos (Martínez-Romero <i>et al.</i> , 2007).....	32
Figura 11. Factores exógenos y endógenos que afectan la producción de etileno (Cerezo, 2017).....	33
Figura 12. Espectro electromagnético de luz visible (entre 400 y 700 nm) (Núñez, 2017).....	43
Figura 13. Carta de color del tomate (Jaramillo <i>et al.</i> , 2013).....	48
Figura 14. Vida útil del tomate, pérdida de masa (%) según tratamiento (Cortez <i>et al.</i> , 2016).....	49

Figura 15.	Oxígeno remanente en el espacio de cabeza en relación con el tiempo con tratamientos con luz y sin luz de almacenamiento de tomates Toscano.....	68
Figura 16.	Dióxido de carbono remanente en el espacio de cabeza en relación con el tiempo en tratamientos con luz y sin luz de almacenamiento de tomates Toscano.....	69
Figura 17.	Tasa de producción de dióxido de carbono (CO ₂) (tasa respiratoria) del fruto de tomate Toscano en el tiempo con tratamientos con y sin luz.....	72
Figura 18.	Coeficiente respiratorio del fruto de tomate, con tratamientos con y sin luz.....	74
Figura 19.	Etileno remanente en el espacio de cabeza en relación con el tiempo en tratamientos con luz y sin luz de almacenamiento de tomates Toscano.....	76
Figura 20.	Tasa de producción de etileno del fruto de tomate Toscano postcosecha, con tratamientos con y sin luz....	77
Figura 21.	Tasa de consumo de oxígeno en el proceso de respiración del tomate en tratamientos con y sin luz.....	100
Figura 22.	Contenido de licopeno del tomate en el tiempo en tratamiento con luz.....	103
Figura 23.	Pérdida de masa del tomate en el tiempo en tratamiento con luz.....	103
Figura 24.	Pérdida de masa del tomate en el tiempo en tratamiento sin luz.....	104
Figura 25.	Acidez del tomate en el tiempo en tratamiento con luz....	104
Figura 26.	Acidez del tomate en el tiempo en tratamiento sin luz.....	104
Figura 27.	Grado de madurez del tomate en el tiempo en tratamiento con luz.....	105
Figura 28.	Grado de madurez del tomate en el tiempo en tratamiento sin luz.....	105
Figura 29.	Tono del tomate en el tiempo en tratamiento con luz.....	105
Figura 30.	Tono del tomate en el tiempo en tratamiento sin luz.....	106

Figura 31.	Saturación de color del tomate en el tiempo en tratamiento con luz.....	106
Figura 32.	Diferencia de color del tomate en el tiempo en tratamiento con luz.....	106
Figura 33.	Diferencia de color del tomate en el tiempo en tratamiento sin luz.....	107
Figura 34.	Oxígeno remanente del tomate en el tiempo en tratamiento con luz.....	107
Figura 35.	Oxígeno remanente del tomate en el tiempo en tratamiento sin luz.....	107
Figura 36.	Dióxido de carbono remanente del tomate en el tiempo en tratamiento con luz.....	108
Figura 37.	Dióxido de carbono remanente del tomate en el tiempo en tratamiento sin luz.....	108
Figura 38.	Etileno remanente del tomate en el tiempo en tratamiento con luz.....	108
Figura 39.	Etileno remanente del tomate en el tiempo en tratamiento sin luz.....	109
Figura 40.	Espectros de emisión de lámparas luminosas. Nótese el máximo de la lámpara incandescente cerca de 900 nm y las líneas de emisión del mercurio en el espectro de la lámpara fluorescente.....	109

ÍNDICE DE ECUACIONES

	Página
Ecuación 1. Coeficiente de temperatura o factor Q_{10}	37
Ecuación 2. Tasa de producción de oxígeno (mg / kg h).....	38
Ecuación 3. Tasa de producción de dióxido de carbono (mg / kg h).....	38
Ecuación 4. Pérdida de masa (%).....	51
Ecuación 5. Volumen del fruto (m^3).....	52
Ecuación 6. Pérdida de volumen del fruto (%).....	52
Ecuación 7. Tono ($^{\circ}h$).....	54
Ecuación 8. Saturación (C^*).....	54
Ecuación 9. Diferencia de color (ΔE).....	54
Ecuación 10. Humedad (%).....	55
Ecuación 11. Acidez titulable (g / 100 mL).....	56
Ecuación 12. Grado de madurez (g s.s. / g ácido cítrico).....	56
Ecuación 13. Contenido de licopeno (mg / kg).....	58
Ecuación 14. Tasa de producción de oxígeno (mg / kg h).....	59
Ecuación 15. Tasa de producción de dióxido de carbono (CO_2) (mg / kg h).....	59
Ecuación 16. Tasa de producción de etileno (mg / kg h).....	60
Ecuación 17. Cociente respiratorio.....	60
Ecuación 18. Ley de la Potencia	78

**EMISIÓN DE ETILENO EN SISTEMAS DE ALMACENAJE DE TOMATES:
EFECTO DE LA PRESENCIA Y AUSENCIA DE LA LUZ EN LA
MADURACIÓN DEL TOMATE (*Solanum lycopersicum* L.)**

ETHYLENE EMISSION IN TOMATO STORAGE SYSTEMS: EFFECT OF
THE PRESENCE AND ABSENCE OF LIGHT ON TOMATO RIPENING
(*Solanum lycopersicum* L.)

Palabras clave: Luz visible, etileno, dióxido de carbono, fotorrespiración, respiración celular.

RESUMEN

Se estudió el comportamiento de postcosecha en la maduración de tomates “larga vida” de variedad Toscano, cosechados en estado de maduración “breaker”, frente a dos tratamientos, los cuales, fueron realizados de manera asincrónica, el primero, con luz, durante 12 horas y el segundo, sin luz, durante las 24 horas por día en un sistema cerrado con 88% de humedad, dentro de una incubadora, a 12°C, y 12.000 lúmenes, durante 12 y 17 días respectivamente. De los tomates se analizaron masa, geometría, humedad, licopeno, sólidos solubles, acidez titulable, índice de madurez, pH y color en el tiempo. Los compuestos gaseosos (O₂, CO₂ y C₂H₄) fueron medidos cada 24 horas. El contenido de licopeno, los sólidos solubles, el grado de madurez, la concentración de O₂, CO₂ y C₂H₄, resultaron afectados por la presencia de luz. La acumulación de licopeno, sólidos solubles y el aumento del grado de madurez incrementaron en presencia de la luz. Sin luz, el contenido de

licopeno y el grado de madurez aumentaron también, aunque en menor medida, pero el contenido de sólidos solubles tendió a disminuir. La concentración de dióxido de carbono y etileno se ve aumentada, mientras que el oxígeno disminuyó con mayor rapidez en presencia de luz. Los parámetros afectados en el tiempo, para cada tratamiento, fueron, licopeno, pérdida de masa, grado de madurez, acidez, color (saturación, diferencia de color), concentración de O_2 , CO_2 y C_2H_4 en el tratamiento con luz, pérdida de masa, acidez, grado de madurez, diferencia de color, concentración de O_2 , CO_2 y C_2H_4 en el tratamiento sin luz. Se determinó la cinética de cambios de estos parámetros, utilizando el modelo de Ley de la Potencia. Todos los parámetros presentaron un buen ajuste al modelo, con coeficientes de determinación superiores al requerimiento mínimo.

**ETHYLENE EMISSION IN TOMATO STORAGE SYSTEMS: EFFECT OF
THE PRESENCE AND ABSENCE OF LIGHT ON TOMATO RIPENING
(*Solanum lycopersicum* L.)**

Keywords: Visible light, ethylene, carbon dioxide, photorespiration, cellular respiration.

SUMMARY

This research was carried out to study the postharvest behavior in the maturation of "long shelf life" tomatoes of the Toscano variety, harvested in "breaker" maturation state, receiving two treatments, which were carried out asynchronously. The first, using light for 12 hours; and the second without light, throughout 24 hours a day in a closed system with 88% humidity, inside an incubator at 12°C and 12.000 lumens, during 12 and 17 days, respectively. Tomatoes were analyzed for mass, geometry, moisture, lycopene, soluble solids, titratable acidity, maturity index, pH, and color over time. Gaseous compounds (O₂, CO₂ and C₂H₄) were measured every 24 hours. Lycopene content, soluble solids, degree of maturity, concentration of O₂, CO₂ and C₂H₄, were affected by the presence of light. The accumulation of lycopene, soluble solids, and the change in the degree of maturity increased in the presence of light. In absence of light the lycopene content and the degree of maturity increased to a lesser extent, while the content of soluble solids tended to decrease. The concentration of carbon dioxide and ethylene increased, while oxygen decreased more rapidly in the presence of light. The parameters

affected over time, for each treatment were lycopene, mass loss, degree of maturity, acidity, color (saturation, color difference), concentration of O₂, CO₂ and C₂H₄ in light treatment; mass loss, acidity, degree of maturity, color difference, concentration of O₂ and CO₂ and C₂H₄ in the treatment without light. The kinetics of changes of these parameters was determined using the Power Law model. In general, the parameters resulted into a satisfactorily fit to the model, with determination coefficients higher than the minimum requirement.

1. INTRODUCCIÓN

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.), pertenece a la familia *Solanaceae*. Es una planta perenne, pero es cultivada casi universalmente como una planta anual, por ser susceptible a daño por heladas. Krarup y Konar (1997) indican que, el sistema radical alcanza una profundidad aproximada de hasta 2 m, con una raíz pivotante y variadas raíces secundarias, en un radio adyacente de hasta 1,5 m. Es de origen centro y sudamericano. Actualmente cosmopolita, cultivada para consumo fresco e industrializado (Allende, 2017). Corresponde a una de las hortalizas de mayor consumo en el mundo con un valor de producción anual de más de 90 mil millones de dólares lo que equivale a 180 millones de toneladas el año 2019 (Bhandari *et al.*, 2021). En el año 2019 el 68,7% de la superficie nacional cultivada con tomate para consumo fresco, se concentra entre las regiones de Valparaíso y del Maule. Siendo la primera la que presenta mayor superficie de tomate cultivado, con 1.020 ha (19,1%), seguida de la Región de O'Higgins, con 938,1 ha (17,6%). En tercer lugar, está la Región Metropolitana, con 862,2 ha (16,2%) (Flaño, 2013). Los tomates se definen como frutos climatéricos, los cuales, durante el proceso de la maduración, aumenta la respiración y la producción de etileno (De Bruijn *et al.*, 2020). Los frutos climatéricos siguen madurando aún después de haber sido recolectados (Sobitec, 2017). Asimismo, pasan por un periodo denominado crisis climática donde los frutos presentan una serie de cambios bioquímicos y fisiológicos que se inician con una producción de etileno dentro de los tejidos, marcando el paso del crecimiento hacia la senescencia y presentando un

aumento de la respiración que conduce a la maduración (INTAGRI, 2017). La producción de etileno aumenta cuando los frutos sufren daños o son atacados por los mohos de la putrefacción. De esta forma puede desencadenarse de forma prematura la maduración durante el transporte (FAO, 1993). Debido a lo anterior, se calcula que, cada año, cerca de 1.300 millones de toneladas de alimentos que se encuentran aptos para el consumo humano, lo que equivale aproximadamente a un tercio del total de los alimentos producidos en el mundo, se pierden o se desperdician. De acuerdo a FAO (2017), las frutas y hortalizas se ubican como los alimentos que más desechos producen, alcanzando pérdidas de un 55% de la producción (Eguillor, 2019).

En consecuencia, la presente investigación se enfoca en conocer el comportamiento de la producción de etileno de tomates frescos cosechados en estado "Breaker", particularmente, el efecto de la presencia y ausencia de luz visible.

2. HIPÓTESIS

Tomates frescos expuestos a luz visible, aumentan la producción de etileno y aceleran su maduración durante el almacenamiento.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Estudiar la incidencia de la luz visible en la maduración de tomates (*Solanum lycopersicum* L.), cv. Toscano, en postcosecha provenientes de agricultura orgánica.

3.2. Objetivos específicos

1. Determinar la relación entre los indicadores fisiológicos y los parámetros físicos y químicos de calidad de tomates en presencia y ausencia de luz artificial visible durante postcosecha.
2. Determinar la cinética de respiración y formación de etileno durante el almacenamiento de tomates.
3. Determinar la cinética de los índices de calidad postcosecha de tomates.

4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

4.1. Tomate (*Solanum lycopersicum*): Taxonomía

El tomate cultivado pertenece a la familia de las solanáceas, la cual comprende 98 géneros y cerca de 2.800 especies. Crecen en gran diversidad de hábitats, desde zonas áridas hasta alta montaña. Lo anterior ha contribuido, a la variabilidad genética presente en las especies de este grupo.

La taxonomía del tomate ha sufrido cambios a través del tiempo, originalmente el tomate fue clasificado como *Solanum lycopersicum* por Linneo, después fue reclasificado por Miller (1754) como *Lycopersicon esculentum*. En la actualidad el tomate se clasifica como *Solanum lycopersicum* L. (Tabla 1) (Salinas, 2017).

Tabla 1. Contexto taxonómico del género *Lycopersicum* (López, 2016).

Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Subclase	Asteridae
Orden	Solanales
Familia	Solanaceae
Género	<i>Solanum</i>
Especie	<i>lycopersicum</i>

4.2. Composición nutricional de tomate fresco

El rápido desarrollo de la producción de tomate en el mundo, se debe exclusivamente a sus cualidades nutritivas y su importancia alimenticia se basa en su elevado contenido de sales minerales (Ca, P, K, Fe, y Mg), vitaminas, ácidos orgánicos y azúcares (Tabla 2), elementos indispensables

para el normal funcionamiento de los diferentes órganos humanos (Alarcón, 2013).

Tabla 2. Composición química de los frutos del tomate (%) (Moreiras *et al.*, 2013).

Composición	Por 100 g de porción comestible
Energía (kcal)	22,00
Proteínas (g)	1,00
Lípidos totales (g)	0,11
Ácidos grasos poliinsaturados (g)	0,11
Hidratos de carbono (g)	3,50
Fibra (g)	1,40
Agua (g)	94
Calcio (mg)	1,10
Hierro (mg)	0,60
Yodo (μg)	7,00
Magnesio (mg)	10,00
Zinc (mg)	0,22
Sodio (mg)	3,00
Potasio (mg)	290,00
Fósforo (mg)	27,00
Selenio (μg)	Trazas
Tiamina (mg)	0,06
Riboflavina (mg)	0,04
Equivalentes niacina (mg)	0,80
Vitamina B6 (mg)	0,11
Folatos (μg)	28,00
Vitamina C (mg)	26,00
Vitamina A: Eq. Retinol (μg)	82,30
Vitamina E (mg)	1,20
Licopeno (mg / g)	0,16

Los frutos de tomate presentan un alto contenido de compuestos antioxidantes (licopeno, β -caroteno, vitamina A, C y E) y metabolitos secundarios, los cuales son de gran importancia para prevenir diferentes tipos de patologías tales como: enfermedades cardiovasculares, cáncer, diabetes, hipertensión arterial y la obesidad (Alarcón, 2013).

4.3. Importancia económica del tomate

La producción mundial de tomate en el año 2020 fue superior a los 186.000 millones de kg, según los datos elaborados por Hortoinfo procedentes de Faostat, el organismo de estadística de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). En el mundo se produjo en ese año un total de 186.821 millones de kg de tomates, un 26,3 % más que trece años atrás (2007) (Tabla 3). La superficie total que en 2020 se dedicó a producir tomate fue de 5.051.983 ha (Tabla 4). China produjo en 2020 un volumen total de 64.768 millones de kg, el 34,7% del total mundial (Hortoinfo, 2021).

La producción mundial de tomate fresco, supera tres veces a las papas, y seis veces al arroz. De ese total de producción, la cuarta parte se procesa y destina a la elaboración de pasta, salsas, ketchup, y en volúmenes menores, a tomate en conserva (Valenzuela *et al.*, 2018).

De acuerdo a las estimaciones de la FAO, el tomate es la hortaliza más cultivada en el mundo. A nivel mundial, el tomate se considera la hortaliza más

importante, ocupando el primer lugar tanto en superficie como en volumen de producción (Flaño, 2013).

Investigaciones realizadas en el mundo confirman, que las pérdidas postcosecha en el cultivo del tomate en países subdesarrollados son elevadas (30-50%), mientras que en los países desarrollados no sobrepasan el 25% (Alarcón, 2013).

Tabla 3. Producción mundial de tomates entre los años 2007 y 2020 (FaoStat).

Año	Producción mundial de tomate (t)
2007	137.132.659
2008	141.620.962
2009	155.256.112
2010	153.288.660
2011	159.469.104
2012	163.164.539
2013	165.224.953
2014	174.454.041
2015	176.467.071
2016	176.857.813
2017	177.816.529
2018	179.897.928
2019	180.766.329
2020	186.821.216

Tabla 4. Superficie y cantidad producida de tomates por país en el año 2020 (FaoStat. Elaborado: Hortoinfo).

	País	Cantidad (t)	Superficie (ha)	t / ha
1	China	64.768.158	1.107.485	58,34
2	India	20.573.000	812.000	25,34
3	Turquía	13.204.015	181.879	72,59
4	Estados Unidos	12.227.402	110.439	110,71
5	Egipto	6.247.910	170.862	39,39
6	Italia	6.437.572	99.780	62,62
7	Irán	5.787.094	129.058	44,84
8	España	4.312.900	55.470	77,75
9	México	4.137.342	84.926	48,72
10	Brasil	3.753.595	51.960	72,24
11	Nigeria	3.693.722	844.445	4,37
12	Rusia	2.975.588	80.765	36,84
13	Ucrania	2.250.300	74.900	30,04
14	Uzbekistán	1.928.508	57.746	33,39
15	Argelia	1.635.616	26.311	62,16
26	Chile	779.237	11.216	69,47
	Otros países	32.109.257	1.152.741	-
	Total	186.821.216	5.051.983	37,01

4.3.1. Consumo nacional

A nivel nacional, el tomate se considera la hortaliza más importante desde el punto de vista de la alimentación de la familia chilena. A nivel mundial, Chile se encuentra en el vigésimo sexto lugar en cuanto a producción de tomate. Según INE EPF 2013, el tomate, ocupa el primer lugar entre las hortalizas consumidas y destinan recursos económicos de hasta un 0,365% de ponderación para adquirirla. Según VI EPF 2007 la ponderación para ese año, solo fue de un 0,32% (Flaño, 2014).

El tomate para consumo fresco es el tercer cultivo hortícola en términos de superficie en Chile, después del choclo y la lechuga, de acuerdo a las estimaciones del INE y el primero en cuanto a producción, según FaoStat (Figura 2). La evolución de la superficie de tomate para consumo fresco a nivel nacional, presenta una tendencia en aumento a partir del año 2016 (Figura 1). El área plantada en 2019 fue de un 7,3% más respecto al año 2016. Se estima que la producción de tomate tanto para consumo fresco como para fines industriales cultivado en el país en el año 2019 fue de aproximadamente 1.044.316 ton (faostat).

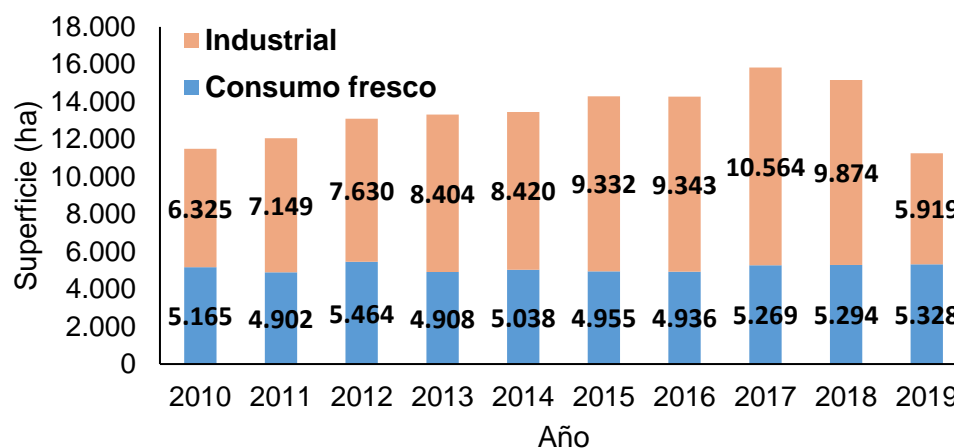


Figura 1. Evolución de la superficie de tomate para consumo fresco e industrial (Muñoz, 2020).

Desde el año 2010 al 2018 la producción de tomate en Chile tuvo una clara tendencia a aumentar, pero luego del año 2018, la producción tiende a disminuir (Figura 2).

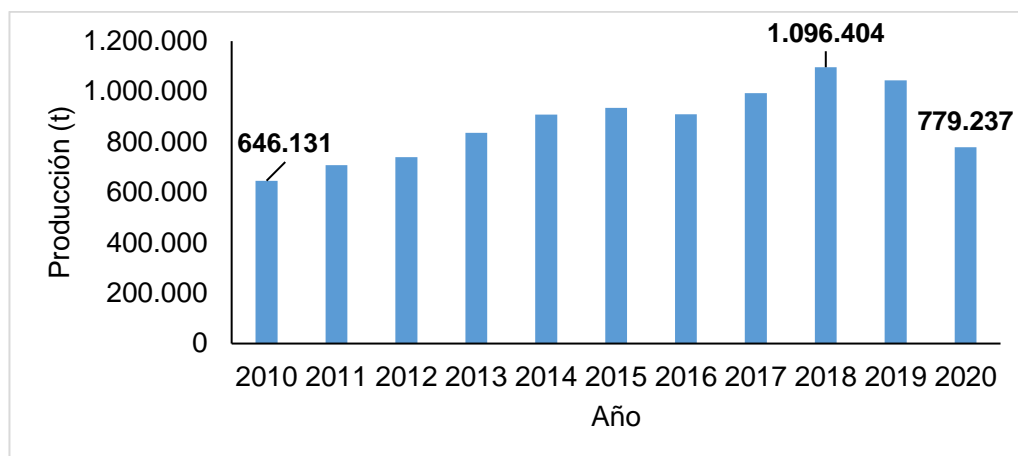


Figura 2. Evolución de la producción de tomate para consumo fresco e industrial (FaoStat).

