


Evaluación comparativa de tecnologías de enfriamiento y tratamientos con hipoclorito de sodio, para prolongar la vida útil del tomate en condiciones tropicales


Comparative evaluation of cooling technologies and sodium hypochlorite treatments to extend the shelf life of tomato under tropical conditions

Menjivar Polanco, Ricardo José^{1}*

López Monte, Julio²

Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Francisco Morazán, Honduras

¹ menjivar_1@hotmail.com 

² jlopez@zamorano.edu 

Recibido/received:02/10/2025 Corregido/revised:10/11/2025 Aceptado/accepted:06/12/2025

Resumen: El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es un cultivo de gran importancia hortícola cuya vida de anaquel se reduce en climas tropicales por la rápida maduración y la incidencia de patógenos poscosecha. Para enfrentar esta limitante, se evaluó el desempeño de los sistemas de enfriamiento, ColdStore, una cámara evaporativa, y Coolbot®, un cuarto frío adaptado, comparándolos con el almacenamiento ambiental, junto con inmersiones en hipoclorito de sodio cada tres y cinco días. El experimento se realizó bajo un diseño BCA bifactorial, evaluando temperatura, color, firmeza, °Brix, incidencia de enfermedades y tiempo de conservación. Coolbot® mantuvo temperaturas promedio de 12.5 ± 2.05 °C y 72.0 ± 6.63 % HR, firmeza media de $1.39 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$, conservando la calidad comercial hasta el día 21, ColdStore operó a 23.06 ± 2.13 °C y 84.7 ± 10.6 % HR con una media de firmeza de $0.91 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$, manteniendo calidad comercial hasta el día 15, ambas superiores al ambiente (25.1 ± 3.52 °C y 60.8 ± 13.8 % HR; $0.36 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$). Los °Brix se mantuvieron estables alrededor de 3.5. Las inmersiones en hipoclorito no mostraron diferencias estadísticas, pero en combinación con las cámaras redujeron descartes de frutos por pudriciones a 1.51–3.44 % en CoolBot y ColdStore, frente al 10.08 % en ambiente. En conjunto, Coolbot® con inmersiones cada tres días resultó la alternativa más eficiente para prolongar la vida útil y preservar la calidad visual del tomate, mientras que ColdStore representó una opción viable y de menor costo para contextos con acceso limitado a energía.

Palabras clave: poscosecha; cámaras de enfriamiento; hipoclorito de sodio; vida útil; calidad

* Autor de correspondencia
Correo: menjivar_1@hotmail.com



Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-SinDerivar 4.0

Abstract: Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) is a horticulturally important crop whose shelf life is significantly reduced under tropical conditions due to rapid ripening and the incidence of postharvest pathogens. To address this limitation, the performance of two cooling systems, ColdStore, an evaporative chamber, and Coolbot®, an adapted cold room, was evaluated in comparison with ambient storage, in combination with sodium hypochlorite dips applied every three and five days. The experiment followed a bifactorial randomized complete block design, assessing temperature, color, firmness, °Brix, disease incidence, and storage duration. Coolbot® maintained average conditions of 12.5 ± 2.05 °C and $72.0 \pm 6.63\%$ RH, with a mean firmness of $1.39 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$, preserving commercial quality up to day 21. ColdStore operated at 23.06 ± 2.13 °C and $84.7 \pm 10.6\%$ RH, with a mean firmness of $0.91 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$, maintaining commercial quality up to day 15; both systems outperformed ambient storage (25.1 ± 3.52 °C and $60.8 \pm 13.8\%$ RH; $0.36 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$). Soluble solids content remained stable at approximately 3.5 °Brix. Although sodium hypochlorite dips did not result in statistically significant differences, their combination with the cooling systems reduced fruit discard due to decay to 1.51–3.44% in Coolbot® and ColdStore, compared with 10.08% under ambient storage. Overall, Coolbot® combined with dips every three days proved to be the most efficient strategy for extending shelf life and preserving tomato visual quality, while ColdStore also emerged as a viable, lower-cost alternative for contexts with limited access to energy.

Keywords: postharvest; cooling chambers; sodium hypochlorite; shelf life; quality

Introducción

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es una de las hortalizas más importantes en el mundo por su valor alimenticio, su versatilidad en la cocina y su aporte de compuestos antioxidantes como licopeno, vitamina C y carotenoides, que contribuyen a la salud humana (Kefas et al., 2024; Shankar et al., 2024). Sin embargo, debido a su naturaleza perecedera, las pérdidas poscosecha son significativas, especialmente en regiones tropicales donde las temperaturas elevadas y la alta humedad relativa aceleran su deterioro. Se estima que entre un 20 % y 50 % de la producción se pierde después de la cosecha, afectando directamente los ingresos de los productores y la disponibilidad de alimentos frescos (Arah et al., 2016; Kefas et al., 2024).