El 68,7% de la superficie nacional con tomate para consumo fresco se concentra entre las regiones de Valparaíso y del Maule (Figura 3). La región de Valparaíso tuvo la mayor superficie cultivada con tomate fresco en 2019, con más de mil hectáreas y un 19,1% de la superficie a nivel nacional. Mientras que, las regiones del Maule y Metropolitana, presentaron un 32% de la superficie nacional.

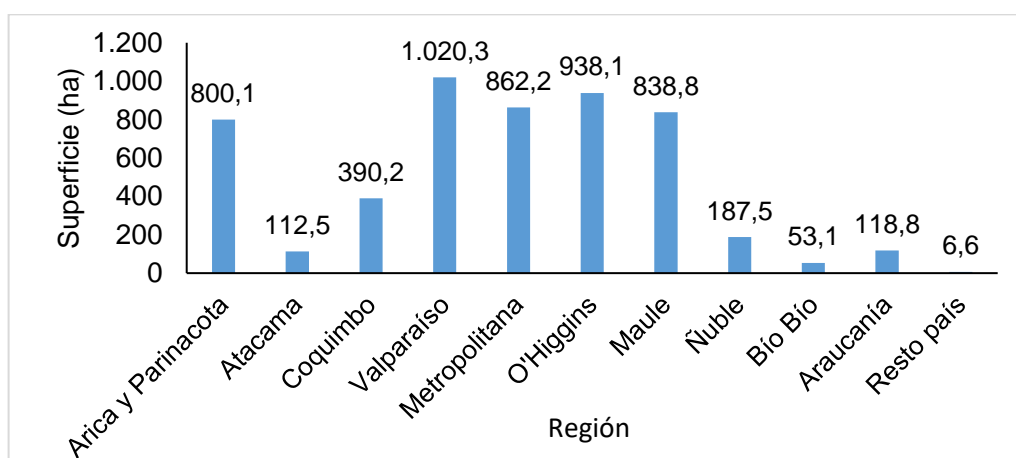


Figura 3. Superficie plantada con tomate para consumo fresco, por región en 2019 (ha) (Muñoz, 2020).

4.4. Tomate Toscano

Es un tomate híbrido determinado redondo, de excelente vida luego de la cosecha, que se destaca por su precocidad, firmeza, color y calibres de fruta.

Las características de la variedad Toscano (SLA, Semillas Latinoamericanas), utilizada en este estudio son:

- Crecimiento vigoroso en primavera - verano
- Larga vida
- Fruto redondo
- Correcto color de maduración
- Masa: 250-330 g
- Cultivo entutorado.
- Alto porcentaje de calibres de primera (Tabla 5)

Densidad de plantación:

En el caso de cultivo rastrero, se aconseja una densidad de 10.000 plantas / ha. Cuando se realiza en forma entutorada, la densidad fluctúa entre las 12.000 a 15.000 plantas / ha (SLA, Semillas latinoamericanas).

Tabla 5. Clasificación de los frutos del tomate de acuerdo al calibre (Laiton *et al.*, 2013).

Clasificación	Diámetro del fruto (mm)
Calibre 1 (extra)	>82
Calibre 2 (primera)	67 a 82
Calibre 3 (segunda)	57 a 67
Calibre 4 (tercera)	47 a 57
Calibre 5 (cuarta)	<47

Cultivo rastrero: La planta y el fruto se desarrollan a ras de suelo.

Cultivo entutorado: Este tipo de cultivo genera que la planta crezca en sentido vertical.

4.5. Parámetros fisiológicos en el almacenamiento

4.5.1. Tasa de respiración

La respiración es la conversión de materiales orgánicos complejos como carbohidratos, proteínas y grasas en moléculas simples. En esta reacción se utiliza oxígeno (O_2) y se libera dióxido de carbono (CO_2), vapor de agua y energía, en forma de calor principalmente. La velocidad de respiración determina en gran medida el tiempo de vida útil del producto y está directamente relacionada con la temperatura, de manera que, a mayor temperatura, mayor es la velocidad de respiración. El tomate está clasificado como una hortaliza con una tasa de respiración moderada (Tabla 6), donde la temperatura vuelve a ser un factor importante, dado que, cada incremento de $10\text{ }^\circ\text{C}$ por encima de la óptima, la velocidad de deterioro se duplica o triplica (Jaramillo *et al.*, 2013).

Las tasas de respiración del tomate a temperaturas de almacenamiento de 10, 15, 20 y 25°C son las siguientes:

Tabla 6. Tasa de respiración de tomate a diferente temperatura y grado de madurez expresado originalmente en $\text{mL } CO_2 / \text{kg h}$ (Jaramillo *et al.*, 2013), modificado a $\text{mg } CO_2 / \text{kg h}$.

Estado	Tasa de respiración de tomate ($\text{mg } CO_2 / \text{kg h}$)			
	10°C	15°C	20°C	25°C
Verde maduro	11,86 - 17,78	15,81 - 27,66	27,66 - 41,49	35,57 - 51,38
Maduro	13,83 - 15,81	23,71 - 29,64	23,71 - 43,47	29,64 - 51,38

4.5.2. Producción de etileno

Las tasas de producción de etileno por parte del tomate pueden considerarse moderadas; sin embargo, se tornan importantes en el almacenamiento por periodos prolongados de tiempo, pues el etileno acelera los procesos de maduración llevándolos a alcanzar la senescencia en tiempos más breves. Por esta razón se debe evitar la mezcla de productos con sensibilidad al etileno con productores de etileno; el tomate verde maduro no debe almacenarse con tomates maduros (Jaramillo *et al.*, 2013).

Las tasas de producción de etileno del tomate en almacenamiento a temperaturas de 10°C y 20°C son 1,2 - 1,5 $\mu\text{L} / \text{kg h}$ ($1,42 \cdot 10^{-3}$ - $1,77 \cdot 10^{-3}$ $\text{mg} / \text{kg h}$) y de 4,3 - 4,9 $\mu\text{L} / \text{kg h}$ ($5,07 \cdot 10^{-3}$ - $5,78 \cdot 10^{-3}$ $\text{mg} / \text{kg h}$) respectivamente (Suslow y Cantwell, 1997).

4.5.3. Respuestas al etileno

Los tomates son sensibles al etileno exógeno y la exposición de la fruta verde madura al etileno iniciará la maduración. Uno de los parámetros más importantes en la madurez de cosecha del tomate es el color, siendo verde maduro a rojo (dependiendo del destino del tomate). Los tomates maduros producen etileno a una tasa moderada y se debe evitar el almacenamiento conjunto o el envío con productos sensibles, como lechuga y pepinos.

4.5.4. Calor de respiración

Las condiciones óptimas de almacenamiento para el tomate dependen de diferentes factores, entre los cuales cabe mencionar su estado de madurez, el tiempo de almacenamiento esperado y las características exigidas por el mercado. Las cuales pueden ser controladas si se conoce la tasa de respiración del producto, el calor de respiración (Tabla 7), la tasa de producción de etileno, la influencia de la temperatura, la humedad relativa, la concentración de gases de respiración, la sensibilidad del producto al etileno y la condición inicial del producto en cada materia (Jaramillo *et al.*, 2013).

Tabla 7. Calor de respiración en kcal / kg h para tomate refrigerado y a temperatura ambiente en dos estados de madurez (Jaramillo *et al.*, 2013).

Estado	Refrigerado	Ambiente
Verde maduro	0,0167	0,109
Maduro	0,0370	0,104

4.6. Almacenamiento

4.6.1. Temperaturas y condiciones ambientales recomendadas para el manejo del tomate en postcosecha

El control adecuado de las temperaturas requeridas por el tomate en el mercado durante la manipulación y distribución (clasificación, espera y transporte) es muy importante. Existen cuatro rangos de temperatura cuyos efectos difieren sobre la calidad del tomate (Figura 4) (Genta *et al.*, 1992).

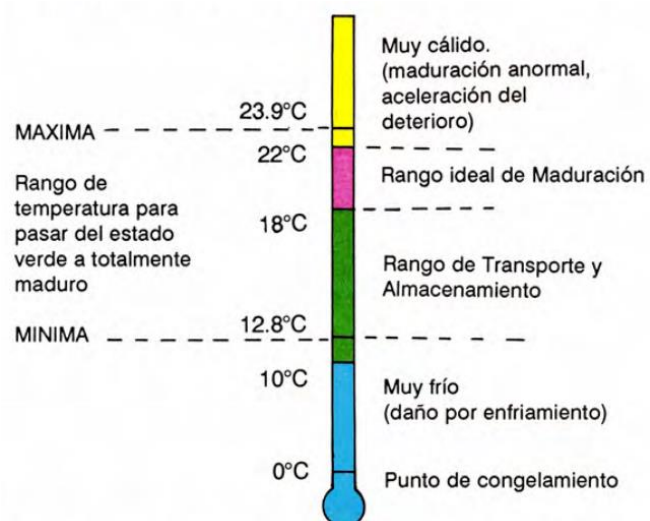


Figura 4. Rango de temperaturas de maduración del tomate (Genta *et al.*, 1992).

1. Mayor a 22 °C. La fruta se torna de color naranja o amarillo debido a la inhibición de la formación de licopeno. Se ablanda rápidamente y disminuye el sabor (Figura 5).



Figura 5. Temperatura muy alta para la maduración (Genta *et al.*, 1992).

2. 18°C-22°C. La fruta madurada en este rango alcanza color rojo fuerte.

Se considera la temperatura óptima de maduración (Figura 6).



Figura 6. Parte izquierda: Temperatura de maduración correcta. Parte derecha: Temperatura de maduración muy alta (Genta *et al.*, 1992).

4.6.2. Temperatura óptima de almacenamiento

La temperatura generalmente aceptada para el almacenamiento convencional de tomate varía entre 11 - 12°C (la fruta comienza a madurar a partir de los 13°C) permitiendo al producto mantener buen color, presentar un buen perfil de aroma y sabor, y evitar excesivas pérdidas de cantidad y calidad (Jaramillo *et al.*, 2013).

La temperatura óptima de almacenamiento para tomate verde varía entre 12,5 y 15°C, mientras que para tomate rojo-claro se encuentra entre 10 y 12,5°C y para tomate maduro entre 7 y 10°C. El tiempo de vida útil bajo estas condiciones puede oscilar entre 1 y 3 semanas para tomate maduro-firme y

verde-maduro respectivamente, pero puede prolongarse con la aplicación de atmósferas modificadas (Jaramillo *et al.*, 2013).

4.6.3. Daño causado por bajas temperaturas

La fruta madura (roja) se puede almacenar sólo temporalmente entre 5 y 10°C (máximo 7 días), y debe ser consumida inmediatamente. La fruta verde en almacenamiento bajo los 10°C pierde su capacidad para madurar aun cuando retorne a las condiciones normales de temperatura (Genta *et al.*, 1992).

Los síntomas más conocidos de daños por frío en tomate verde se encuentran el ablandamiento, la infiltración acuosa y la desecación interna; mientras que en el tomate maduro se presenta ablandamiento, maduración incompleta, podredumbre y color anómalo (Jaramillo *et al.*, 2013).

En productos de origen templado, conservados a temperaturas cercanas a 0°C, un peligro obvio son los daños por congelación. La temperatura de inicio en la cual aparecen daños depende de las características del producto hortofrutícola, especialmente el contenido en sólidos solubles totales (TSS). Los productos con alto nivel de TSS serán menos susceptibles a estos daños debido al efecto de la disminución de la temperatura de congelación.

Más comunes y de mayor importancia económica son los daños que aparecen en los productos de origen tropical y subtropical cuando se almacenan a temperaturas inferiores a la “temperatura crítica” que difiere para cada tipo de producto (Tabla 8) (Marrero, 2019).

Tabla 8. Temperaturas críticas de almacenamiento para la aparición de “daños por frío” (Marrero, 2019).

Producto	Temperatura crítica (°C)
Plátano	12 - 14
Tomate	6 - 9
Aguacate / palta	
-Hass y Fuerte	7 - 8
-Antillanos	12
Naranja	5
Pomelos	12
Pimiento	5

4.6.4. Humedad relativa

Los factores que afectan la pérdida de agua implican humedad relativa, temperatura del ambiente y velocidad del aire. A mayor temperatura del producto y del ambiente, la pérdida de agua se incrementará. Por tanto, la humedad relativa debe ser alta (>85%) para evitar la deshidratación de los productos, pero no tan alta (<95%), dado que, podría favorecer el desarrollo de hongos y pudriciones tanto en la cicatriz del pedúnculo como en la superficie del fruto (Jaramillo *et al.*, 2013).

4.7. Parámetros físicos de calidad

4.7.1. Tamaño

Éste depende de la preferencia del mercado consumidor y del destino de la fruta. En los países desarrollados se prefiere un tamaño medio (6,5 a 7,5 cm de diámetro). En Uruguay, hasta 1980, se eligió una fruta grande, pero después en 1992, el tamaño requerido fue de aproximadamente 7 a 9 cm de

diámetro. El tamaño aproximado de 7 cm fue más conveniente para el uso de ensaladas, sándwiches e individualmente (Genta *et al.*, 1992).

4.7.2. Color

El color puede medirse por métodos subjetivos, es decir por apreciación humana de las intensidades y tonos (Reina *et al.*, 1998).

El color rojo profundo de los tomates se debe a la molécula denominada licopeno, la cual constituye aproximadamente entre 80-90% del contenido total de carotenoides presentes en el tomate (Navarro-González y Periago, 2016).

La intensidad del color rojo del tomate maduro en estado Red o Rojo puede darse en coordenadas Lab o RGB (Figura 7).

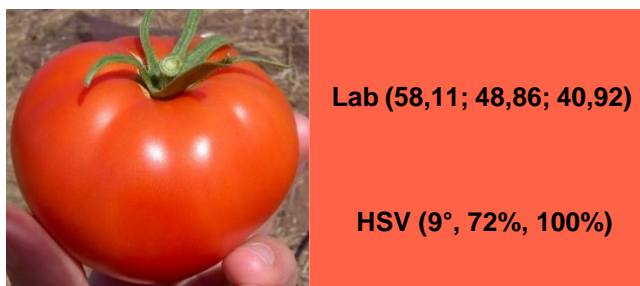


Figura 7. Color del tomate maduro en RGB (Gallego y Sanz, 2005).

El color está determinado principalmente por la temperatura siendo el principal índice del estado de madurez. La fruta cambia gradualmente su coloración hacia el rojo al madurar. “United States Standards for Grades of Fresh Tomatoes” ha clasificado dicho cambio en seis estados (Genta *et al.*, 1992) (Figura 8):

1. "Mature Green". Verde maduro.
2. "Breaker". Comenzando a virar de color. No supera el 10% de la superficie de la fruta con coloración amarilla o rosada.
3. "Turning". Pintón. Los colores del punto 2 se encuentran entre el 10 y 30% de la superficie de la fruta.
4. "Pink". Rosado. Entre 30 y 60% de la fruta es rosada o roja. Nótese que no se incluye el amarillo.
5. "Light Red". Rojo pálido. Más del 60% y menos del 90% de la fruta presenta coloración rosada o roja.
6. "Red". Rojo. Más del 90% de la superficie es roja. Nótese que no se incluye el rosado (Genta *et al.*, 1992).

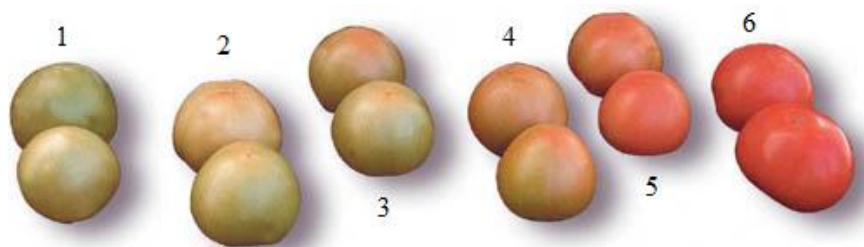


Figura 8. Grados de madurez del tomate (López, 2003).

Dónde: 1, Verde maduro; 2, Inicio de cambio de color; 3, Pintón; 4, Rosado; 5, Rojo pálido y 6, Rojo. Por ser climatérico, el tomate puede alcanzar el grado 6 aun cuando sea cosechado en el grado 1.

4.7.3. Firmeza

Se prefiere una fruta que permanezca firme, una vez que alcanza la madurez total. Se debe descartar la fruta que cede ligeramente a la presión moderada de los dedos de la mano. Una manera rápida para comprobar el buen estado

de la fruta es cortarla y observar si se produce únicamente la salida de pocas gotas de jugo o semillas. Además, internamente la fruta no debe contener espacios de aire.

La calidad textural del tomate está influenciada por la rigidez de la piel, firmeza de la pulpa y estructura interna de la fruta (relación pericarpio / material locular). La producción de la enzima poligalacturonasa cumple un rol importante en los cambios de textura, debido a la solubilización de las macromoléculas de la pared celular durante la maduración (Genta *et al.*, 1992).

4.8. Parámetros químicos de calidad

4.8.1. Acidez

La acidez total se debe a la presencia de diversos ácidos orgánicos en el tomate (ácidos tartárico, málico, acético, cítrico, succínico, glutámico, entre otros). La mayor proporción implica el ácido cítrico y suele oscilar entre 0,35 y 0,40 g / 100 mL de zumo. La determinación de la acidez total se realiza mediante una valoración ácido-base, expresando los resultados como porcentaje de ácido cítrico. La determinación individual de los diversos ácidos se puede realizar mediante tests enzimáticos comerciales o mediante cromatografía líquida de alta presión, HPLC con columnas específicas (Ciruelos *et al.*, 2008).

4.8.2. Sólidos totales y sólidos solubles

El porcentaje de sólidos totales en el fruto de tomate varía entre 5 a 7,5%. El 25% corresponde a compuestos insolubles, como celulosa y proteínas; el 75% restante implica sólidos solubles los cuales aportan la calidad industrial del tomate (Arredondo, 2016).

Los tomates con madurez de consumo (etapa 6) presentan los siguientes parámetros químicos (Tabla 9):

Tabla 9. Parámetros de calidad del tomate con madurez de consumo (Ciruelos *et al.*, 2008).

Parámetro	Valor
pH	4,2 - 4,4
Sólidos solubles (°Brix)	4,5 - 5,5
Acidez (g / 100 mL)	0,35 - 0,40

Los frutos del tomate contienen: azúcares reductores como fructosa, glucosa y, trazas de sacarosa que constituyen 53 a 65% de los sólidos solubles, ácidos cítrico (9%) y málico (4%) principalmente, ácido ascórbico, aminoácidos (2-2,5%), carotenoides, compuestos volátiles responsables del aroma, sales minerales (8%) y sustancias pécticas proveniente de la pared celular (San Martín-Hernández *et al.*, 2012).

El contenido final de sólidos solubles totales parece estar influenciado por la acumulación de almidón durante el periodo de crecimiento rápido del fruto en la planta. La velocidad de acumulación alcanza un máximo a los 20-25 días después de la antesis y llega a componer un 20% (m / m) de la materia seca

(Nuez, 2001). El almidón se acumula preferentemente en el tejido locular y placentario. Los tomates inmaduros tienen concentraciones relativamente elevadas de almidón que pueden superar el 1% (m / m) de la materia fresca cuando el crecimiento del fruto alcanza su valor máximo, pero el almidón empieza a hidrolizarse y desciende a un 0,03 - 0,1% (m / m) en los frutos maduros rojos. En los frutos inmaduros existen grandes granos de almidón, pero su tamaño se reduce en el estado verde maduro y luego prácticamente desaparecen (Nuez, 2001).

Por otro lado, la sacarosa corresponde al 90% de los productos resultantes de la fijación fotosintética del dióxido de carbono (CO_2) en las hojas, y no suele exceder el 0,1 % (m / m) de la materia fresca. También es el compuesto principal para el transporte a larga distancia de los hidratos de carbono a través del floema en la mayor parte de las plantas. La sacarosa es un disacárido formado por dos hexosas: glucosa y fructosa, las cuales necesitan cuatro triosas fosfato, dos por cada hexosa, para sintetizar una molécula de sacarosa (Nuez, 2001).

La síntesis de sacarosa y almidón se inicia a partir de triosa-fosfato, que al unirse dos moléculas da lugar a la fructosa-1,6-bisfosfato, originando fructosa-6-fosfato, que se convierte, por medio de enzimas específicas, en hexosas fosforiladas tales como la glucosa-6-fosfato y glucosa-1-fosfato (Díaz de la Guardia, 2010).

El contenido de azúcares experimenta generalmente un brusco crecimiento cuando el fruto alcanza un color amarillento y aumenta de manera paulatina

durante el resto de la maduración. La recolección prematura afecta negativamente el contenido de azúcares. La eliminación de las hojas, el sombreado y el descenso de la duración de la luz disminuyen el contenido de azúcares (Nuez, 2001).

4.8.3. Sabor

El sabor es percibido por la lengua. Existen cuatro sensaciones gustativas: 1) Salado, 2) Amargo, 3) Dulce, 4) Ácido, además de Umami. Cada uno es percibido por una determinada zona de la lengua; siendo el dulce y el ácido, percibidos principalmente en el tomate en buen estado.

Azúcares, ácidos e interrelaciones son relevantes en dulzura, acidez y sabor general del tomate. La fructosa y el ácido cítrico son los principales compuestos que otorgan el sabor dulce y ácido, respectivamente. La glucosa y el ácido málico se consideran menos importantes. El mejor sabor de la fruta se logra con niveles altos en azúcares y relativamente altos en ácidos. Los niveles altos en ácidos y bajos en azúcares producen una sensación ácida o picante, mientras que, a la inversa, causan un sabor dulce o suave. Cuando ambos compuestos, carbohidratos y ácidos, son inferiores, la fruta es insípida. La zona del pericarpio de la fruta contiene más azúcares reducidos y menos ácidos orgánicos que la zona locular (Genta *et al.*, 1992).

4.9. Licopeno

Carotenoide de estructura acíclica, isómero de beta-caroteno que carece de actividad provitamina A (por no contar con el anillo de beta-ionona), cuya fórmula es $C_{40}H_{56}$ (Figura 9). Se encuentra en la naturaleza como pigmento natural liposoluble, responsable del color rojo y naranja de algunas frutas y verduras, se caracteriza por tener estructura química de cadena abierta alifática formada por cuarenta átomos de carbono con trece enlaces dobles de los cuales once son conjugados, es muy reactivo frente al oxígeno y a los radicales libres. Una de las principales fuentes de licopeno, es el tomate (80-90% del contenido total de carotenoides) (Cruz *et al.*, 2013). El contenido de licopeno en el tomate se ve afectado por varios factores, como la nutrición de la planta, medio ambiente y el genotipo, que en conjunto pueden afectar significativamente la biosíntesis de carotenoides. Por lo tanto, la cantidad de licopeno en tomate puede variar de 18,6 a 64,98 mg / kg de materia fresca (Navarro-González y Periago, 2016).

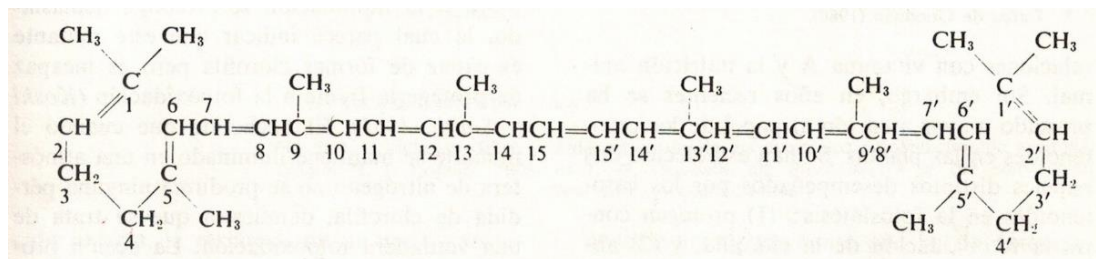


Figura 9. Estructura química de una molécula de licopeno (Devlin, 1982).

Fraser *et al.*, (1994) indican que más del 90% de los pigmentos rojos en tejidos de tomates maduros contienen el carotenoide licopeno según el análisis RP-HPLC a extractos de carotenoides. El licopeno se encuentra en los alimentos ligado en forma trans a la matriz sólida, impidiendo su liberación completa y lo hace menos susceptible a la absorción y digestión en el aparato digestivo humano. Se recomienda para lograr un mejor aprovechamiento de licopeno, que se consuma el tomate como producto procesado. El procesamiento mediante el calor rompe las paredes celulares, debilitando las fuerzas de enlaces entre el licopeno y la matriz del tejido, aumentando el área superficial disponible para la digestión debido a que el tratamiento térmico transforma las formas isoméricas trans del licopeno, a cis (5-cis, 9-cis, 13-cis y 15-cis) mejorando su biodisponibilidad. El contenido de licopeno en salsa de tomate se encuentra entre 9,9 - 13,4 mg / 100 g mientras que en los alimentos frescos como el tomate está entre 0,88 - 7,74 mg / 100 g de materia húmeda, lo cual concuerda con resultados obtenidos en este trabajo (Tabla 13). En Estados Unidos, más del 80% de la ingesta de licopeno proviene de los productos procesados del tomate como el jugo, la salsa kétchup, las salsas para espagueti y pizza (Cruz *et al.*, 2013).

4.10. ¿Qué es el etileno?

El etileno, cuya fórmula química es C_2H_4 , es una molécula con una masa molecular de 28 g / mol, con dos átomos de carbono unidos con un doble enlace y que se presenta naturalmente en forma gaseosa.

Se considera un regulador del crecimiento u hormona vegetal que controla el crecimiento de la planta desde la germinación de las semillas hasta la senescencia de los órganos y los frutos (Martínez-Romero *et al.*, 2007).

4.10.1. Biosíntesis del etileno

Yang y Hoffman (1984), explican que la biosíntesis de etileno en la maduración se produce a partir de la metionina que, mediante, la incorporación de adenosina, se transforma en S-adenosil metionina (SAM), la cual se hidroliza por la acción de la ACC sintetasa para producir 1-aminociclopropano-1-ácido carboxílico (ACC), que por la acción de la ACC oxidasa, conocida también como EFE (enzima formadora de etileno), da lugar al etileno (Figura 10).

Terai (1990), afirma que al iniciarse la maduración se produce un aumento en la concentración de ACC oxidasa, iniciándose de este modo la producción autocatalítica de etileno. Según Rothan y Nicholas (1989), los niveles de ACC permanecen estables mientras la producción de etileno se eleva, para aumentar y luego descender (Nuez, 2001).

Existen múltiples factores, tanto internos como externos, que estimulan la producción de etileno en los tejidos vegetales (Figura 11). La formación de

etileno a partir de ACC va acompañada de la generación de ácido cianhídrico (HCN), que es sumamente tóxico para las plantas. La eliminación del HCN se genera mediante la reacción catalizada por la enzima β -cianoalanina sintasa, que produce β -cianoalanina, cuya velocidad de reacción es muy superior a la síntesis de HCN y, por tanto, mantiene su concentración inferior a los niveles celulares tóxicos (Zacarías y Lafuente, 2013).

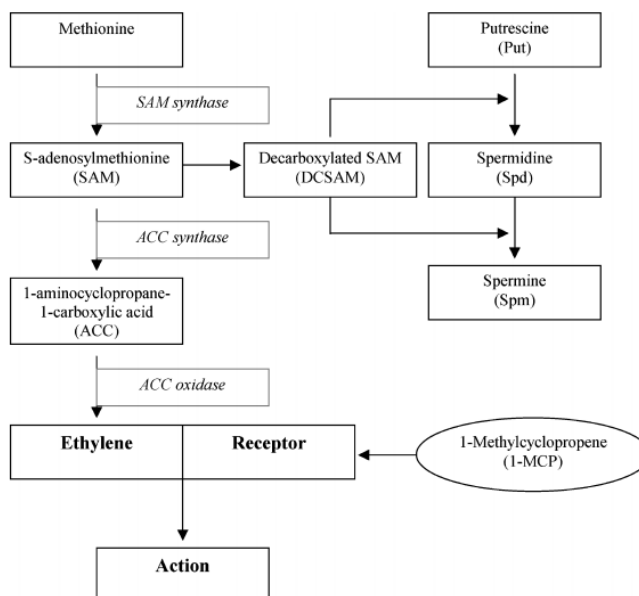


Figura 10. Esquema de la ruta de biosíntesis del etileno, agentes bloqueantes de la síntesis o acción del etileno y los posibles sitios de actuación de los mismos (Martínez-Romero *et al.*, 2007).

Nota: AVG (ácido aminoetoxivinilglicina), AOA (ácido aminooxicacético), SAM (S-adenosil-metionina), ACC (1-aminociclopropano-carboxílico).

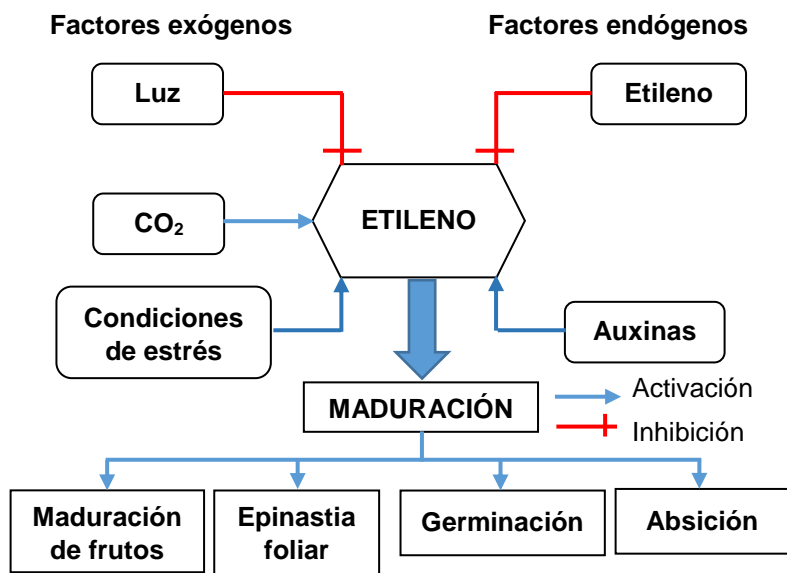


Figura 11. Factores exógenos y endógenos que afectan la producción de etileno (Cerezo, 2017).

4.10.2. Autocatálisis

Una propiedad importante del etileno es la capacidad para controlar su propia síntesis, tanto estimulándola como inhibiéndola. La activación de la producción de etileno por el mismo compuesto (denominada autocatálisis) se ha demostrado en diferentes tejidos y es un proceso característico durante la maduración de los frutos climatéricos. Este proceso requiere la presencia continua de etileno y estimula coordinadamente la síntesis y la actividad de ambas enzimas, ACC sintetasa y ACC oxidasa. La inducción de la oxidasa por el etileno parece ser previa a la sintetasa, incrementando progresivamente los niveles basales de etileno sin que ello afecte al nivel de su precursor metabólico, ACC. Cuando la concentración de etileno ha superado un nivel umbral, comenzaría la estimulación de la actividad ACC sintetasa, con el

consiguiente aumento de ACC y, dado que la actividad ACC oxidasa ya está previamente intensificada, tiene lugar el aumento masivo de la producción de etileno, característico durante el climaterio de los frutos (Zacarías y Lafuente, 2013).

4.10.3. Calidad de tomates, como se ven afectados frente al etileno

Por efecto de la maduración, dada por el etileno, el almidón de los frutos se transforma en azúcares (fructosa y glucosa), asimismo se reducen los taninos (compuestos característicos de la fruta “verde” que dan una sensación de astringencia en boca), y aumenta el pH, en combinación con una disminución de la acidez.

Todas estas transformaciones contribuyen a que los frutos resulten más agradables a nuestro paladar al entremezclarse los sabores ácidos con los dulces. Por otra parte, los colores de los frutos se acentúan más cuando están maduros, esto significa que aumentan las concentraciones de carotenos (amarillos, naranjas, rojos) y antocianinas (rojos, morados, azules) (Editorial Agro Cultivos, 2016).

4.10.4. ¿Qué son los frutos climatéricos?

Los frutos climatéricos son aquellos que siguen madurando aún después de haber sido recolectados, lo cual se debe a que independientemente de que ya no estén en la planta, aumentan su tasa de respiración (crisis climatérica) y la

producción endógena de etileno, es decir, por la misma planta. Una práctica que se realiza para madurar este tipo de frutos más rápido, por ejemplo, para sacarlos cuando existe un buen precio de venta, consiste en la aplicación exógena de etileno líquido, lo que implica realizar aplicaciones de éste para que se acelere la maduración. Una gran ventaja de los frutos climatéricos es que pueden ser cosechados en un estado previo a la maduración, de modo que se puedan transportar a grandes distancias sin tantos problemas por el tiempo que tardarán en alcanzar su maduración comercial, tiempo en el cual ya habrán llegado a los mercados de destino (Sobitec, 2017).

4.11. Respiración climatérica

La respiración es un proceso mediante el cual la energía luminosa capturada y almacenada en compuestos orgánicos mediante la fotosíntesis, se libera a través de la oxidación.

El proceso de respiración produce energía química aprovechable y calor (vital o de respiración). Mientras que el fruto se encuentre adherido a la planta, los carbohidratos que se oxidan a CO_2 y agua, se reemplazan por fotosintatos desde las hojas verdes o los órganos de reserva de la planta. Una vez separada de la planta, la fruta depende de sus carbohidratos de reserva. El proceso de respiración debe continuar para producir energía y se realicen funciones celulares vitales. El ambiente de almacenamiento postcosecha se ha diseñado para reducir la tasa de respiración al mínimo requerido para

mantener los procesos vitales. Las reservas almacenadas se conservan y por tanto la vida postcosecha de la fruta se extiende al máximo (Kader, 2002).

4.11.1. Tasa respiratoria

Se define la tasa respiratoria (TR) como la cantidad de anhídrido carbónico emitido o de oxígeno consumido por kg de fruta por hora.

Esta tasa depende de numerosos factores, tales como:

- El estado de desarrollo: los frutos se caracterizan por tener una alta actividad respiratoria en estados jóvenes que disminuye en estados posteriores, con la excepción de los frutos climatéricos, que, al madurar, presentan de nuevo un aumento en la respiración.
- Tamaño del producto: a mayor relación superficie / volumen del fruto, mayor actividad respiratoria.
- Temperatura: tiene un efecto directo en la velocidad de la actividad respiratoria. A mayor temperatura, mayor actividad respiratoria, que acelera el proceso de maduración, mientras que, a bajas temperaturas, la velocidad disminuye.
- Composición atmosférica: las concentraciones de O₂ y CO₂ ambientales modifican la velocidad de la actividad respiratoria. Así, si los niveles de oxígeno son más bajos (<21%) y los de dióxido de carbono más altos (>0,03%) que los del aire ambiente, la respiración

se reduce y consecuentemente se prolonga la vida de almacenamiento (Ortolá, 2020).

- Presencia de etileno: estimula la respiración de tejidos y órganos vegetales.
- Daños mecánicos y microorganismos: provocan un aumento en la actividad respiratoria. La intensidad de la respuesta depende en gran parte de la severidad de los daños y de la variedad de los frutos (Fonseca *et al.*, 2001).

El efecto de la temperatura sobre la respiración se puede cuantificar a través del coeficiente de temperatura o factor Q_{10} , el cual refleja los cambios en la tasa de respiración por cada 10°C de cambio en la temperatura a través de la siguiente expresión:

$$Q_{10} = \frac{\text{Respiración a la temperatura } (T + 10) ^{\circ}\text{C}}{\text{Respiración a la temperatura } T ^{\circ}\text{C}} \quad (1)$$

Por ejemplo: Un valor de Q_{10} respiratorio de 2,0 significa que la tasa de respiración a 20°C es el doble que la tasa respiratoria medida a 10°C (Ribas-Carbó *et al.*, 2013).

4.11.2. Proceso de respiración

La respiración es un proceso metabólico que proporciona la energía para los procesos bioquímicos de las plantas. Durante la respiración se forman varios sustratos utilizados en importantes vías metabólicas sintéticas de la planta

(Meyer *et al.*, 1973). La respiración aeróbica consiste en la descomposición oxidativa de las reservas orgánicas en moléculas más simples, incluidos el CO₂ y el agua, junto con la liberación de energía. Los sustratos orgánicos descompuestos en este proceso pueden incluir carbohidratos, lípidos y ácidos orgánicos. El proceso consume O₂ en una serie de reacciones enzimáticas. La glucólisis, el ciclo del ácido tricarboxílico y el sistema de transporte de electrones son las vías metabólicas de la respiración aeróbica (Fonseca *et al.*, 2001).

4.11.3. Cociente respiratorio (CR)

La respiración de la mayor parte de las semillas tiene un cociente respiratorio CR < 1 durante la germinación, lo que indica que para producir energía se están utilizando las reservas de grasas (compuestos poco oxidados). En las hojas, el valor medio de CR es 1,05, lo que sugiere que el sustrato respiratorio predominante son los azúcares. El CR también refleja la actividad de otros procesos metabólicos. Por ejemplo, durante la reducción asimilatoria del nitrato se producen simultáneamente ácidos orgánicos y CO₂, lo que se traduce en un valor de CR > 1. Un caso extremo es de las raíces que forman asociaciones simbióticas para asimilar el nitrógeno atmosférico, cuya respiración tiene valores de CR en torno a 1,5 (Ribas-Carbó *et al.*, 2013).

4.11.4. Cómo calcular la tasa respiratoria

Los métodos habituales de la determinación de la frecuencia o tasa respiratoria implican:

- (i) Sistema cerrado o estático.
- (ii) Sistema de flujo o lavado.
- (iii) Sistema permeable.

En el sistema cerrado, un recipiente hermético de volumen conocido se completa con producto y el recipiente, que contiene aire ambiental como atmósfera inicial, se cierra. Los cambios en la concentración de O₂ y CO₂ durante un cierto período de tiempo se miden y se utilizan para estimar las tasas de respiración (ecuaciones (2) y (3)) (Fonseca *et al.*, 2001):

$$TR_{O_2} = \left[\frac{(G_{O_2})_t - (G_{O_2})_{t+1}}{\Delta t} \right] \cdot \frac{V_a}{M} \quad (2)$$

$$TR_{CO_2} = \left[\frac{(G_{CO_2})_{t+1} - (G_{CO_2})_t}{\Delta t} \right] \cdot \frac{V_a}{M} \quad (3)$$

Donde TR_{O₂} y TR_{CO₂} son las tasas respiratorias de O₂ (mL / kg h) y CO₂ (mL / kg h) respectivamente, G_{O₂} y G_{CO₂} son las concentraciones de los compuestos gaseosos en el espacio de cabeza (mL / mL aire), t el tiempo (h), V_a el volumen de aire en el recipiente (mL) y M, la masa de la muestra (kg) (Ortolá, 2020).

En el sistema de flujo continuo, el producto está encerrado en un recipiente impermeable a través del cual fluye una mezcla de gases a una velocidad constante.

En el sistema permeable, un paquete de dimensiones y permeabilidad de película conocidas se completa con el producto (Fonseca *et al.*, 2001).

Existen limitaciones para todos estos métodos. En el sistema estático, es difícil estimar con precisión el volumen de gas (o volumen libre). Además, el agotamiento de O₂ y la producción de CO₂ que tienen lugar durante la medición pueden afectar la frecuencia respiratoria. Para determinar el período de tiempo entre muestreo, se deben considerar dos aspectos. Por un lado, la diferencia de concentraciones debe ser suficiente para garantizar una modificación notable de la atmósfera; por otro lado, la modificación de concentraciones debe ser mínima para que no sea afectada la frecuencia respiratoria. Talasila (1992), propuso un método para determinar el período de tiempo basado en la precisión del equipo de medición de gas. Para modelar la influencia de las concentraciones de los compuestos gaseosos en la frecuencia respiratoria, se deben considerar las mediciones de los valores iniciales o los valores promedio entre las mediciones inicial y final. Un método alternativo empleado para evitar este problema es utilizar sistemas automatizados para la medición de la frecuencia respiratoria que incluyen instrumentos de medición como cromatógrafos de gases o sondas de O₂ (Cameron *et al.*, 1989).

Todos estos métodos experimentales para medir la respiración requieren cuantioso tiempo y trabajo. Las ventajas y limitaciones de los diferentes métodos se resumen en la Tabla 10 y algunos modelos respiratorios anteriormente estudiados en la Tabla 11. Ninguno de los métodos es claramente preferible a los demás. Al elegir el método de determinación de la

frecuencia respiratoria para un estudio específico, se deben tener en cuenta los beneficios y las limitaciones de cada método (Fonseca *et al.*, 2001).

Tabla 10. Características principales de los tres métodos de medición de la frecuencia respiratoria (Fonseca *et al.*, 2001).

Características	Sistema		
	Cerrado	Flujo	Permeable
No destructivo	✓	✓	✓
Tiempo y trabajo consumidos	✓	✓	✓
Complejidad de la configuración experimental	Simple	Complejo	Complejo
Capacidad para probar diferentes combinaciones de gases	✓	✓	x
La concentración se mantiene aproximadamente constante durante el experimento	X	✓a	✓a
Adecuado para productos de baja respiración	✓	x	✓
Adecuado para productos de alta respiración	X	✓	✓
La precisión es muy sensible a la determinación de	Volumen libre	Tasa de flujo	Dimensiones del paquete de permeabilidad, concentraciones en estado estacionario

Tabla 11. Modelos de frecuencia respiratoria de tomate según la literatura (Fonseca *et al.*, 2001; Castellanos *et al.*, 2015).

Referencia	Sistema cerrado (equipo)	T°C	Modelo
Henig and Gilbert (1975)	Cromatógrafo de gases	23	Lineal
Yang and Chinnan (1988)	Cromatógrafo de gases	21	Polinomio
Cameron <i>et al.</i> (1989)	Sonda de O ₂	25	Exponencial
Gong y Corey (1994)	Cromatógrafo de gases	20	Polinomio
Castellanos <i>et al.</i> (2015)	Packaging Atmosphere Analyzer	13,5	Lineal

4.12. Espectro electromagnético: luz visible

Las ondas de luz visible tienen longitudes de onda entre 400 y 700 nanómetros (4.000 y 7.000 Å). A medida que el arcoíris se llena de matices, nuestros ojos perciben diferentes longitudes de ondas de luz (Figura 12). La luz roja tiene longitudes de onda relativamente largas, aproximadamente 700 nm de largo. La luz azul y la luz morada tienen ondas más cortas, aproximadamente de 400 nm. Las ondas más cortas vibran a mayores frecuencias, y tienen energías más elevadas (Rusell, 2005).

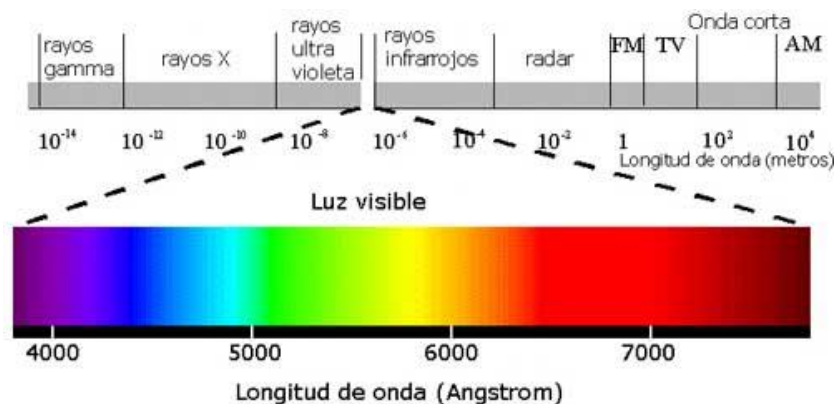


Figura 12. Espectro electromagnético de luz visible (entre 400 y 700 nm) (Núñez, 2017).

4.12.1. Efecto de la luz en la planta de tomate (precosecha)

Para el tomate, la luz interceptada es un factor determinante para el crecimiento y la producción de biomasa que depende principalmente del área foliar de la planta donde existe una relación muy estrecha con el aprovechamiento de luz.

Por ejemplo, se sabe que si existe una reducción de la intensidad lumínica se verá afectada, la formación de los botones florales, la diferenciación, el cuajado, la formación del fruto, tamaño, color y calidad de los frutos y en menor grado el crecimiento (Mendoza, 2020).