Las principales causas de estas pérdidas están relacionadas con golpes durante el manejo, deficiencias en la ventilación y el empaque, así como con la falta de un sistema de enfriamiento eficiente que reduzca la temperatura del fruto inmediatamente después de la cosecha. Mantener el tomate entre 10 y 15 °C y una humedad relativa de 85 a 95 % disminuye la respiración, la producción de etileno y la incidencia de enfermedades poscosecha (Arah et al., 2016; Sibanda & Workneh, 2019).

En este contexto, las cámaras evaporativas, como ColdStore, construidas con materiales locales como ladrillo poroso, arena o aserrín húmedo, representan una opción viable en zonas sin energía eléctrica estable, ya que pueden reducir la temperatura interna entre 5 °C y 10 °C respecto al ambiente, prolongando la vida útil del fruto entre 4 y 10 días (Nkolisa et al., 2018; Sibanda & Workneh, 2019; Ghebreyesus et al., 2024; Ambuko et al., 2017). Paralelamente, sistemas innovadores como Coolbot®, que convierten aires acondicionados convencionales en cuartos fríos, han mostrado resultados promisorios en la extensión de la vida útil de tomates y otros frutos en países en desarrollo, destacándose como alternativas viables para pequeños productores (Majubwa et al., 2021; Horticulture Innovation Lab, 2025).

De manera complementaria, la desinfección de frutos mediante inmersiones en soluciones de hipoclorito de sodio es una práctica ampliamente utilizada para reducir la carga microbiana superficial y limitar el desarrollo de patógenos, contribuyendo a preservar la apariencia visual y la inocuidad del tomate, (Mishra et al., 2018). Aplicaciones entre 50 y 200 mg L⁻¹ de cloro libre ayudan a disminuir la carga microbiana sin afectar la calidad sensorial del fruto, Ensayos recientes muestran que la combinación del hipoclorito con sistemas de enfriamiento o hidro-enfriamiento mejora la apariencia, firmeza y composición química del tomate durante el almacenamiento (Mani et al., 2023; Gemida et al., 2023). No obstante, la efectividad de esta práctica depende de su frecuencia y de la interacción con las condiciones de almacenamiento, por lo que resulta necesario evaluar combinaciones adaptadas a ambientes tropicales.

Aunque las investigaciones sobre tecnologías de enfriamiento y manejo poscosecha del tomate han avanzado en África y Asia, en la región tropical de Centroamérica la información sigue siendo escasa y fragmentada. La mayoría de los estudios disponibles provienen de contextos agroclimáticos distintos o cultivos de importancia regional, con diferentes niveles de infraestructura y escala productiva. En consecuencia, existe un vacío de conocimiento sobre la eficacia comparativa de tecnologías de enfriamiento accesibles como las cámaras ColdStore o Coolbot®, combinadas con esquemas de desinfección con hipoclorito de sodio (cloro), evaluadas bajo condiciones tropicales reales. Esta falta de evidencia limita la adopción de prácticas poscosecha efectivas por parte de los productores de la región.

Por lo antes indicado la presente investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de dos sistemas de enfriamiento (ColdStore y Coolbot®) con inmersiones en hipoclorito de sodio aplicadas a intervalos de tres y cinco días sobre la vida de anaquel y la calidad poscosecha del tomate en condiciones tropicales de Honduras, con el propósito de identificar alternativas tecnológicas viables que reduzcan pérdidas y mejoren la competitividad de pequeños y medianos productores.

Material y Métodos

El estudio se realizó en los meses de abril a mayo del 2025 en las instalaciones experimentales del área poscosecha del centro Regional de innovación para las frutas y hortalizas de la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras, con el propósito de evaluar el efecto de dos sistemas de enfriamiento y la aplicación de hipoclorito de sodio sobre la calidad poscosecha del tomate (*Solanum lycopersicum* L.). Se utilizó un diseño bifactorial en Bloques Completos al Azar (BCA) con tres repeticiones. El factor A correspondió al tipo de cámara de almacenamiento: Coolbot®, un cuarto frío adaptado; ColdStore, una cámara evaporativa de madera; y condiciones ambientales. El factor B correspondió a la frecuencia de inmersión en hipoclorito de sodio a 100 ppm durante un minuto, con tres niveles: sin inmersión, cada tres días y cada cinco días.

La unidad experimental consistió en una canasta plástica que contenía tomates de la variedad Paraíso 3748, cosechados en estado pintón y seleccionados por uniformidad de tamaño y ausencia de daños. El número de frutos por unidad experimental varió entre 43 y 55 frutos, resultado de un proceso de distribución aleatoria, en el que, todos los tomates cosechados se colocaron en un solo lote sobre una lona plástica y

alrededor de todos los frutos se pusieron las 27 canastas, correspondientes al arreglo factorial 3×3 con tres repeticiones cada uno. Posteriormente, los frutos se distribuyeron uno por uno y de forma completamente aleatoria, asignando un tomate a cada canasta, hasta agotar el total disponible, garantizando así una aleatorización homogénea sin reposición y una representación equitativa del lote cosechado en cada unidad experimental

Las variables evaluadas incluyeron, eficiencia de las cámaras de enfriamiento, Calidad visual mediante escala de Likert de 1 a 9 (1 = excelente, 9 = no apto), Color según la escala de Kader y Cantwell (2010) (1 = verde a 6 = rojo); firmeza de pulpa con penetrómetro manual (kg/cm^2); sólidos solubles totales con refractómetro manual ($^{\circ}\text{Brix}$).