La fotosíntesis es un proceso donde los órganos fotosintéticos utilizan la energía solar para la síntesis de compuestos orgánicos que no pueden formarse sin este aporte de energía. Es aquí donde los diferentes pigmentos fotosintéticos absorben esta energía en longitudes de onda determinadas, donde es detectada y absorbida por los cloroplastos, comenzando así las reacciones lumínicas (en los tilacoides), en las cuales dependiendo del estado

de madurez del fruto interviene la clorofila o los carotenoides que absorben la luz azul-verde (450-500 y 500-550 nm, respectivamente) y reflejan la luz amarilla, naranja y roja (550-600, 600-650 y 650-700 nm, respectivamente), colores característicos de la mayoría de los frutos.

No obstante, la exposición prolongada a una intensidad de luz mayor al punto de saturación de la fotosíntesis puede aumentar la temperatura de los frutos produciendo daños a estos, tales como el “asoleamiento” o “golpe de sol” (Deaquiz-Oyola, 2014).

4.12.2. Iluminación durante el almacenamiento

La maduración normal del tomate en postcosecha no requiere luz. No obstante, a 21°C y mediante exposiciones a luz blanca, se logra reducir el tiempo de maduración desde el fruto verde-maduro a rojo, en aproximadamente dos días, y además se acelera el ablandamiento (Genta *et al.*, 1992). Los frutos expuestos a luz blanca contienen aproximadamente el doble de carotenoides, en comparación a los frutos madurados en la oscuridad. En la práctica, la maduración a la luz no se aplica (Genta *et al.*, 1992).

4.13. Proceso de maduración

4.13.1. Desarrollo del fruto en la planta

El tiempo necesario para que un ovario fecundado se desarrolle a un fruto maduro es de 7 a 9 semanas, en función del cultivar, la posición en el racimo y las condiciones ambientales.

Los cultivares comerciales de tomate crecen a partir de un ovario de 5 - 10 mg y alcanzan, en la madurez, una masa de 5 a 500 g en función de la variedad y de las condiciones de desarrollo. El crecimiento del fruto se ajusta a una curva sigmoide simple que puede dividirse en tres periodos.

Archbold *et al.*, (1982), explica que el primer periodo, de crecimiento lento, dura dos o tres semanas y cuando termina, la masa del fruto es inferior al 10% del final. El crecimiento del periodo se produce, fundamentalmente, por división celular y en menor grado por crecimiento de las células. La importación de asimilados por el ovario aumenta considerablemente durante los dos días posteriores a la polinización.

El segundo periodo, de crecimiento rápido, dura tres a cinco semanas y se prolonga hasta el inicio de la maduración. Hacia la mitad de este periodo, unos 20-25 días después de la antesis, la velocidad de crecimiento es máxima (Ho *et al.*, 1982) y, al final del mismo, el fruto ha alcanzado prácticamente su máximo desarrollo. Durante esta etapa el crecimiento del fruto se produce por un aumento del tamaño de las células preformadas; el tamaño de las vacuolas aumenta extraordinariamente y comienza a acumularse almidón, ácidos

orgánicos y otros componentes que, posteriormente, darán lugar a las características típicas del fruto maduro.

Finalmente hay un periodo de crecimiento lento, de unas dos semanas, en el que el aumento en la masa del fruto es pequeño, pero se producen los cambios metabólicos característicos de la maduración. La importación de asimilados por el fruto termina unos 10 días después del inicio del cambio de color, ya avanzado el proceso de maduración, debido a la formación de la capa de abscisión entre el cáliz y el fruto (Nuez, 2001).

4.13.2. Maduración del fruto postcosecha

El tomate es un fruto climatérico, como parte de su proceso natural de maduración, la fruta comenzará a producir gas etileno, antes de alcanzar la etapa "Breaker". En esta etapa de madurez y de desarrollo de color, ya se ha alcanzado en el fruto una concentración interna de gas etileno de 0,1 a 1 ppm. Antes de la etapa "Breaker", (fruta fisiológicamente madura, pero aun verde en color), es el momento en el cual se podría estimular la maduración de la fruta mediante la aplicación de gas etileno externo utilizando generadores catalíticos o sistemas de flujo (Fornaris, 2007).

Generalmente se manejan tres tipos de madurez: fisiológica, comercial y de consumo:

- Madurez fisiológica: Se presenta cuando las semillas completan su desarrollo fisiológico y se encuentran aptas para su reproducción.

- Madurez de cosecha o comercial: etapa fisiológica en el desarrollo del fruto, donde al ser desprendido de la planta puede por sí solo continuar el desarrollo hasta alcanzar la madurez de consumo.
- Madurez de consumo: Momento en el desarrollo fisiológico donde el fruto alcanza las mejores características sensoriales de sabor, color, aroma y textura.

En el tomate la madurez se reconoce en la parte inferior del fruto, que comienza a mostrar una coloración anaranjada mientras que el resto de él permanece verde (Figura 13). El signo más visible de la maduración organoléptica en tomate es el cambio de verde a rojo, que se debe a la descomposición de la clorofila y a la síntesis de carotenoides; el segundo signo característico de esta maduración es el ablandamiento. Este cambio ocurre por la síntesis de la enzima poligalacturonasa, la cual participa en la degradación de la pectina en la pared celular y en el ablandamiento. La producción de esta enzima es iniciada por el etileno, lo que ayuda a explicar la importancia de esta hormona en la maduración natural y artificial de tomates (Jaramillo *et al.*, 2013).

La maduración más rápida resulta a temperaturas más altas entre 12,5 - 25°C; 90 - 95% de HR; 100 ppm de etileno. Debe mantenerse una buena circulación de aire para garantizar la uniformidad de la temperatura dentro de la sala de maduración y evitar la acumulación de dióxido de carbono. El CO₂ (por encima

de 1%) retarda la acción del etileno para estimular la maduración (Suslow y Cantwell, 1997).



Figura 13. Carta de color del tomate (Jaramillo *et al.*, 2013).

4.14. Deterioro de calidad en tomates

El daño mecánico favorece la pérdida de agua y aumenta la presencia de pudriciones. Estos daños mecánicos se pueden producir en operaciones de cosecha y envasado. Los efectos que causan los daños mecánicos por corte, golpe y pérdida de epidermis, son la causa del deterioro y de la maduración rápida y progresiva del tomate, lo cual, puede deberse a la mala manipulación y transporte del producto. El deterioro de los frutos es ocasionado, generalmente por patógenos oportunistas, los cuales no pueden infectar directamente los tejidos a menos que sufran presión y / o daño (Cortez *et al.*, 2016). El siguiente estudio evaluó la pérdida de masa de tomates bajo diferentes condiciones de almacenaje y daño mecánico (Tabla 12 y Figura 14).

Tabla 12. Pérdida de masa de tomate (%), temperatura ambiente: 22°C, temperatura de refrigeración: entre 8 y 10°C (Cortez *et al.*, 2016).

		Día						
Temperatura	Daños	0	1	2	5	7	8	9
Ambiente	Control	0	2,14	3,99	8,08	9,17	9,96	11,17
	Corte	0	1,89	4,73	9,57	10,8	12,38	14,28
	Impacto cortante	0	1,86	3,45	6,6	7,77	8,69	9,74
	Impacto de caída	0	2,04	3,67	7,41	8,2	8,87	10,25
Ambiente	Pérdida de epidermis	0	2,67	7,11	13,57	15,3	17,37	19,92
	T1	0	1,75	3,18	6,99	8,43	9,29	
	T2	0	1,41	2,89	7,07	8,64	9,54	
Refrigerado	T3	0	0,57	1,76	5,28	6,55	7,38	
	T1	0	0,67	1,76	3,82	4,55	5,15	
	T2	0	0,31	1,27	2,88	3,29	3,71	
Refrigerado	T3	0	0,33	0,97	2,64	3,05	3,48	

T1: control; frutos sin embalaje sobre una bandeja de tecnopor

T2: atmósfera modificada interna; área total del pedicelo cubierta con capa de vaselina de 1 mm.

T3: plástico; Todos los frutos cubiertos con una lámina de plástico.

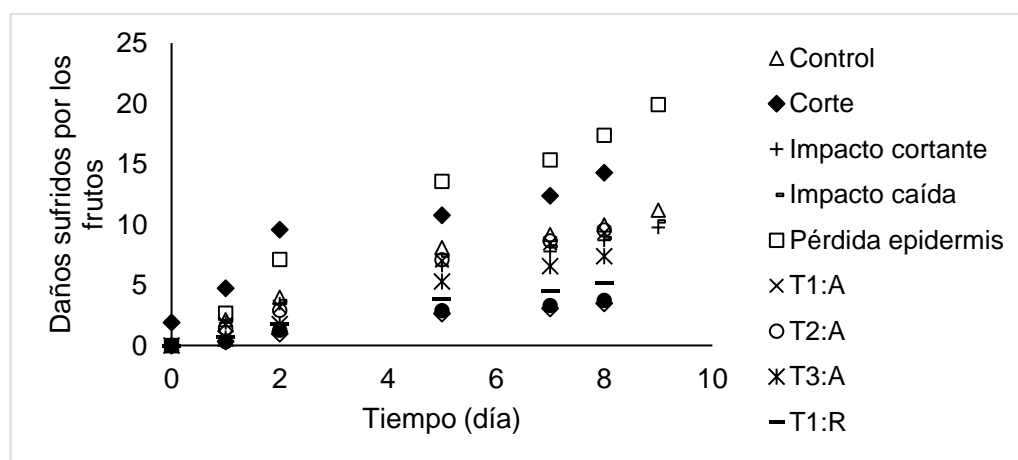


Figura 14. Vida útil del tomate, pérdida de masa (%) según tratamiento (Cortez *et al.*, 2016).

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Tratamiento preliminar

Se utilizaron tomates (*Solanum lycopersicum* L.) frescos (42), variedad “Toscano”, cultivo orgánico, proveniente del Sector Oro Verde, Chillán, seleccionados según calibre (6 - 8 cm), estado de madurez (breaker) y sin apariencia externa defectuosa. Éstos se sumergieron en una disolución de sorbato de potasio (1 g / L) y benzoato de sodio (1 g / L) en agua (60 L) durante 15 min. Luego, fueron enjuagados con agua destilada estéril (aproximadamente 100 mL / tomate) y secados al aire a temperatura ambiente en una campana de extracción antes de su transporte, tratamiento y análisis.

El traslado de tomates se llevó a cabo en cajas plásticas con tapa (0,26 m × 0,17 m × 0,125 m; tres tomates / caja). Cada caja se limpió con abundante agua y se desinfectó con una disolución de benzoato de sodio (1 g / L) y sorbato de potasio (1 g / L) en agua, aplicando finalmente etanol (70% v / v) mediante algodón estéril. En la base de cada caja se colocó un soporte de cartón para evitar daño mecánico al fruto. Luego la caja con tomates se colocó dentro de un recipiente de aislapol provisto de material sustituto de hielo (chiller) y se realizó el traslado Chillán (UdeC) – Concepción (UCSC), viceversa. La temperatura de almacenaje fue de 12°C. La experimentación se realizó en duplicado con tres tomates por cada unidad experimental.

5.2. Determinación de las propiedades físicas

5.2.1. Masa

Se determinó la masa de las muestras de tomates tanto al inicio como durante los ensayos mediante una balanza electrónica de la marca Precisa, modelo XB 6200 D (Precisa Instruments AG, Dietikon, Suiza) con una capacidad de 6 kg y una precisión de $\pm 0,1$ g. En el caso de la materia prima sin tratamiento se evaluaron seis muestras de tomates.

La pérdida de masa PM (%) de tomates se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$PM = \frac{(M_0 - M_t)}{M_0} \cdot 100\% \quad (4)$$

Dónde:

M₀: Masa de fruto al tiempo t = 0 (g);

M_t: Masa de fruto al tiempo t=t (g).

La medición se realizó en triplicado.

5.2.2. Geometría

Se determinó el diámetro polar (d_p), diámetro ecuatorial 1 ($d_{e,1}$) y diámetro ecuatorial 2 ($d_{e,2}$) de seis muestras de tomates tanto al inicio como durante el ensayo mediante un pie de metro electrónico Digital Caliper (150 × 0,05 mm; Stanford profesional, Truper) con una precisión de 0,01 mm. En el caso de la materia prima sin tratamiento se evaluaron seis muestras de tomates.

El volumen estimado de fruto (VEF en m³) se calculó mediante la fórmula del volumen de un elipsoide:

$$VEF = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d_{e,1} \cdot d_{e,2} \cdot d_p \quad (5)$$

La pérdida de volumen PV (%) de tomates se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$PV = \frac{(VEF_0 - VEF_t)}{VEF_0} \cdot 100\% \quad (6)$$

Dónde:

VEF₀: Volumen estimado del fruto al tiempo t = 0 (m³);

VEF_t: Volumen estimado del fruto al tiempo t = t (m³).

La medición se realizó en triplicado.

5.2.3. Determinación de color

Para la determinación de color de los tomates se utilizó el programa DinoCapture 2.0, para lo cual se creó una carpeta en el computador para almacenar las imágenes.

Para comenzar a medir color fue necesario controlar los siguientes parámetros:

En el caso del microscopio Dino-Lite Edge Mod AF4515T-FUW los parámetros a configurar fueron: aumento mínimo de 8,6 mm; luz LED en el nivel 6 (existen cuatro LED encendidos para simular luz blanca natural) con iluminación Axi (es ideal para observar superficies reflectantes con gran aumento); rango

dinámico extendido (EDR, apila imágenes con diferente exposición para minimizar el brillo); una resolución de 1280x1024 pixeles (corresponde a 1,3 millones de pixeles). En el caso de la cámara, los parámetros a controlar fueron: el balance de brillo predeterminado; la auto exposición; brillo 128; contraste 16; matiz 0; balance de blancos; rojo 0; verde 0; azul 0; saturación 16; nitidez 1; gama 64.

Se dispuso la muestra dentro de una caja oscura (la cual evitó la incidencia de la luz ambiente), la cual fue solo iluminada por la luz LED del microscopio que está acondicionada para la captura de imágenes, lo que contó con un soporte para mantener fija la distancia entre la muestra y el microscopio (la distancia varía dependiendo de la altura de la muestra, o sea se regula según sea necesario para lograr el enfoque óptimo). Para lograr obtener una imagen de buena calidad la muestra debió estar en posición de reposo cuidando que el ápice quede en el centro de la imagen. Se tomó una fotografía por muestra (las que vienen en triplicado), estas imágenes quedaron almacenadas para ser descargadas posteriormente. Una vez realizada la determinación instrumental, se determinó color a través de las imágenes digitales, utilizando el Munsell Conversion software, versión 6.5.9. Posteriormente, los datos de color en Munsell fueron transformados a valores de a^* , b^* y L^* en el espacio tridimensional de colores, de acuerdo a la *Commission Internationale de l'Eclairage* (CIE).

Los valores de L^* , a^* y b^* fueron utilizados para calcular los siguientes parámetros:

Tono (h°)

$$h^\circ = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \quad (7)$$

Saturación (C^*):

$$C^* = ((a^*)^2 + (b^*)^2)^{1/2} \quad (8)$$

Diferencia de color (ΔE):

$$\Delta E = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (9)$$

5.3. Análisis de las propiedades químicas

5.3.1. Pretratamiento

Las evaluaciones de análisis químicos se realizaron con muestra molida. Cada tomate (125-300 g) se molió y se homogeneizó en una juguera (Sical S.A., Philips, modelo HR1611, 650 W), a velocidad máxima, durante 2 min. Se registró la temperatura al inicio y al final del proceso de trituración. La muestra molida fue depositada inmediatamente en un frasco con tapa rosca, envuelto con papel de aluminio y colocada en un baño con hielo. Este procedimiento se realizó para los tres tomates de cada unidad experimental.

5.3.2. Humedad

La AOAC 31.005 ha adoptado el método del horno como el método estándar para la calibración de equipos destinados a medir humedad. Este método se basa en determinar la pérdida de masa que se produce cuando el material es

sometido a secado bajo condiciones de tiempo y temperatura controladas para cada tipo de material de acuerdo a la norma chilena. Para determinar la humedad se llevaron a cabo los siguientes pasos:

1. Se determinó la masa exacta de ± 30 g de tomate molido con al menos tres cifras significativas, para lo cual se utilizó una balanza electrónica de la marca Bel Engineering, modelo IT1602888;
2. La muestra se colocó en una cápsula limpia y se secó en un horno convectivo Memmert, modelo UF55 (Mettler GmbH, Germany);
3. La muestra se mantuvo en el horno a 70°C hasta masa constante;
4. La muestra se sacó del horno y se enfrió en un desecador;
5. La muestra se masó, utilizando una balanza (Bel Engineering, IT1602888);
6. La pérdida de masa se reportó como contenido de humedad. El porcentaje másico de humedad, base húmeda, corresponde a:

$$\text{Humedad} = \left(\frac{\text{masa de agua}}{(\text{masa de agua} + \text{masa de materia seca})} \right) \cdot 100\% \quad (10)$$

La medición se realizó en triplicado.

5.3.3. Sólidos solubles

La concentración de sólidos solubles se determinó en triplicado por el método 932.12 de la AOAC (AOAC, 1990), utilizando un refractómetro digital HI 96801 (Hanna Instruments, USA) equipado con sistema ATC. Se introdujeron cinco gotas de la muestra al prisma del refractómetro, expresando los resultados de la lectura en $^{\circ}\text{Brix}$. La medición se realizó en triplicado.

5.3.4. Acidez titulable

Se agregaron 80 mL de agua destilada a 20 g de pulpa de tomate molida, utilizando una balanza electrónica Shimadzu, modelo BL-320H, bajo agitación a 300 r.p.m., utilizando un agitador magnético Barnstead Thermolyne Super-Nova y luego se tituló con NaOH (0,1 N) (titrisol, Merck) hasta pH $8,2 \pm 0,1$ usando un pH-metro Hanna HI 2221 (Hanna Instruments, USA) según el método 942.15 de la AOAC (AOAC, 1990). La acidez titulable (g / 100 mL) se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$Acidez = \frac{V_{NaOH} \cdot N_{NaOH} \cdot ME_{\text{ácido predominante}}}{M_{muestra}} \cdot 100 \quad (11)$$

Dónde:

V_{NaOH} : Volumen de NaOH gastado (mL);

N_{NaOH} : Normalidad del NaOH (N);

$ME_{\text{ácido predominante}}$: Masa equivalente expresada en g de ácido orgánico más abundante en el fruto;

$M_{muestra}$: Masa de la muestra utilizada (g).

La medición se realizó en triplicado.

5.3.5. Grado de madurez

Para evaluar el grado de madurez de los frutos se calculó el cociente de las medidas anteriores, relacionando sólidos solubles y acidez titulable.

$$Grado\ de\ madurez = \frac{SS}{Acidez} \quad (12)$$

Dónde:

SS: Sólidos solubles (°Brix);

Acidez: Acidez titulable (%).

5.3.6. Licopeno

Se utilizó el método de extracción de licopeno mediante un volumen pequeño de solvente orgánico en ausencia de luz artificial (Fish *et al.*, 2002; Davis *et al.*, 2003). Aproximadamente 0,6 g de muestra molida y homogeneizada de tomate, utilizando una balanza electrónica Shimadzu, modelo BL-320H, se introdujo en un frasco de vidrio de color ámbar de 100 mL con tapa rosca. A cada frasco se agregó 5 mL de 0,5 g / L de hidroxitolueno butílico (BHT) en acetona (refrigerada previamente a 4°C), se añadió 5 mL de etanol acuoso al 95% (v / v) (refrigerado previamente a 4°C) y 10 mL de hexano (refrigerado previamente a 4°C). Para la extracción de licopeno, el frasco se agitó con un Velp Scientifica 2x3 advanced vortex mixer a 3.000 r.p.m. durante 10 min. Luego, se agregó 3 mL de agua destilada (enfriada previamente a 4°C) al frasco y se agitó la muestra 5 min adicionales mediante un agitador mini-vortexer (Merck) a máxima velocidad. Se dejó el frasco en reposo a 4°C durante 30 min para separar las fases. Luego, se tomó una alícuota (3,5 mL) del sobrenadante, es decir de la fase de hexano, que se introdujo en una cubeta de vidrio (con paso de luz de 1 cm). Se midió la absorbancia en un espectrofotómetro UV / VIS (Specord Plus 200, Analytik Jena AG, Jena,

Alemania) a una longitud de onda de 503 nm, utilizando hexano como blanco. La siguiente ecuación fue utilizada para calcular la cantidad de licopeno en la muestra de tomate (en mg de licopeno / kg de muestra) (Fish *et al.*, 2002):

$$\text{Licopeno} \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right) = \frac{A_{503} \cdot 0,01 \cdot 536,9 \cdot 1000}{17,2 \cdot 10^4 \cdot M_{\text{muestra}}} \quad (13)$$

Dónde:

A_{503} : Absorbancia a 503 nm;

M_{muestra} : Masa de la muestra (kg).

La medición se realizó en triplicado.

5.4. Determinación de compuestos gaseosos

Durante un máximo de 17 días, se extrajeron, con una jeringa Hamilton (Sample Lock, Sigma Aldrich 26286), muestras de 2,5 mL del gas que se encuentra ubicado en el espacio de cabeza de los desecadores, cada 24 horas, con el fin de medir la concentración de etileno. Para determinar la concentración de etileno, las muestras fueron introducidas en un cromatógrafo de gases (Clarus 500 GC, Perkin Elmer Inc., Shelton, CT, USA), específicamente en su canal A, el cual, cuenta con un detector de ionización de llama a 250 °C y cuyas condiciones de operación son las siguientes: inyector con Split a 200 °C; helio (He) como gas de arrastre con un flujo de 7 mL / min; horno isotérmico a 170°C y columna VOCOL capilar. Para determinar las cantidades de dióxido de carbono (CO₂) y oxígeno (O₂), se extrajo 1 mL del gas de cada muestra y se depositó en el canal B del mismo cromatógrafo,

el cual cuenta con un detector de conductividad térmica a 200°C y opera bajo las siguientes condiciones: inyector con Split a 200°C; flujo de He a 30 mL / min; horno de 40 a 90°C con aumento de temperatura de 4°C / min, que luego se llevó a 170°C a la misma tasa y se mantuvo por 6 min; y columna empacada Matrix 60 / 80 Carboxen-1000 support.

Con los valores que se obtuvieron a partir de la cromatografía de gases se calcularon las concentraciones remanentes de O₂, CO₂ y C₂H₄ en la atmósfera interna de cada desecador. El oxígeno molecular neto consumido por la respiración del fruto, [O₂]_c, en el interior de cada desecador (mg / kg h), se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$[O_2]_c = \frac{([O_2]_i - [O_2]_f) * (VD - VEF_1 - VEF_2 - VEF_3)}{(m_1 + m_2 + m_3) * (t_f - t_i)} \quad (14)$$

Dónde [O₂]_i y [O₂]_f son las concentraciones remanentes de oxígeno al interior del desecador (mg / L), al inicio y al final de la aplicación de los tratamientos, respectivamente; VD es el volumen interno del desecador (L); VEF₁, VEF₂ y VEF₃ son los volúmenes de cada fruto (L), calculados mediante la Ecuación 5; m₁, m₂ y m₃ son las masas de cada fruto (kg); y t_i y t_f son los instantes de inicio y fin de aplicación de los tratamientos (h).

El dióxido de carbono neto producido por la respiración del fruto, [CO₂]_p, en el interior de cada desecador (mg / kg h), fue determinado mediante la Ecuación 15:

$$[CO_2]_p = \frac{([CO_2]_f - [CO_2]_i) * (VD - VEF_1 - VEF_2 - VEF_3)}{(m_1 + m_2 + m_3) * (t_f - t_i)} \quad (15)$$

Dónde $[CO_2]_i$ y $[CO_2]_f$ son las concentraciones remanentes de dióxido de carbono al interior del desecador (mg / L), al inicio y al final de la aplicación de los tratamientos, respectivamente.

El etileno neto producido por la maduración del fruto, $[C_2H_4]_p$, en el interior de cada desecador ($\mu\text{g} / \text{kg h}$), fue determinado mediante la Ecuación 16:

$$[C_2H_4]_p = \frac{([C_2H_4]_f - [C_2H_4]_i) * (VD - VEF_1 - VEF_2 - VEF_3)}{(m_1 + m_2 + m_3) * (t_f - t_i)} \quad (16)$$

Dónde $[C_2H_4]_i$ y $[C_2H_4]_f$ son las concentraciones remanentes de etileno al interior de los desecadores ($\mu\text{g} / \text{L}$), al inicio y al final de la aplicación de los tratamientos, respectivamente.

El cociente respiratorio (CR) fue determinado mediante la Ecuación 17:

$$CR = \frac{\frac{[CO_2]_p}{(M)CO_2}}{\frac{[O_2]_c}{(M)O_2}} \quad (17)$$

Dónde $(M)_{CO_2}$ es la masa molar del CO_2 , cuyo valor es de 44 mg / mmol; y

$(M)_{O_2}$ es la masa molar del oxígeno y su valor es 32 mg / mmol.

5.5. Análisis estadísticos

El diseño experimental para este estudio fue aleatorio, en el cual los dos tratamientos, con luz y sin luz, corresponden a las variables de clasificación que se evaluaron para cada variable dependiente; propiedades físicas y químicas por separado, en los siete días para el tratamiento con luz y sin luz: 4 de abril (día 0), 7 de abril (día 1), 9 de abril (día 2), 11 de abril (día 3), 13 de

abril (día 4), 15 de abril (día 5) y 17 de abril (día 6) – 25 de abril (día 0), 29 de abril (día 1), 2 de mayo (día 2), 5 de mayo (día 3), 8 de mayo (día 4), 11 de mayo (día 5) y 13 de mayo (día 6) del año 2021 respectivamente.

El análisis estadístico, se realizó mediante el programa Infostat. Las pruebas aplicadas fueron el test de Wilcoxon, el cual compara diferencias y similitudes de la materia prima (0 día) debido a que, para cada tratamiento esta fue obtenida en diferentes momentos. El test de Friedman que determina si existen o no diferencias entre tratamientos, para los días 6 y 12. El test de correlación de Spearman, el cual, determina si el tiempo afecta la evolución de los parámetros.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Fundamentación bioquímica para explicar las diferencias entre tratamientos con y sin luz para algunos parámetros de calidad

6.1.1. Contenido de licopeno

La concentración de licopeno en tomates aumentó en el tiempo, donde este aumento fue más notorio en presencia que en ausencia de la luz (Tabla 13).

Tabla 13. Concentración de licopeno en tomates Toscano en almacenamiento postcosecha en función del tiempo con tratamientos con luz y sin luz.

Tiempo (d)	CON LUZ		SIN LUZ		p
	M (mg / g)	DS (mg / g)	M (mg / g)	DS (mg / g)	
0	0,0049	0,0058	0,0033	0,0028	0,618
6	0,0126	0,0059	0,0090	0,0065	0,013
12	0,0212	0,0072	0,0080	0,0041	0,013

M: Media; DS: Desviación estándar; p: valor de probabilidad.

Alba *et al.*, (2000), estudiaron la acumulación de carotenoides a través de técnicas de biología molecular, en particular, investigaron la expresión genética de los cinco loci PHY (es decir, PHYA, PHYB1, PHYB2, PHYE y PHYF) en frutos de tomate. El análisis Northern demostró que el ARNm del fitocromo A en el fruto se acumuló 11,4 veces durante la maduración. Al mismo tiempo durante la transición de la etapa verde inmadura a la etapa de cambio, la cantidad de luz roja que pasó a través de estos tejidos aumentó cuatro veces. En comparación con el tratamiento de control en la oscuridad (37,2 µg licopeno / g materia fresca o 0,0372 mg / licopeno g materia fresca), los autores indicaron que la acumulación de licopeno en frutos rojos maduros fue inducida 2,3 veces por la luz roja cercana (86,6 µg / licopeno g materia fresca o 0,0866 mg licopeno / g materia fresca) y fue revertida parcialmente por luz roja lejana (51,5 µg de licopeno / g materia fresca o 0,0515 mg licopeno / g materia fresca) (Alba *et al.*, 2000). La acumulación de carotenoides inducida por la luz roja cercana en cuatro distintos cultivares fue revertida por la luz roja lejana, lo cual

es consistente con la hipótesis de que la acumulación de carotenoides es inducida por la luz roja cercana en los frutos del tomate y ésta es mediada en parte por el fitocromo (Alba *et al.*, 2000). Sin embargo, estos mismos autores indican que la acumulación de licopeno en el pericarpio del tomate consta de componentes independientes y dependientes de la luz, por lo cual, la luz no sería esencial para la inducción o acumulación de licopeno en el pericarpio del tomate después de la etapa verde inmadura. Dado que, si la luz fuese necesaria para la iniciación y la acumulación de este carotenoide en estos tejidos, el licopeno no se acumularía en los frutos que recibieron el tratamiento oscuro (Alba *et al.*, 2000).

Los tratamientos de luz roja cercana y luz roja cercana / luz roja lejana durante la maduración de tomates según el trabajo realizado por el mismo grupo de autores no influyeron en la producción de etileno, indicando que la biosíntesis de esta hormona de maduración en estos tejidos no está regulada por los fitocromos localizados en el fruto (Alba *et al.*, 2000). El trabajo presentado por Jen y Watada (1977), demuestra que el inicio, la velocidad o la duración de la biosíntesis de etileno durante la maduración de frutos cv UC-82B y cv MoneyMaker está influenciada por los tratamientos de luz roja o roja lejana. Contrario a lo anterior, los resultados de Alba *et al.*, (2000) indican que los fitocromos localizados en los frutos no regulan la biosíntesis de etileno en tomates maduros. Una posible explicación para esta discrepancia entre los resultados proviene de las diferencias en las condiciones experimentales de irradiación. Jen y Watada (1977), irradiaron la fruta con luz roja durante 14 h /

d, mientras que los experimentos presentados por Alba *et al.*, (2000), utilizaron luz roja durante 5 min / d.

Sin embargo, otros estudios han demostrado que el etileno si juega un papel importante en la acumulación de carotenoides relacionada con la maduración, ya que, regula la fitoeno sintasa (enzima que cataliza el primer paso de la ruta de síntesis de carotenoides) en el fruto de tomate (Bird *et al.*, 1991). Por tanto, pareciera que tanto el etileno como los fitocromos localizados en frutos modulan la carotenogénesis, lo cual explica el por qué, en esta investigación los frutos expuestos a la oscuridad durante 24 h produjeron algo de licopeno (Tabla 13).

Tanto los resultados de Alba *et al.*, (2000), como los de Jen y Watada (1977), dan a entender que el comportamiento de la producción de etileno puede depender del nivel de exposición de los frutos a la irradiancia de luz roja cercana / roja lejana. Debido a que la exposición a la luz roja cercana / roja lejana de la experimentación de Alba *et al.*, (2000) no fue suficiente, se puede asumir que los parámetros presentados en el trabajo, como el ablandamiento del pericarpio, las concentraciones de citrato, malato, fructosa, glucosa o sacarosa en la fruta tampoco se vieron afectadas.

6.1.2. Contenido de sólidos solubles

El contenido de sólidos solubles en tomates tratados con luz presentó un aumento, mientras que en ausencia de la luz este valor disminuyó en el tiempo (Tabla 14).

Tabla 14. Sólidos solubles del tomate Toscano en almacenamiento postcosecha en función del tiempo con tratamientos con luz y sin luz.

Tiempo (d)	CON LUZ		SIN LUZ		p
	M (°Brix)	DS (°Brix)	M (°Brix)	DS (°Brix)	
0	4,10	0,33	4,03	0,47	0,816
6	4,43	0,27	3,98	0,47	0,027
12	4,47	0,33	3,68	0,37	0,027

M: Media; DS: Desviación estándar; p: valor de probabilidad.

Según Bradford (2008), uno de los factores que aceleran la producción de etileno es la presencia de luz, Grierson y Kader (1986), indican que uno de los efectos en los frutos es que el etileno provoca la degradación de almidón y producción de glucosa y fructosa. En la Tabla 14 se visualiza que en presencia de luz ocurre un aumento de sólidos solubles en el tiempo, mientras que, sin luz, la cantidad de etileno producido por el fruto en el mismo periodo no es suficiente para inducir un aumento en el contenido de sólidos solubles.

6.1.3. Grado de madurez

El grado de madurez es el cociente entre el contenido de sólidos solubles y la acidez del fruto del tomate y determina en qué estado se encuentra la madurez del tomate, basándose y relacionando ambos parámetros. Los resultados evidencian que, el grado de madurez del tratamiento con luz, aumentó con mayor rapidez que en el tratamiento sin luz (Tabla 15).

Tabla 15. Grado de madurez del tomate Toscano en almacenamiento postcosecha en función del tiempo con tratamientos con luz y sin luz.

Tiempo (d)	CON LUZ		SIN LUZ		p
	M (g s.s. / g ácido cítrico)	DS (g s.s. / g ácido cítrico)	M (g s.s. / g ácido cítrico)	DS (g s.s. / g ácido cítrico)	
0	8,78	1,24	7,49	1,16	0,173
6	10,03	0,72	8,37	0,86	0,0004
12	10,74	1,86	9,24	1,41	0,0004

M: Media; DS: Desviación estándar; p: valor de probabilidad.

A partir de ambos parámetros (sólidos solubles y acidez), solo el primero, presentó diferencias estadísticamente significativas ($p = 0,027$) (ver Tabla 14) en el tiempo entre el tratamiento con y sin luz, mientras que el parámetro acidez no lo hizo ($p > 0,9999$). A pesar de las diferencias de estos valores, la probabilidad resultante p para grado de madurez fue inferior al valor de los sólidos solubles ($p = 0,0004$) (ver Tabla 15). Un valor más bajo de p implica una mayor diferencia entre los tratamientos con y sin luz.

Por otro lado, los valores de grado de madurez para el tratamiento con luz son mayores, debido a que los sólidos solubles para este tratamiento también superan al tratamiento sin luz. Lo anterior, debido a que el desarrollo de azúcares como glucosa y fructosa pueden ocurrir mediante el proceso de fotosíntesis, en los cloroplastos de los tomates aún inmaduros, como el desarrollo de ácidos orgánicos en el tomate, no fue estadísticamente significativo, el aumento de grado de madurez en el tratamiento con luz depende directamente de los sólidos solubles.

6.2. Compuestos gaseosos

6.2.1. Disponibilidad de oxígeno y la limitación de la tasa respiratoria

El contenido de oxígeno en el aire es del 21%, mientras que la concentración de oxígeno en la fase acuosa (como el citoplasma) a 25°C es de 253 μM . Existen ciertas situaciones, donde el oxígeno podría ser un factor limitante para la tasa respiratoria; por ejemplo, en los tejidos compactos, como frutos o tubérculos con una baja relación superficie / volumen, la difusión del oxígeno hacia las células interiores en el tejido es muy lenta respecto a la demanda de oxígeno por parte de las oxidasas respiratorias (Ribas-Carbó *et al.*, 2013).

Las concentraciones de oxígeno remanente obtenidas en este estudio (Figura 15), disminuye en el tiempo. En el tratamiento con luz el consumo de este compuesto gaseoso es mayor, lo cual podría deberse, al proceso de

fotorrespiración, siendo un proceso respiratorio, donde la luz se encuentra involucrada.



Figura 15. Oxígeno remanente en el espacio de cabeza en relación con el tiempo con tratamientos con luz y sin luz de almacenamiento de tomates Toscano.

Originalmente la respiración en presencia de luz era igual en magnitud y seguía el mismo recorrido que en oscuridad. Al realizar medidas cuidadosas del intercambio gaseoso inmediatamente después de encender la luz o de apagarla, se evidenció que el CO_2 desprendido era mayor en presencia de la luz que en la oscuridad (Figura 16). Este CO_2 adicional desprendido no se debía a un incremento del proceso normal de respiración, sino a la adición de una ruta completamente distinto que ocurre en presencia de la luz, denominado fotorrespiración (Díaz de la Guardia, 2010).

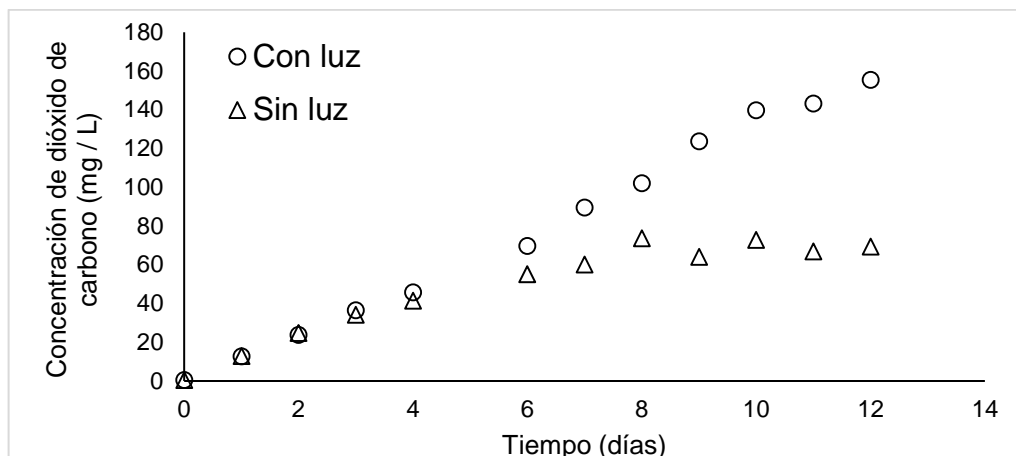


Figura 16. Dióxido de carbono remanente en el espacio de cabeza en relación con el tiempo en tratamientos con luz y sin luz de almacenamiento de tomates Toscano.

6.2.2. Fotorrespiración

La fotorrespiración ocurre porque, en presencia de oxígeno, la enzima RuBP carboxilasa del ciclo de Calvin puede funcionar también como RuBP oxigenasa, además de su función normal de incorporar CO_2 a la RuBP. Denominada ribulosa bifosfato carboxilasa oxigenada, abreviada como Rubisco. Cuando funciona como oxigenasa, adiciona oxígeno a la RuBP, convirtiéndola en una molécula de ácido fosfoglicólico o fosfoglicolato (que contiene dos carbonos) y una molécula de fosfoglicerato (PGA), en lugar de producir dos moléculas de PGA conteniendo tres carbonos cada una (Díaz de la Guardia, 2010).

6.2.3. Fotosíntesis en el fruto

Los tomates verdes en la planta, contienen clorofila y son capaces de fijar CO₂, pero la actividad fotosintética neta es muy reducida. La cantidad de fotoasimilados fijada por el fruto es sólo el 10 - 15% de la necesaria para su crecimiento (Nuez, 2001).

El proceso fotosintético en frutos inmaduros en la postcosecha ocurre de igual manera que en las hojas, no obstante, cuando comienza el proceso de maduración cambia debido a que la clorofila se degrada e intervienen otros pigmentos como los carotenoides, α -carotenos y β -carotenos (Deaquiz-Oyola, 2014).

La fotosíntesis y la fotorrespiración pueden ocurrir de manera simultánea, en los cloroplastos del tomate (estromas). En la planta, el dióxido de carbono producido durante la fotorrespiración es contrarrestado y superado por la absorción de dióxido de carbono de la fotosíntesis (Diaz, 2004). Por otro lado, el CO₂ producido por el fruto de tomate en postcosecha durante la fotorrespiración no logra ser contrarrestado completamente durante la fotosíntesis, debido a que la maduración y la consecuente transformación de cloroplastos en cromoplastos producen en el tomate un descenso considerable de la tasa fotosintética.

6.2.4. Respiración (Ciclo de Krebs)

El proceso respiratorio del tomate sucede en las mitocondrias, principalmente durante los periodos sin luz durante la experimentación. En los periodos con luz, los procesos de fotosíntesis, fotorrespiración y respiración celular, pueden ocurrir simultáneamente en el tomate, mientras que, en los periodos sin luz, solo ocurre el proceso de respiración, ya que es independiente de la presencia de luz (Rivas, Medrano *et al.* y Ribas-Carbó *et al.*, 2013).

6.2.5. Inhibición de la tasa respiratoria por dióxido de carbono

Cuando las plantas u órganos vegetales son expuestos a atmósferas ricas en dióxido de carbono, la tasa respiratoria puede llegar a reducirse considerablemente. La respiración puede inhibirse cerca de un 50% a los pocos minutos de aumentar la concentración de dióxido de carbono desde los niveles atmosféricos normales (del 0,037%) hasta niveles de entre 1 y 5% en el aire.

Cuando la concentración de dióxido de carbono disminuye hasta los valores iniciales, la tasa respiratoria también recupera su valor original. Aun cuando el mecanismo inhibitorio del dióxido de carbono no se conoce bien, el fenómeno se aprovecha para la conservación y el almacenamiento de los frutos climatéricos en cámaras antes de su distribución. Al inhibirse la respiración del fruto, cuando el porcentaje de dióxido de carbono es elevado, no se producen ni etileno ni el aumento climatérico de la respiración, de manera que el proceso

de maduración del fruto se retrasa considerablemente (Ribas-Carbó *et al.*, 2013).

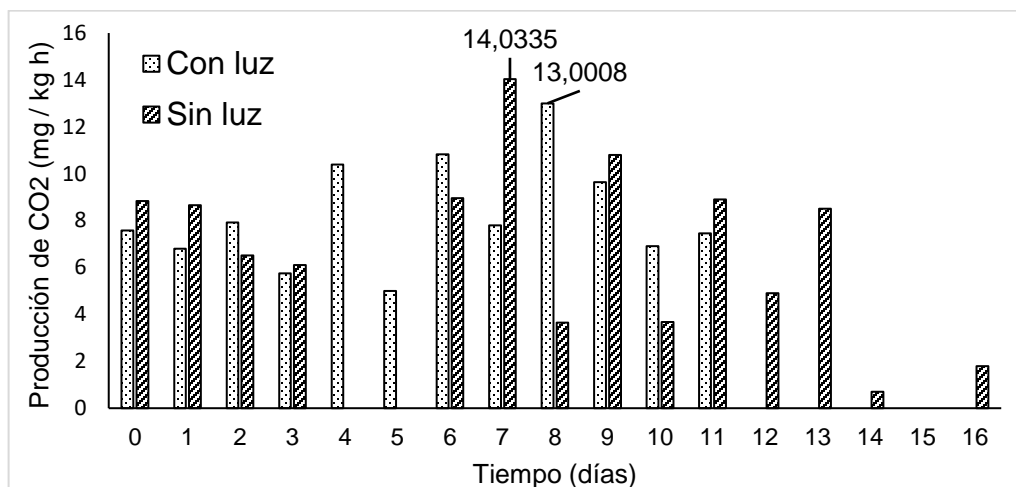


Figura 17. Tasa de producción de dióxido de carbono (CO₂) (tasa respiratoria) del fruto de tomate Toscano en el tiempo con tratamientos con y sin luz.

Tabla 16. Tasa de producción de dióxido de carbono en postcosecha de tomate Toscano, para cada tratamiento, desde el día cero hasta el último día correspondiente a cada tratamiento (12 y 17 días respectivamente), considerando una concentración de CO₂ inicial igual en cada caso.

Tasa de producción de dióxido de carbono (mg CO ₂ / kg h)	
Con luz	Sin luz
7,9700	3,1600

Al comparar los datos de tasa respiratoria de la Tabla 6 (revisión bibliográfica) con los datos obtenidos en la investigación mostrados en la Figura 17, se puede ver que, la tasa respiratoria en un almacenamiento a 12°C se encuentra dentro del rango de valores de producción de CO₂ en almacenamiento a 10°C.

La baja tasa de respiración obtenida en este caso, podría deberse a que los tomates de variedad Toscano utilizados, corresponden a tomates “larga vida”, los cuales tienen la característica de madurar más lento (Krarup y Konar, 1997) y que la temperatura de almacenamiento es óptima para retrasar la maduración.

Si bien, no se logran notar diferencias significativas entre ambos tratamientos en cuanto a tasa respiratoria por día, la Tabla 16 demuestra que la tasa respiratoria en el tratamiento con luz es superior a la del tratamiento sin luz. La concentración inicial en cada caso fue de 0,529 mg CO₂ / kg de tomate, el primer tratamiento, en el día 12, la concentración de CO₂ aumentó a 155 mg de CO₂ exógeno / kg de tomate, mientras que, para el tratamiento sin luz, en 17 días, la concentración de CO₂ solo llegó a 75 mg exógeno de CO₂ / kg de tomate.

6.3. Cociente respiratorio

El valor del cociente respiratorio (CR) es una medida dependiente del contenido de carbono, hidrógeno y oxígeno que se utiliza como sustrato respiratorio (Figura 17). El cociente respiratorio (CR) se define como la relación entre la tasa de CO₂ producido y la de O₂ consumido, siendo útil para indicar la presencia o no de la respiración anaerobia y el tipo de sustrato utilizado por los tejidos. Por lo general, cuando los sustratos oxidados son carbohidratos, el valor de CR es cercano al valor unitario. Si, por el contrario, el compuesto

oxidado es un ácido graso el CR será menor que 1, y, si los sustratos respiratorios son ácidos orgánicos, el valor de CR tendrá un valor mayor que 1 porque el grado de oxidación de estos compuestos es mayor que los azúcares. Los valores de CR en condiciones aerobias abarcan normalmente un rango entre 0,7 y 1,5. Por el contrario, el cociente respiratorio es muy superior que 1 cuando la respiración es anaerobia (Ortolá, 2020).

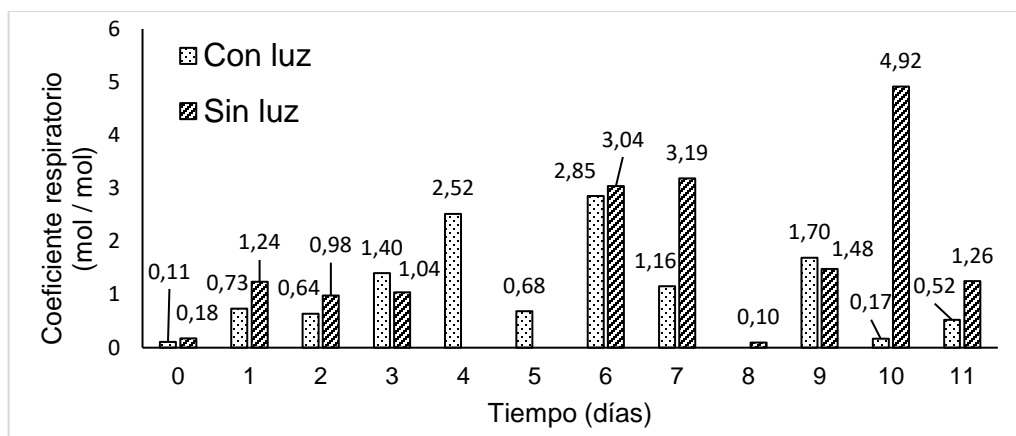


Figura 18. Coeficiente respiratorio del fruto de tomate, con tratamientos con y sin luz.

Tabla 17. Promedio y desviación estándar del cociente respiratorio del fruto de tomate.

Tratamiento	Media	Desviación estándar
Con luz	1,14	0,91
Sin luz	1,74	1,51

De acuerdo a los resultados de CR que muestra la Tabla 17 y la Figura 18 los tipos de sustratos usados por el tomate utilizado en esta experimentación durante el proceso de respiración en el almacenamiento, son los carbohidratos

en el caso del tratamiento con luz, mientras que, en el tratamiento sin luz, al presentar un resultado muy superior a 1 se puede decir que, la respiración en este caso puede ser anaerobia. Es importante mencionar que el valor de desviación estándar del tratamiento sin luz, es elevado, lo que indica una variabilidad de datos mayor y una medición menos determinante.

6.4. Producción de etileno

Existe información contradictoria sobre si el aumento en la respiración precede o sigue a la producción autocatalítica de etileno. Estas discrepancias pueden deberse a la variación interespecífica o a diferencias en la sensibilidad de los métodos o del equipo empleado en las mediciones, pero los estudios de Sawamura *et al.*, (1978) indican, sin lugar a dudas, que el aumento en la producción de etileno endógeno precede el aumento en la respiración.

Bradford (2008), ha reportado que factores como el estrés por la luz, dióxido de carbono, oxígeno y agua, influyen la conversión de ACC a etileno (Corpas y Tapasco, 2014).

En este estudio, la concentración de etileno en presencia de luz supera la concentración de etileno en ausencia de la luz entre 3 y 12 días de almacenaje de tomates (Figura 19).

La producción de etileno se mantiene baja (menos de 0,05 nL / g h o $5,9 \cdot 10^{-5}$ mg / kg h) durante el desarrollo del fruto (en la planta) (Nuez, 2001).

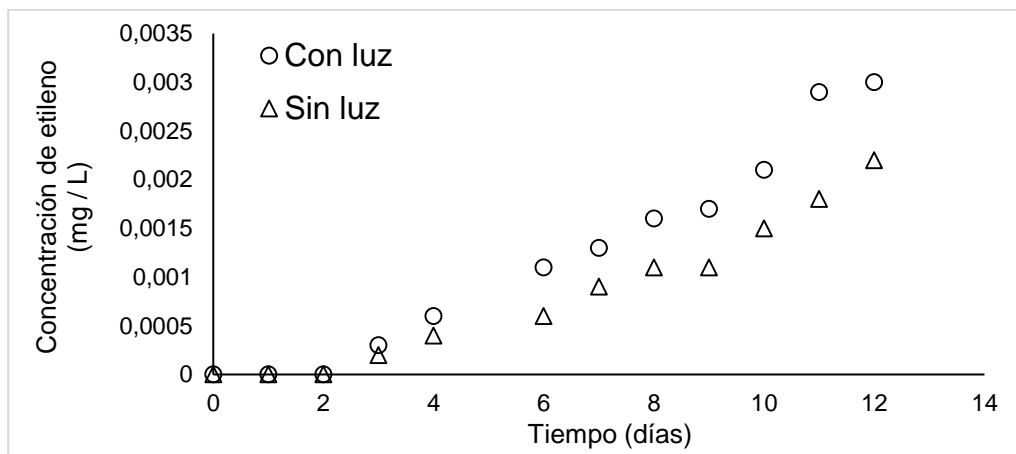


Figura 19. Etileno remanente en el espacio de cabeza en relación con el tiempo en tratamientos con luz y sin luz de almacenamiento de tomates Toscano.

Coincidiendo aproximadamente con el inicio de la respiración climatérica, se produce un brusco incremento en la síntesis de etileno (producción autocatalítica), que alcanza un valor máximo de $2 - 10 \text{ nL / g h}$ (o $2,36 \cdot 10^{-3} - 1,18 \cdot 10^{-2} \text{ mg / kg h}$) (Nuez, 2001), para descender a continuación. El etileno desempeña un rol relevante en la iniciación y continuación de la maduración de todos los frutos climatéricos, induciendo un aumento en la respiración climatérica y el desencadenamiento de casi todos los cambios subsiguientes que desembocan en la madurez completa (Nuez, 2001).

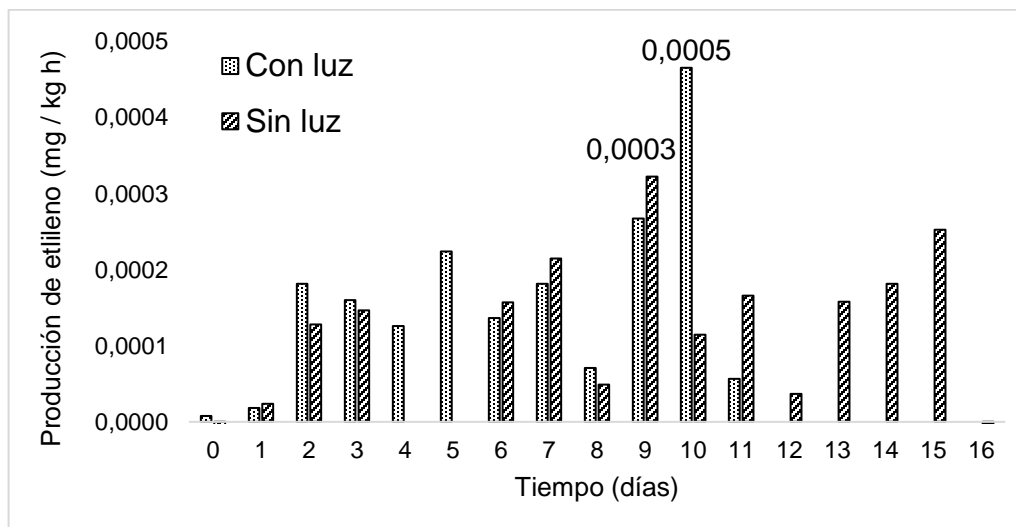


Figura 20. Tasa de producción de etileno del fruto de tomate Toscano postcosecha, con tratamientos con y sin luz.

La Figura 20 muestra la tasa de producción de etileno a través del tiempo a la vez que los puntos más altos ocurridos el día 9 para el tratamiento sin luz y el día 10 para el tratamiento con luz. Al comparar estos resultados (Figura 19) con la información entregada por Nuez (2001) y Suslow y Cantwell (1997), es posible deducir que la tasa de producción de etileno obtenida en esta experimentación es notoriamente inferior, probablemente se deba, a que la materia prima utilizada, corresponde a una variedad de “larga vida”, los cuales, suelen madurar con mayor lentitud, ya que por genética están predispuestos a producir muy poco etileno.

De acuerdo a lo indicado, el aumento de producción de etileno endógeno debe ocurrir antes de un incremento en la tasa de respiración. En la Figura 20 se visualiza que los valores máximos de producción de etileno ocurren el día 9 para el tratamiento sin luz y el día 10 para el tratamiento con luz, mientras que

las tasas de respiración máximas ocurren el día 7 para el tratamiento sin luz y el día 8 para el tratamiento con luz (Figura 14), lo cual, coincide, dado que, en los resultados de este estudio (Figura 20) solo se muestra la tasa de producción de etileno exógeno, resultando ser, en este caso, la respiración quien efectivamente precede al etileno exógeno.

6.5. Modelación de algunos parámetros de calidad físicos, químicos y compuestos gaseosos

En esta sección se encuentran solo aquellos parámetros que resultaron afectados en el tiempo según el test de correlación de Spearman. En el caso de los parámetros de calidad físicos y químicos que presentaron diferencias estadísticamente significativas en ambos tratamientos se encuentra la pérdida de masa, acidez, grado de madurez, tono y diferencia de color. Los parámetros afectados solo en el tratamiento con luz corresponden al licopeno y saturación de color (Tabla 18). En relación a los compuestos gaseosos, tanto la concentración de oxígeno, como el dióxido de carbono y el etileno resultaron afectados en el tiempo en ambos tratamientos (Tabla 19).

Se utilizó la ecuación Ley de la Potencia (Ecuación 18) para predecir qué sucederá con el atributo P en tiempo t:

$$\frac{dP}{dt} = k \cdot P^n \quad (18)$$

Dónde:

k: la constante de reacción;

n: orden de reacción.

Este modelo permite anteponerse y prevenir sucesos deseados y no deseados que puedan ocurrir, por ejemplo, en el desarrollo y maduración de los frutos de tomates.

Tabla 18. Modelación, tipo Ley de Potencia, de parámetros de calidad físicas y químicas del tomate.

Parámetro	Tratamiento	Pen	R ²	k	n
Pérdida de masa (g)	Con luz	1,0002	0,896	$1,44 \cdot 10^{-2}$	0
	Sin luz	1,0002	0,761	$5,46 \cdot 10^{-3}$	1
Acidez (g / 100mL)	Con luz	1,0000	0,980	$2,45 \cdot 10^{-5}$	0
	Sin luz	1,0000	0,980	$6,43 \cdot 10^{-4}$	1
Grado de madurez (g ss / g á. cítrico)	Con luz	1,0001	0,984	$8,61 \cdot 10^{-5}$	2
	Sin luz	1,0000	0,979	$2,64 \cdot 10^{-5}$	1
Lycopeno (mg / kg)	Con luz	1,0001	0,844	$7,17 \cdot 10^{-2}$	0
Tono (h°)	Con luz	1,0000	0,965	$1,43 \cdot 10^{-1}$	0
	Sin luz	1,0000	0,969	$8,76 \cdot 10^{-10}$	4
Saturación (C*)	Con luz	0,9999	0,973	$3,53 \cdot 10^{-5}$	2
Diferencia de color (ΔE)	Con luz	1,0001	0,840	$6,91 \cdot 10^{-2}$	0
	Sin luz	1,0000	0,793	$6,19 \cdot 10^{-2}$	0

Pen: pendiente entre valores experimentales y valores predichos. R²: coeficiente de determinación entre valores experimentales y valores predichos. k: constante de reacción. n: orden de reacción.

El coeficiente de determinación mínimo requerido para los parámetros, pérdida de masa y diferencia de color en ambos tratamientos es de 0,1087, mientras que el coeficiente de determinación mínimo requerido para los parámetros, acidez, grado de madurez y tono en ambos tratamientos es de 0,0924, al igual

que el contenido de licopeno y saturación, pero en este caso, solo en el tratamiento con luz (Tabla 18).

El orden de reacción (n) va desde 0 hasta 5 (oxígeno sin luz) (Tabla 18 y 19), en donde 10 de los 18 parámetros para los tratamientos con luz y sin luz presentan un orden de reacción igual a 0, lo cual indica que la velocidad o constante de reacción (k) es independiente del valor de ese parámetro y que corresponde a un modelo de tipo lineal.

Tabla 19. Modelación, tipo Ley de Potencia, de compuestos gaseosos, producidos durante la respiración celular, fotorrespiración y fotosíntesis.

Parámetro	Tratamiento	Pen	R ²	k	n
Oxígeno (mg / L)	Con luz	1,0000	0,990	$1,28 \cdot 10^{-7}$	3
	Sin luz	1,0001	0,985	$1,68 \cdot 10^{-12}$	5
Dióxido de carbono (mg / L)	Con luz	0,9997	0,987	$5,39 \cdot 10^{-1}$	0
	Sin luz	1,0012	0,878	$3,46 \cdot 10^{-1}$	0
Etileno (mg / L)	Con luz	1,0011	0,930	$8,73 \cdot 10^{-6}$	0
	Sin luz	1,0007	0,941	$6,81 \cdot 10^{-6}$	0

Pen: pendiente entre valores experimentales y valores predichos. R²: coeficiente de determinación entre valores experimentales y valores predichos. k: constante de reacción. n: orden de reacción.

El coeficiente de determinación mínimo requerido para los compuestos gaseosos es de 0,0380 en ambos tratamientos.

El orden de reacción (n) de los compuestos gaseosos de dióxido de carbono y etileno para ambos tratamientos corresponden al orden cero, los cuales corresponden a reacciones lineales, con una constante de reacción (k) muy

distinta para ambos parámetros, pero similares entre tratamientos del mismo compuesto gaseoso. El oxígeno, por otra parte, presentó órdenes de reacción mayores, correspondiente a reacciones de tipo polinomial, donde la constante de reacción para el segundo tratamiento es bastante menor que la del primero. Los resultados de la modelación matemática se encuentran graficados en los Figuras 22 a 39 (ver Apéndice).

7. CONCLUSIONES

La concentración de etileno si aumentó en presencia de luz, así confirmando la hipótesis de trabajo.

El contenido de licopeno y el parámetro diferencia de color aumentaron, al igual que los sólidos solubles en presencia de luz, junto al aumento de etileno. A pesar de que, la actividad respiratoria y la generación de etileno fue menor a lo esperado, debido a que la materia prima corresponde a una variedad tipo larga vida, la aplicación de la luz en tomates postcosecha aumentó la respiración debido a la fotorrespiración.

Para la modelación de la cinética de conversión, todos los parámetros, tanto físicos, químicos como compuestos gaseosos presentaron un valor de R^2 superior al coeficiente de determinación mínimo requerido.

8. FINANCIAMIENTO

Esta investigación ha sido financiada mediante el Proyecto FONDECYT Regular No. 1200858, denominado *“Photocatalytic oxidation of ethylene emissions from fruit cold-storage facilities under simulated Sunlight irradiation using reduced graphene oxide modified anatase black TiO₂ nanostructures with exposed at low-temperature and high relative humidity”*, liderado por el Dr. Héctor Valdés Morales, Profesor Titular de la Universidad Católica de la Santísima Concepción.

9. LITERATURA CITADA

1. Alarcón, A. 2013. Calidad poscosecha del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivado en sistemas ecológicos de fertilización. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de Ingeniería Rural, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Madrid, España.
2. Alba, R., M.M. Cordonnier-Pratt and L.H. Pratt. 2000. Fruit-localized phytochromes regulate lycopene accumulation independently of ethylene production in tomato. *Plant Physiol.* 123(1): 363-370.
3. Allende, M. 2017. Importancia y consideraciones del cultivo de tomate. pp: 11-18. Manual de cultivo del tomate al aire libre. Boletín INIA N°376. INIA. Santiago, Chile.
4. Archbold, D.D., F.G. Dennis and J.A. Flore. 1982. Accumulation of carbon 14 labeled material from foliar applied carbon 14 labeled sucrose by tomato *Lycopersicon esculentum* cultivar farthest north ovaries during fruit set and initial development. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 107(1): 19-23.
5. Arredondo, S. 2016. Cultivo de tomate industrial en Chile. pp: 11-29. Control de tizón en tomate industrial mediante un sistema de alerta temprana. Boletín INIA N°338. INIA Raihuén. Villa Alegre, Chile.

6. Bhandari, R., N. Neupane and D.P. Adhikari. 2021. Climatic change and its impact on tomato (*Lycopersicum esculentum* L.) production in plain area of Nepal [en línea]. Environ. Challenges 4. <<https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100129>>. [Consulta: 10 mayo 2021].
7. Bird, C.R., J.A. Ray, J.D. Fletcher, J.M. Boniwell, A.S. Bird, C. Teulieres, I. Blain, P.M. Bramley and W. Schuch. 1991. Using antisense RNA to study gene function: inhibition of carotenoid biosynthesis in transgenic tomatoes. Nat. Biotechnol. 9(7): 635-639.
8. Bradford, K.J. 2008. Shang Fa Yang: Pioneer in plant ethylene biochemistry. Plant Sci. 175(1-2): 2-7.
9. Cameron, A.C., W. Boylan-Pett and J. Lee. 1989. Design of modified atmosphere packaging systems: modeling oxygen concentrations within sealed packages of tomato fruits. J. Food Sci. 54(6): 1413-1416.
10. Castellanos, D.A., J.P. Cerisuelo, P. Hernandez-Muñoz, A.O. Herrera and R. Gavara. 2015. Modelling the evolution of O₂ and CO₂ concentrations in MAP of a fresh product: Application to tomato. J. Food Eng. 168: 85-95.

11. Cerezo, J. 2017. Fisiología vegetal. Tema XII: Etileno. Ingeniería agrónoma grado en horticultura y jardinería. Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena, España.
12. Ciruelos, A., R. de la Torre y C. González. 2008. Parámetros de calidad en el tomate para industria [en línea]. Universidad de Extremadura, España. <https://www.unex.es/conoce-la-unex/centros/eia/archivos/iag/2007/2007_09%20Parametros%20de%20calidad%20en%20el%20tomate%20para%20industria.pdf>. [Consulta: 10 mayo 2021].
13. Corpas, E.J., O.A. Tapasco. 2014. Hallazgos de la biosíntesis de etileno en frutas climatéricas y de los factores que afectan la ruta metabólica. Rev. Asoc. Col. Cienc. Technol. Aliment. 22(31): 46-59.
14. Cortez, C., A.G. Muñoz y J.A. Vega. 2016. Efecto de la temperatura y tipos de daños sobre la calidad del tomate [en línea]. Slideshare. <<https://es.slideshare.net/vegabner/efecto-de-la-temperatura-y-tipos-de-dao-sobre-la-calidad-del-tomate/>>. [Consulta: 19 julio 2021].
15. Cruz, R.M., G. González y P. Sánchez. 2013. Propiedades funcionales y beneficios para la salud del licopeno. Nutr. Hosp. 28(1): 6-15.

16. Davis, A.R., W.W. Fish and P. Perkins-Veazie. 2003. A rapid spectrophotometric method for analysing lycopene content in tomato and tomato products. *Postharv. Biol. Technol.* 28(3): 425-430.
17. Deaquiz-Oyola, Y.A. 2014. Los frutos y su fotosíntesis. *CONEXAGRO JDC* 4(1): 39-47.
18. De Bruijn, J., A. Gómez, C. Loyola, P. Melín, V. Solar, N. Abreu, F. Azzolina-Jury and H. Valdés. 2020. Use of a copper- and zinc modified natural zeolite to improve ethylene removal and postharvest quality of tomato fruit [en línea]. *Crystals* 10: 471(Art. N°1). <<https://www.mdpi.com/2073-4352/10/6/471>>. [Consulta: 19 julio 2021].
19. Devlin, R.M. 1982. *Fisiología vegetal*. (4a. ed.). Ediciones Omega. Barcelona, España.
20. Díaz de la Guardia, M. 2010. *Fisiología de las plantas*. (2a. ed.). Grupo Editorial Universitario. Granada, España.
21. Editorial Agro Cultivos. 2016. Influencia del etileno en la maduración de los frutos [en línea]. Editorial Agro Cultivos. <<https://www.horticultivos.com/featured/influencia-del-etileno-la-maduracion-los-frutos/>>. [Consulta: 19 mayo 2021].

22. Eguillor, P.M. 2019. Pérdida y desperdicio de alimentos en el sector agrícola: avances y desafíos febrero de 2019. ODEPA. Santiago, Chile.
23. FAO (Italia). 1993. Prevención de pérdidas de alimentos poscosecha: frutas, hortalizas, raíces y tubérculos. Manual de capacitación. Colección FAO: Capacitación 17/2. FAO. Roma, Italia.
24. FAO (Chile). 2017. Pérdida y desperdicios de alimentos en América Latina y el Caribe. Boletín N°4. FAO. Santiago, Chile.
25. Fish, W.W., P. Perkins-Veazie and J.K. Collins. 2002. A quantitative assay for lycopene that utilizes reduced volumes of organic solvents. J. Food Comp. Anal. 15(3): 309-317.
26. Flaño, A. 2013. Situación del tomate para el consumo fresco. ODEPA. Santiago, Chile.
27. Flaño, A. 2014. El mercado del tomate para el consumo fresco. ODEPA. Santiago, Chile.

28. Fonseca, S.C., F.A.R. Oliveira and J.K. Brecht. 2001. Modelling respiration rate of fresh fruits and vegetables for modified atmosphere packages: a review. *J. Food Eng.* 52(2): 99-119.
29. Fornaris, G.J. 2007. Conjunto tecnológico para la producción de tomate: cosecha y manejo postcosecha [en línea]. Universidad de Puerto Rico. <<https://www.uprm.edu/eea/wp-content/uploads/sites/177/2016/04/TOMATE-Cosecha-y-Manejo-Postcosecha-v2007.pdf>>. [Consulta: 19 julio 2021].
30. Fraser, P.D., M.R. Truesdale, C.R. Bird, W. Schuch and P.M. Bramley. 1994. Carotenoid biosynthesis during tomato fruit development: evidence for tissue-specific gene expression. *Plant Physiol.* 105(1): 405-413.
31. Gallego, R., J.C. Sanz. 2005. Guía de coloraciones. Hermann Blume. Barcelona, España.
32. Genta, H., R. Bernal y C. Guarinoni. 1992. Fisiología y manejo de postcosecha en tomate de primor. Serie Técnica N°28. INIA. Montevideo, Uruguay.

33. Gong, S., K.A. Corey. 1994. Predicting steady-state oxygen concentrations in modified-atmosphere packages of tomatoes. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 119(3): 546-550.
34. Grierson, D., A.A. Kader. 1986. Fruit ripening and quality. pp: 241-280. In: J.G. Aherton and J. Rudich (Eds.). *The tomato crop: a scientific basis for improvement*. Chapman and Hall. London, UK.
35. Henig, Y.S., S.G. Gilbert. 1975. Computer analysis of the variables affecting respiration and quality of produce packaged in polymeric films. *J. Food Sci.* 40(5): 1033-1035.
36. Ho, L.C., V. Sjut and G.V. Hoad. 1982. The effect of assimilate supply in fruit growth and hormone level in tomato plants. *Plant Growth Regul.* 1(3): 155-171.
37. Hortoinfo. 2021. La producción de tomate en todo el mundo supera ya los 186.000 millones de kilos [en línea]. Hortoinfo. <<https://www.hortoinfo.es/index.php/11115-produccion-mundial-tomate-291221>>. [Consulta: 17 marzo 2022].

38. INTAGRI (México). 2017. Frutos climatéricos y no climatéricos. Serie Postcosecha y Comercialización N°14. INTAGRI. Guanajuato, México.
39. Jaramillo, J.E., V.P. Rodríguez, L.F. Gil, M.C. García, J. Clímaco, D. Quevedo, G.D. Sánchez, P.A. Aguilar, L.M. Pinzón, M.A. Zapata, J.F. Restrepo y M. Guzmán. 2013. Tecnología para el cultivo de tomate bajo condiciones protegidas. Corpoica. Bogotá, Colombia.
40. Jen, J.J., A.E. Watada. 1977. Red light advances respiration and ethylene evolution in ripening tomatoes. HortScience 12(5): 459-460.
41. Kader, A.A. 2002. Tecnología postcosecha de cultivos hortofrutícolas. (3a. ed.). Publicación N°3530. Universidad de California. California, USA.
42. Krarup, C., P. Konar. 1997. Hortalizas de estación cálida: Biología y diversidad cultural. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.
43. Laiton, G.A., P.J. Almanza y E.H. Balaguera. 2013. Producción y calidad poscosecha de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) larga vida sometido a la aplicación de ácido giberélico. Rev. Colomb. Cienc. Hortic. 6(2): 183-195.

44. López, A.F. 2003. Cosecha. pp: 1-17. Manual para la preparación y venta de frutas y hortalizas: Del campo al mercado. Boletín de Servicios Agrícolas de la FAO N°151. FAO. Roma, Italia.
45. López, L.M. 2016. Generalidades del cultivo. pp: 13-23. En: Manual técnico del cultivo del tomate *Solanum lycopersicum*. INTA. San José, Costa Rica.
46. Marrero, A.F. 2019. Bases fisiológicas de la postcosecha [en línea]. Issuu. <https://issuu.com/horticulturaposcosecha/docs/1.3._marrero__antonio>. [Consulta: 19 mayo 2021].
47. Martínez-Romero, D., G. Bailén, M. Serrano, F. Guillén, J.M. Valverde, P. Zapata, S. Castillo and D. Valero. 2007. Tools to maintain postharvest fruit and vegetable quality through the inhibition of ethylene action: a review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 47(6): 543-560.
48. Medrano, H., J. Galmés y J. Flexas. 2013. Fotorrespiración y mecanismos de concentración del dióxido de carbono. pp: 227-243. En: J. Azón-Bieto y M. Talón (Eds.). *Fundamentos de fisiología vegetal*. (2a. ed.). McGraw-Hill Interamericana. Publicacions i Edicions de la Universitat de Barcelona. Madrid, España.

49. Mendoza, L. 2020. Horas luz en los cultivos: el caso de tomate y fresa [en línea]. Agroware. <<https://sistemaagricola.com.mx/blog/como-afectan-las-horas-luz-en-los-cultivos-el-caso-de-tomate-y-fresa>>. [Consulta: 17 junio 2021].
50. Meyer, B.S., D.B. Anderson, R.H. Bohling and D.G. Fratianne. 1973. Introduction to plant physiology. (2nd. ed.). Van Nostrand Co. New York, USA.
51. Moreiras, O., Á. Carbajal, L. Cabrera y C. Cuadrado. 2013. Tablas de composición de alimentos: guía de practicas. (19a. ed.). Pirámide. Madrid, España.
52. Muñoz, M. 2020. Boletín hortalizas [en línea]. ODEPA, Chile. <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiNTY1ZmI3NDQtNDQ0MS00NDk0LWJkMmEtYTNlZWQ5ODZkOGFhIiwidCI6IjMzYjdmNzA3LTZINmYtNDJkMi04ZDZmLTk4YmZmOWZiNWZhMCIslmMiOjR9>>. [Consulta: 20 noviembre 2021].
53. Navarro-González, I., M.J. Periago. 2016. El tomate, ¿alimento saludable y/o funcional? Rev. Esp. Nutr. Hum. Diet. 20(4): 323-335.

54. Nuez, F. 2001. Cultivo del tomate. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.
55. Núñez, T. 2017. El espectro electromagnético [en línea]. Etools. <<https://www.electrontools.com/Home/WP/el-espectro-electromagnetico/>>. [Consulta: 29 junio 2021].
56. Ortolá, M.D. 2020. Determinación de la tasa respiratoria de frutas [en línea]. Universidad Politécnica de Valencia, España. <<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/145648/Ortol%c3%a1%20-%20DETERMINACI%c3%93N%20DE%20LA%20TASA%20RESPIRATORIA%20DE%20FRUTAS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. [Consulta: 29 junio 2021].
57. Reina, C.E., J.C. Guzmán y J.M. Sánchez. 1998. Manejo postcosecha y evaluación de la calidad de tomate (*Lycopersicum esculentum* Mill) que se comercializa en la ciudad de Neiva. Universidad Surcolombiana. Neiva, Colombia.
58. Ribas-Carbó, M., I.D. Flórez-Sarasa y M.A. González-Meler. 2013. La respiración de las plantas. pp: 265-283. En: J. Azón-Bieto y M. Talón

- (Eds.). Fundamentos de fisiología vegetal. (2a. ed.). McGraw-Hill Interamericana. Publicacions i Edicions de la Universitat de Barcelona. Madrid, España.
59. Rivas, J. de las. 2013. La luz y el aparato fotosintético. pp: 165-187. En: J. Azón-Bieto y M. Talón (Eds.). Fundamentos de fisiología vegetal. (2a. ed.). McGraw-Hill Interamericana. Publicacions i Edicions de la Universitat de Barcelona. Madrid, España.
60. Rothan, C.M., J. Nicholas. 1989. Changes of 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid and of its conjugate during tomato fruit ripening. *Acta Hortic.* 4(258): 55-60.
61. Rusell, R. 2005. Luz visible [en línea]. Windows to the Universe, USA. <https://www.windows2universe.org/physical_science/magnetism/em_visible_light.html&lang=sp>. [Consulta: 16 junio 2021].
62. Salinas, J.F. 2017. Evaluación de líneas de mejora de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) de la pera en distintas condiciones de cultivo. Trabajo fin de máster, Ingeniería Agronómica. Universidad Miguel Hernández, Escuela Politécnica Superior de Orihuela. Alicante, España.

63. San Martín-Hernández, C., V.M. Ordaz, P. Sánchez-García, M.T. Beryl y L. Borges-Gómez. 2012. Calidad de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) producido en hidroponía con diferentes granulometrías de tezontle. *Agrociencia* 46(3): 243-254.
64. Sawamura, M., E. Knecht and J. Bruinsma. 1978. Levels of endogenous ethylene, carbon dioxide, and soluble pectin, and activities of pectin methylesterase and polygalacturonase in ripening tomato fruit. *Plant Cell Physiol.* 19(6): 1061-1069.
65. SLA (Chile). Tomate toscano BHN C4557. SLA. Nogales, Chile.
66. Sobitec. 2017. Frutas climatéricas y no climatéricas [en línea]. Sobitec, Perú. <<http://www.sobitecperu.com/frutas-climatericas-y-no-climatericas>>. [Consulta: 17 junio 2021].
67. Suslow, T.V., M. Catwell. 1997. Tomato: Recommendations for maintaining postharvest quality [en línea]. University of California, USA. <<https://postharvest.ucdavis.edu/files/259455.pdf>>. [Consulta: 17 junio 2021].

68. Talasila, P.C. 1992. Modeling of heat and mass transfer in a modified atmosphere package. Dissertation, Doctorate in Philosophy. University of Florida, Graduate School. Gainesville, USA.
69. Terai, H. 1990. Regulation mechanism of ethylene production in normal "Rutgers", and mutant *nor* and *rin* tomato fruits. J. Jpn. Soc. Hortic. Sci. 59(1): 121-128.
70. Valenzuela, M.S., M. Van de Shot y O. Melo. 2018. Caracterización económica de la cadena agroalimentaria del tomate de uso industrial: informe final. ODEPA. Santiago, Chile.
71. Yang, S.F., N.E. Hoffman. 1984. Ethylene biosynthesis and its regulation in higher plants. Ann. Rev. Plant Physiol. 35: 155-189.
72. Yang, C.C., M.S. Chinnan. 1988. Modeling the effect of O₂ and CO₂ on respiration and quality of stored tomatoes. Trans. ASAE (Am. Soc. Agric. Eng.) 31(3): 920-925.
73. Zacarías, L., M.T. Lafuente. 2013. Etileno, ácido abscísico y otros reguladores del desarrollo. pp: 445-463. En: J. Azón-Bieto y M. Talón (Eds.). Fundamentos de fisiología vegetal. (2a. ed.). McGraw-Hill

Interamericana. Publicacions i Edicions de la Universitat de Barcelona.

Madrid, España.

10. APÉNDICE

10.1. Compuestos gaseosos remanentes en el espacio de cabeza, con diferencias estadísticamente significativas en relación al tiempo para tratamientos con luz y sin luz en almacenamiento de tomates.

Tabla 20. Oxígeno exógeno remanente.

Tiempo (d)	CON LUZ		SIN LUZ		p
	M (mg / L)	DS (mg / L)	M (mg / L)	DS (mg / L)	
0	283,25	0	283,25	0	-
1	201,95	6,91	198,69	9,23	0,001
2	193,06	3,08	190,74	12,67	0,001
3	181,17	6,18	184,15	8,62	0,001
4	173,82	12,28	182	6,89	0,001
6	149,46	13,48	173,89	20,5	0,001
7	148,67	17,44	173,39	13,01	0,001
8	142,24	13	164,02	18,11	0,001
9	132,14	24,62	176,29	11,32	0,001
10	124,96	27,95	175,1	15,2	0,001
11	113,75	50,3	182,02	7,76	0,001
12	94,01	56,52	181,57	5,56	0,001

M: Media; DS: Desviación estándar; p: valor de probabilidad.

Tabla 21. Dióxido de carbono exógeno remanente.

Tiempo (d)	CON LUZ		SIN LUZ		p
	M (mg / L)	DS (mg / L)	M (mg / L)	DS (mg / L)	
0	0,529	0	0,529	0	-
1	12,71	2,21	12,76	4,55	< 0,0001
2	23,71	3,7	24,73	11,04	< 0,0001
3	36,39	6,76	34,18	11,81	< 0,0001
4	45,74	5,29	41,45	11,44	< 0,0001
6	69,72	8,61	54,96	14,4	< 0,0001
7	89,51	7,74	60,15	9,3	< 0,0001
8	101,95	5,48	73,55	21,82	< 0,0001
9	123,75	15,48	64	10,28	< 0,0001
10	139,66	18,45	72,87	15,51	< 0,0001
11	143,22	7,95	66,8	10,77	< 0,0001
12	155,44	0	69,37	6,52	< 0,0001

M: Media; DS: Desviación estándar; p: valor de probabilidad.

Tabla 22. Etileno exógeno remanente.

Tiempo (d)	CON LUZ		SIN LUZ		p
	M (mg / L)	DS (mg / L)	M (mg / L)	DS (mg / L)	
0	0	0	0	0	-
1	0	0,0001	0	0	< 0,0001
2	0	0,0001	0	0	< 0,0001
3	0,0003	0,0002	0,0002	0,0001	< 0,0001
4	0,0006	0,0001	0,0004	0,0001	< 0,0001
6	0,0011	0,0002	0,0006	0,0001	< 0,0001
7	0,0013	0,0001	0,0009	0,0001	< 0,0001
8	0,0016	0,0003	0,0011	0,0002	< 0,0001
9	0,0017	0,0002	0,0011	0,0005	< 0,0001
10	0,0021	0,0002	0,0015	0,0002	< 0,0001
11	0,0029	0,0009	0,0018	0,0002	< 0,0001
12	0,003	0,0003	0,0022	0,0001	< 0,0001

M: Media; DS: Desviación estándar; p: valor de probabilidad.

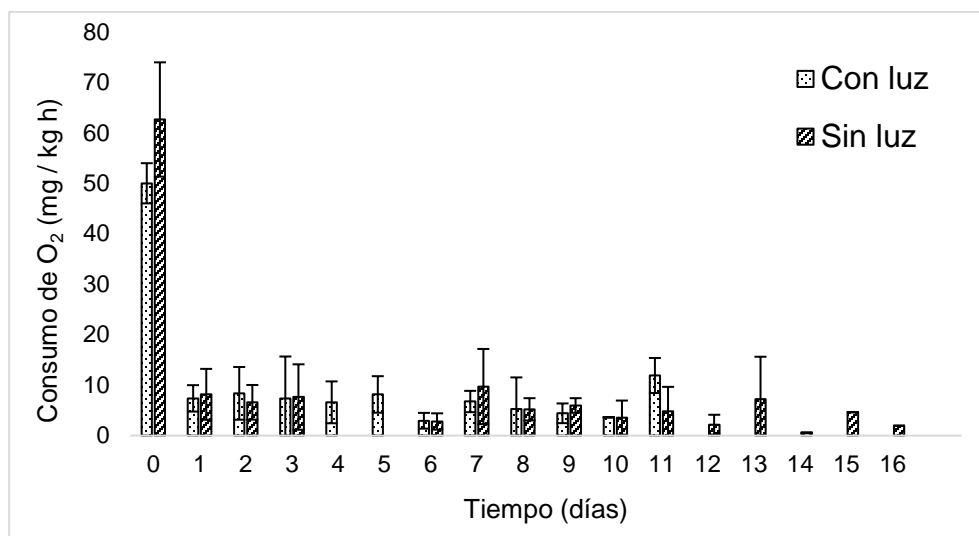


Figura 21. Tasa de consumo de oxígeno en el proceso de respiración del tomate en tratamientos con y sin luz.

10.2. Parámetros que no presentaron diferencias significativas según test de Friedman entre los tratamientos con y sin luz entre los días 6 y 12

Tabla 23. Contenido de humedad en relación con el tiempo en tratamientos de almacenamiento postcosecha de tomates Toscano con luz y sin luz.

Tiempo (d)	CON LUZ		SIN LUZ		p
	M (%)	DS (%)	M (%)	DS (%)	
0	94,6	0,3	95,1	0,4	0,412
6	94,4	0,5	95	0,6	0,102
12	94,5	0,4	95,5	0,4	0,102

M: Media; DS: Desviación estándar; p: valor de probabilidad.

Tabla 24. Pérdida de masa en relación con el tiempo en tratamientos de almacenamiento de tomates con luz y sin luz.

Tiempo (d)	CON LUZ		SIN LUZ		p
	M (%)	DS (%)	M (%)	DS (%)	
6	1,5	0,3	1,2	0,9	0,0819
12	2,7	1	1,9	0,7	0,0819

M: Media; DS: Desviación estándar; p: valor de probabilidad.

Tabla 25. Pérdida de volumen en relación con el tiempo en tratamientos de almacenamiento de tomates con luz y sin luz.

Tiempo (d)	CON LUZ		SIN LUZ		p
	M (%)	DS (%)	M (%)	DS (%)	
6	1,4	5,2	2,5	2,3	0,2657
12	0,6	7,6	2,8	3,1	0,2657

M: Media; DS: Desviación estándar; p: valor de probabilidad.

Tabla 26. Contenido de acidez en relación con el tiempo en tratamientos de almacenamiento de tomates con luz y sin luz.

Tiempo (d)	CON LUZ		SIN LUZ		p
	M (g / 100 mL)	DS (g / 100 mL)	M (g / 100 mL)	DS (g / 100 mL)	
0	0,47	0,07	0,54	0,07	0,21
6	0,44	0,05	0,48	0,05	1
12	0,42	0,05	0,4	0,05	1

M: Media; DS: Desviación estándar; p: valor de probabilidad.

Tabla 27. Tono de tomates en relación con el tiempo en tratamientos de almacenamiento de tomates con luz y sin luz.

Tiempo (d)	CON LUZ		SIN LUZ		p
	M (°)	DS (°)	M (°)	DS (°)	
0	103,9	13,6	109,3	4,4	0,405
6	81	17,9	93,5	18,7	0,082
12	62,4	17,7	80,3	21,3	0,082

M: Media; DS: Desviación estándar; p: valor de probabilidad.

Tabla 28. Saturación en tomates en relación con el tiempo en tratamientos de almacenamiento de tomates con luz y sin luz.

Tiempo (d)	CON LUZ		SIN LUZ		p
	M (C*)	DS (C*)	M (C*)	DS (C*)	
0	39	7	37,5	8,3	0,801
6	43,9	10	38,5	6,2	0,266
12	60	6,1	44,4	6,9	0,266

M: Media; DS: Desviación estándar; p: valor de probabilidad.

Tabla 29. Diferencia de color en tomates en relación con el tiempo en tratamientos de almacenamiento de tomates con luz y sin luz.

Tiempo (d)	CON LUZ		SIN LUZ		p
	M (ΔE)	DS (ΔE)	M (ΔE)	DS (ΔE)	
6	20,3	14,6	19,3	7	0,586
12	41,4	13,4	24,2	15	0,586

M: Media; DS: Desviación estándar; p: valor de probabilidad.

10.3. Modelación de parámetros con cambios estadísticamente significativos en el tiempo (según test de correlación de Spearman).

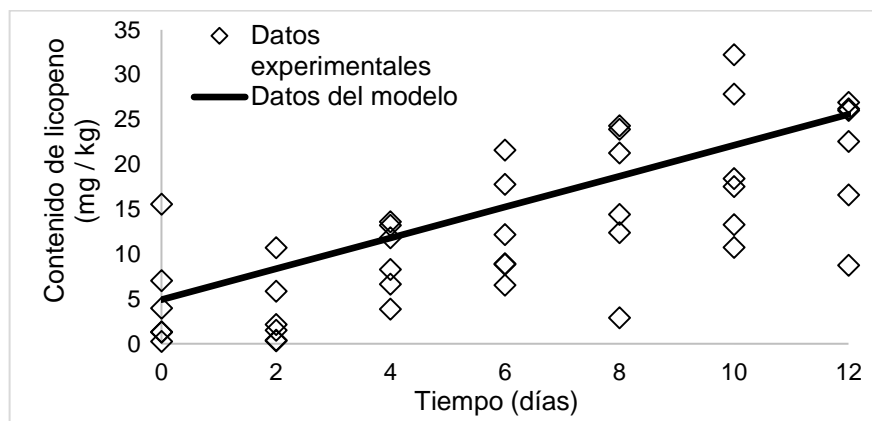


Figura 22. Contenido de licopeno del tomate en el tiempo en tratamiento con luz.

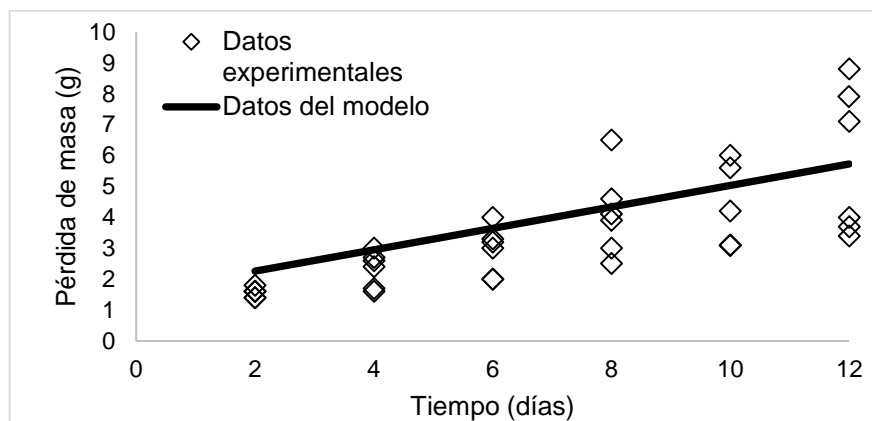


Figura 23. Pérdida de masa del tomate en el tiempo en tratamiento con luz.

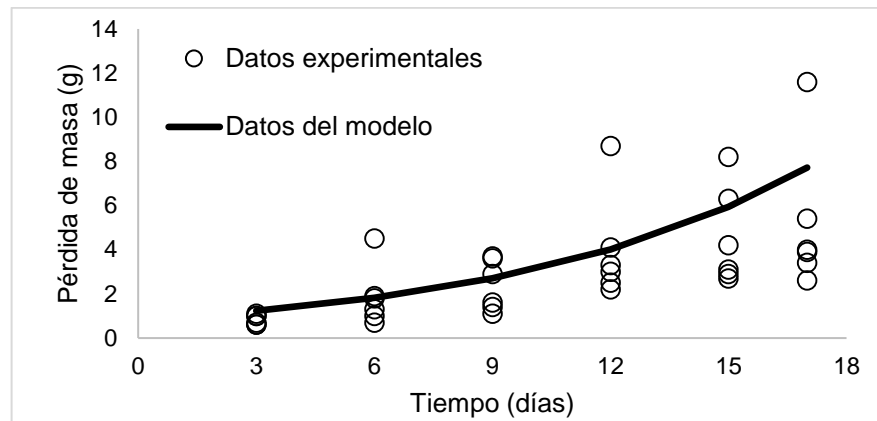


Figura 24. Pérdida de masa del tomate en el tiempo en tratamiento sin luz

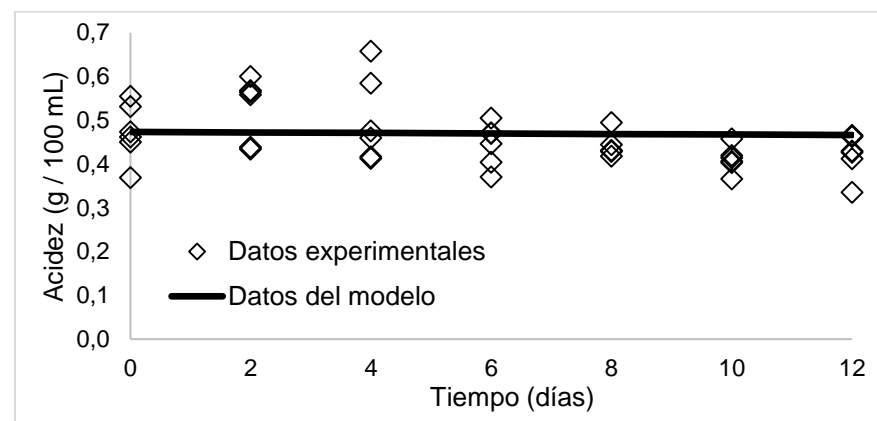


Figura 25. Acidez del tomate en el tiempo en tratamiento con luz.

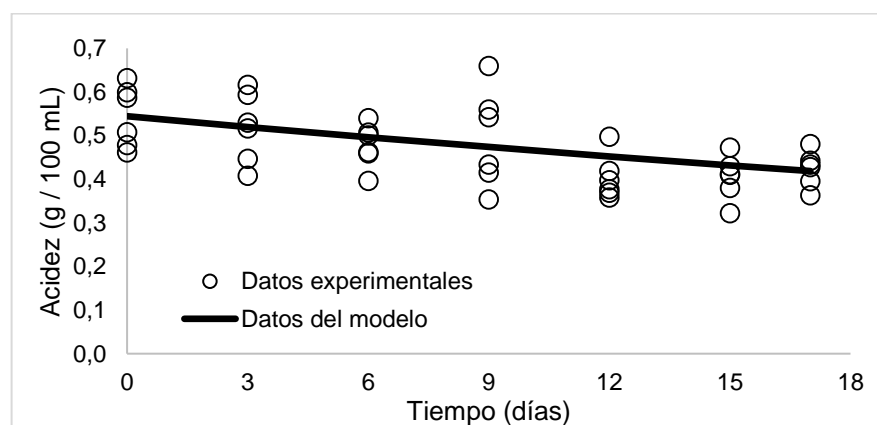


Figura 26. Acidez del tomate en el tiempo en tratamiento sin luz.

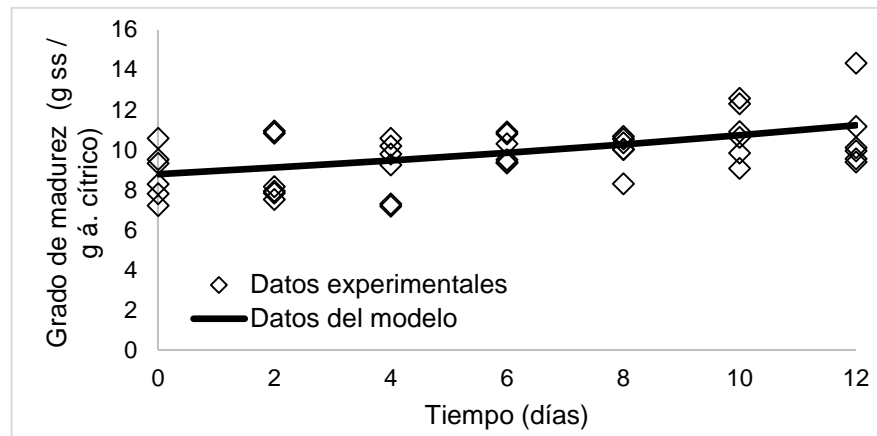


Figura 27. Grado de madurez del tomate en el tiempo en tratamiento con luz.

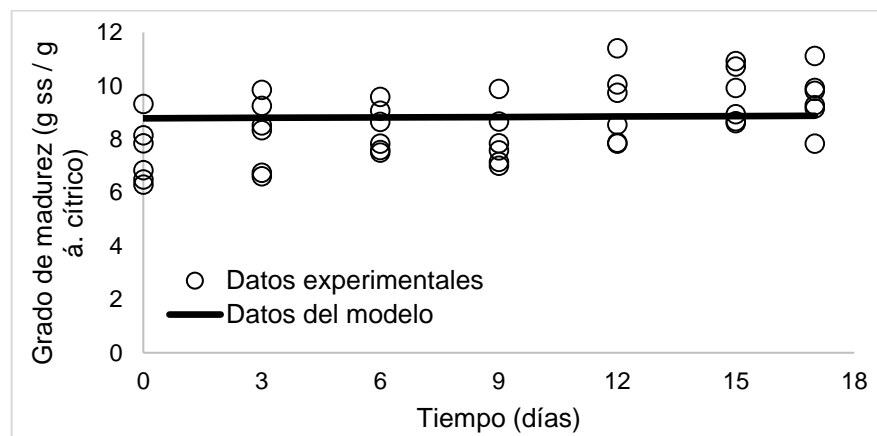


Figura 28. Grado de madurez del tomate en el tiempo en tratamiento sin luz.

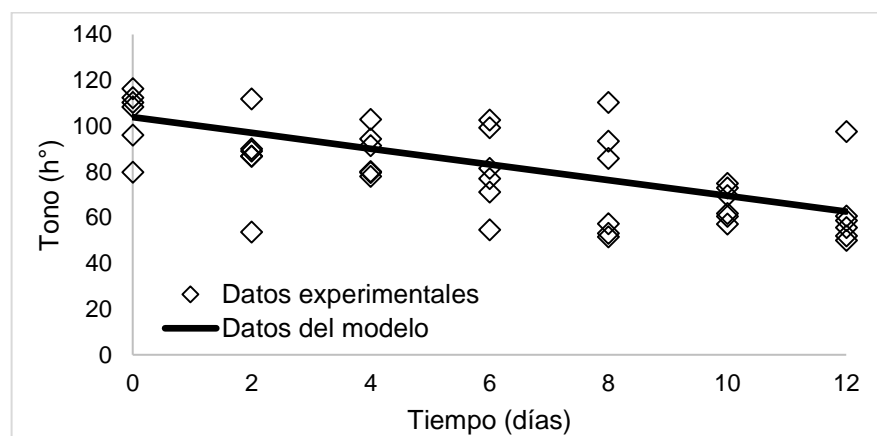


Figura 29. Tono del tomate en el tiempo en tratamiento con luz.

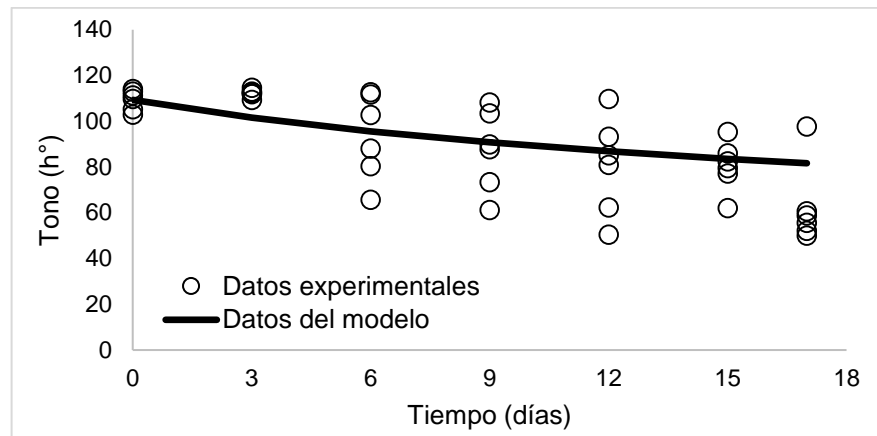


Figura 30. Tono del tomate en el tiempo en tratamiento sin luz.

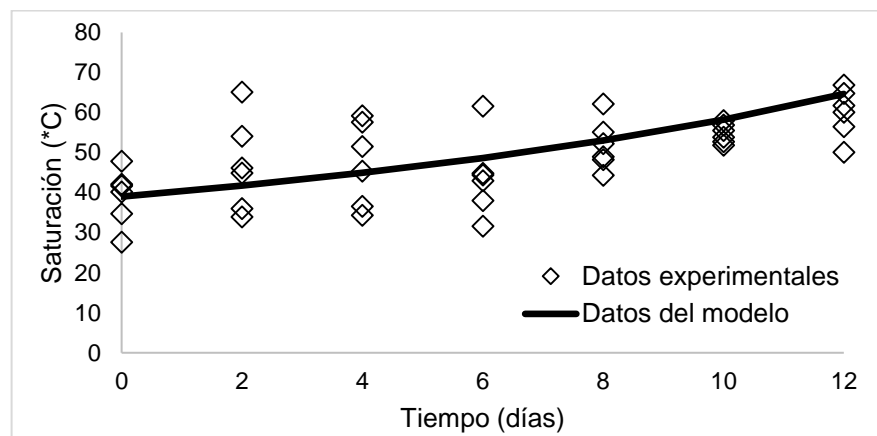


Figura 31. Saturación de color del tomate en el tiempo en tratamiento con luz.

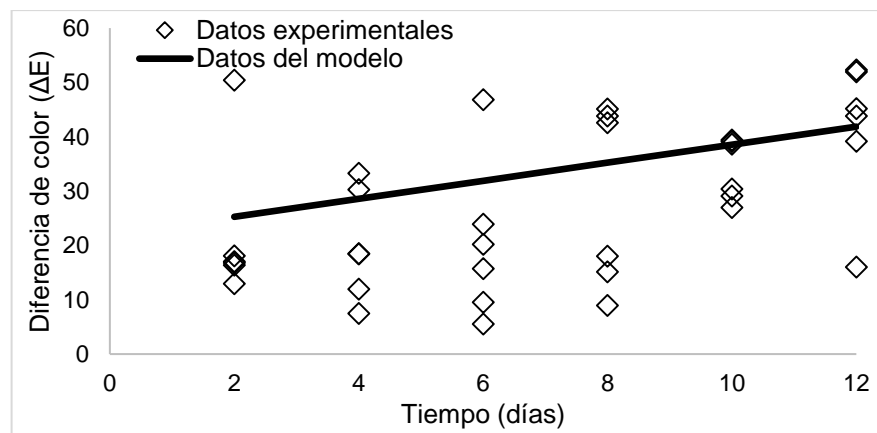


Figura 32. Diferencia de color del tomate en el tiempo en tratamiento con luz.

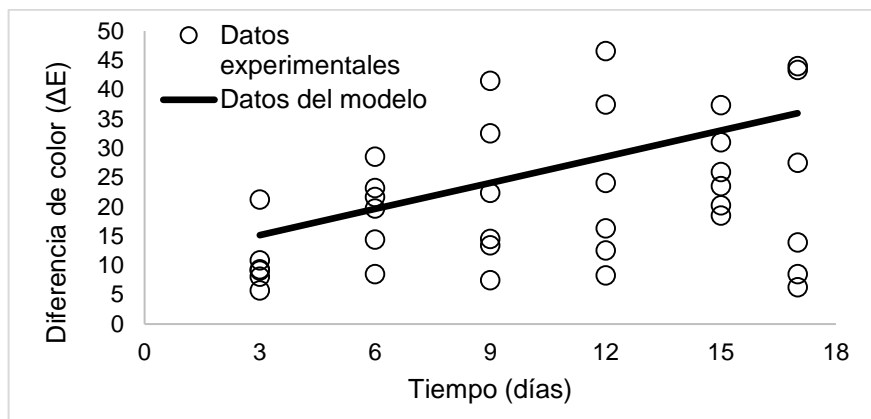


Figura 33. Diferencia de color del tomate en el tiempo en tratamiento sin luz.

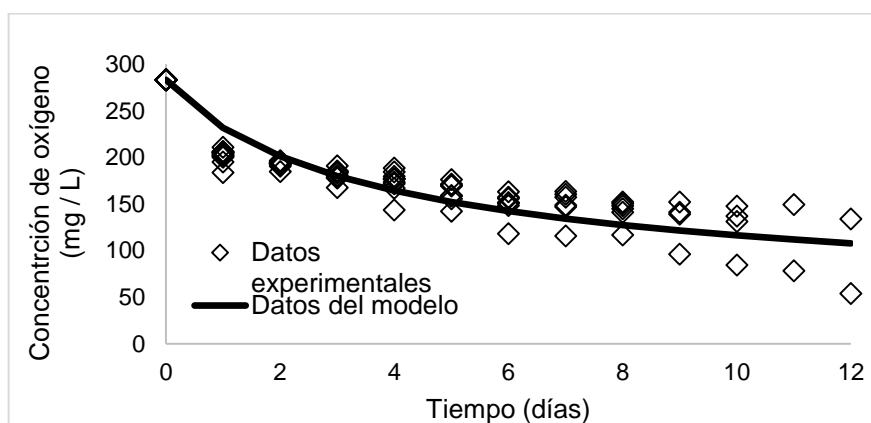


Figura 34. Oxígeno remanente del tomate en el tiempo en tratamiento con luz.

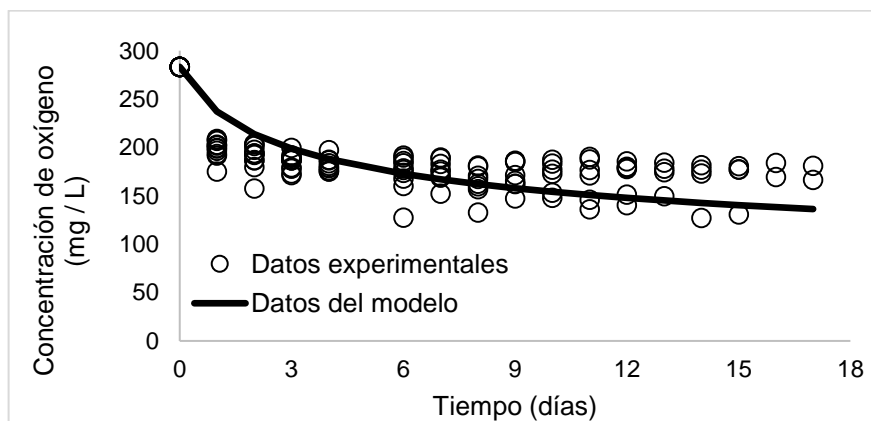


Figura 35. Oxígeno remanente del tomate en el tiempo en tratamiento sin luz.

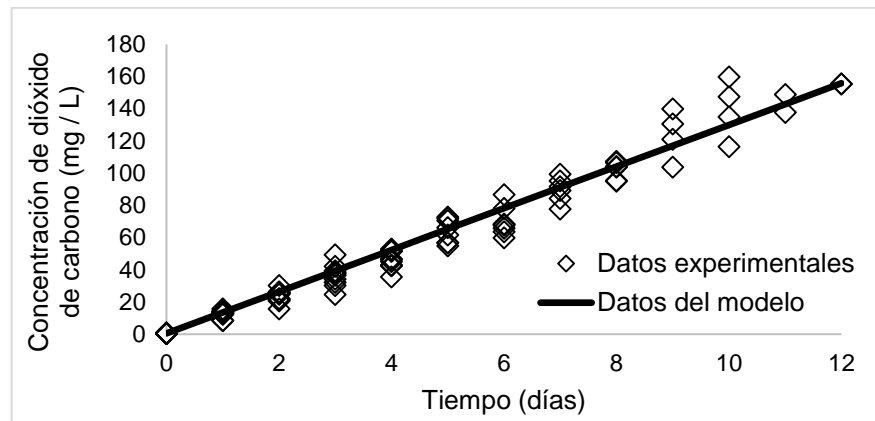


Figura 36. Dióxido de carbono remanente del tomate en el tiempo en tratamiento con luz.

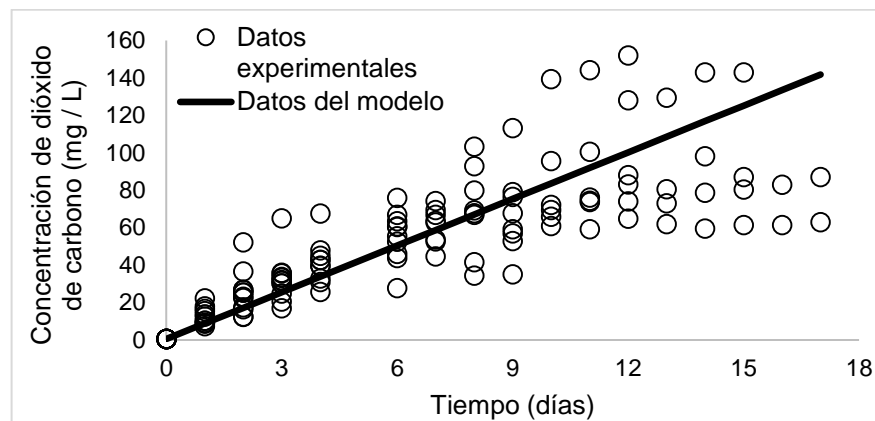


Figura 37. Dióxido de carbono remanente del tomate en el tiempo en tratamiento sin luz.

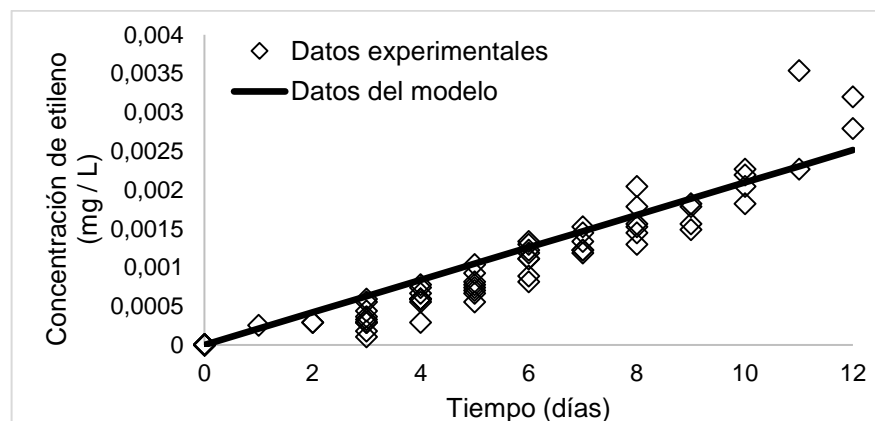


Figura 38. Etileno remanente en el tomate del tiempo en tratamiento con luz.

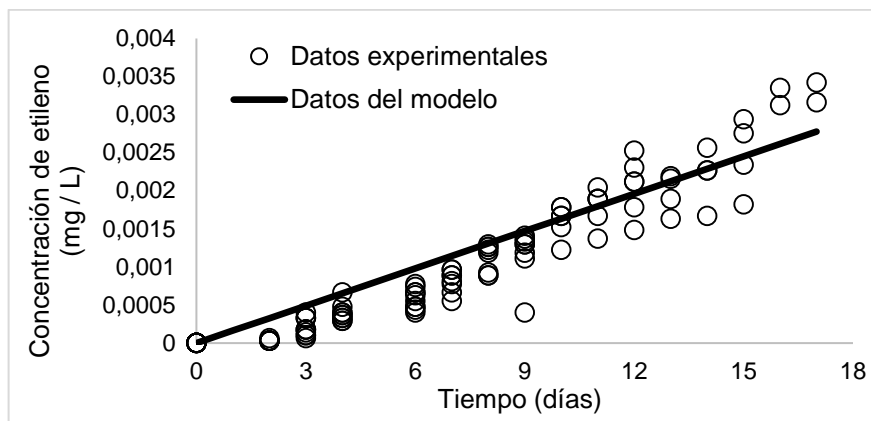


Figura 39. Etileno remanente del tomate en el tiempo en tratamiento sin luz.

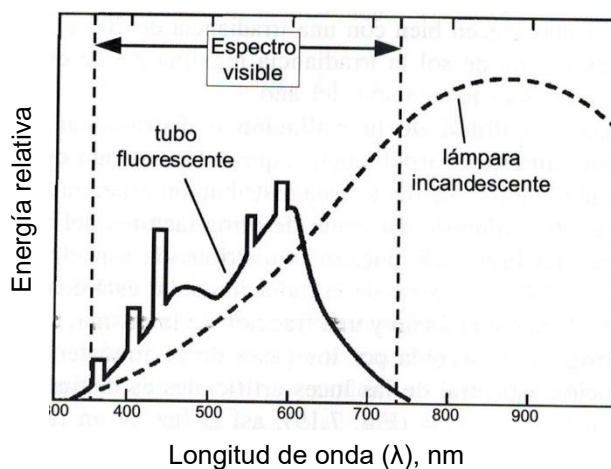


Figura 40. Espectros de emisión de lámparas luminosas. Nótese el máximo de la lámpara incandescente cerca de 900 nm y las líneas de emisión del mercurio en el espectro de la lámpara fluorescente.

Tabla 30. Fotos de cada una de las muestras de tomate a través del tiempo en presencia de luz artificial visible.












































































Día	Desecador	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
0	-			
2	1			
	2			
4	3			
	4			
6	5			
	6			
8	7			
	8			
10	9			
	10			
12	11			
	12			

Tabla 31. Fotos de cada una de las muestras de tomate a través del tiempo en ausencia de luz artificial visible.

Día	Desecador	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
0	-			
3	1			
	2			
6	3			
	4			
9	5			
	6			
12	7			
	8			
15	9			
	10			
17	11			
	12	