La incidencia de enfermedades se determinó mediante la observación de daños visuales de pudriciones en los frutos durante el almacenamiento. Los tomates que presentaron síntomas fueron llevados al Laboratorio de Fitopatología de Zamorano, donde se realizaron aislamientos para identificar los géneros de patógenos presentes. Estos resultados se correlacionaron con el número de tomates descartados por pudriciones y con la calidad visual registrada en cada tratamiento.

La Figura 1 resume la línea de tiempo completa del ensayo, mostrando de forma integrada los días específicos en que se realizaron las evaluaciones, las aplicaciones de hipoclorito de Sodio (NaOCl) para los tratamientos 2 y 3 (Tr2 y Tr3), así como el momento en que el almacenamiento en condiciones ambientales fue descartado por pérdida de calidad comercial. La figura también indica la fecha de finalización del experimento y permite visualizar de manera clara la secuencia temporal de actividades realizadas durante el tiempo que duró el estudio.

Las variables visuales (calidad visual y colorimetría) se evaluaron por unidad experimental definida como la combinación cámara \times tratamiento \times día. En cada unidad experimental se clasificaron los frutos en categorías visuales (1, 3, 5, 7 y 9), y a partir de los conteos se obtuvo una media ponderada representativa de esa unidad. En total se generaron 188 observaciones, cada una correspondiente a la media ponderada obtenida para una unidad experimental.

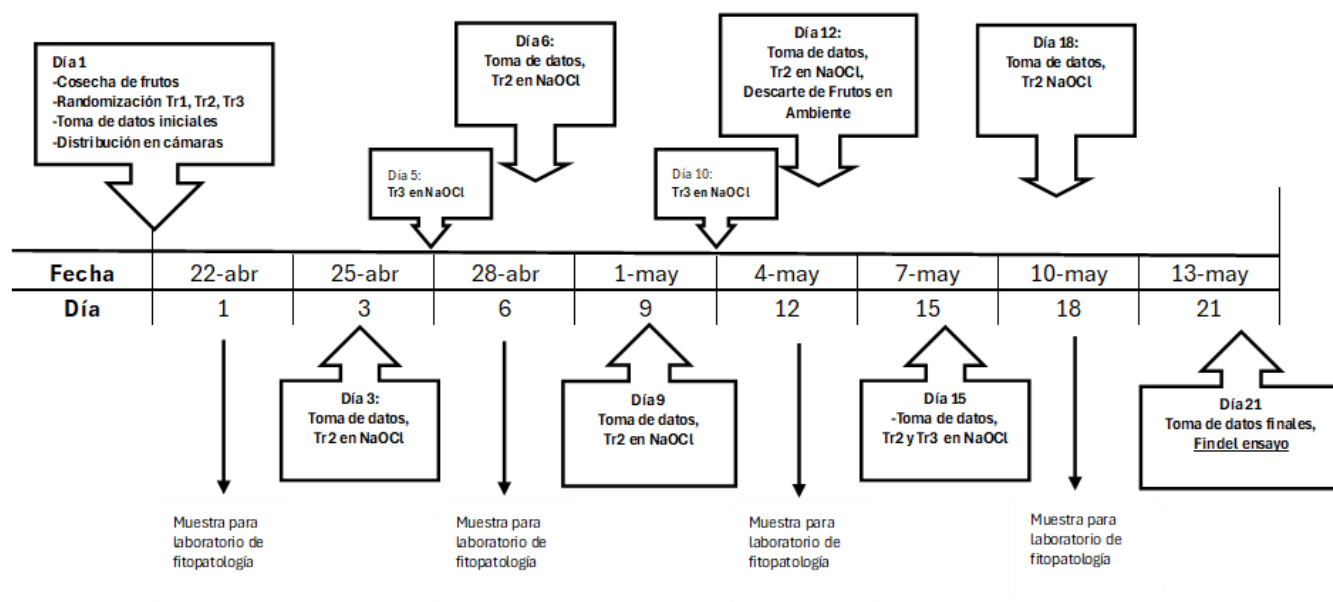
Las variables fisicoquímicas (firmeza, $^{\circ}\text{Brix}$) se midieron directamente sobre frutos individuales. Para cada día y tratamiento se seleccionó un fruto por cada unidad experimental (una fruta por canasta), representando tres frutos por tratamiento en cada fecha de evaluación. Estas mediciones individuales generaron un total de 467 observaciones utilizadas en el análisis estadístico.

El consumo eléctrico del sistema CoolBot® se estimó a partir de la potencia del aire acondicionado instalado y del porcentaje real de tiempo en que el compresor permaneció encendido, determinado mediante el registro de los intervalos de encendido y apagado durante su operación. Estos valores fueron validados y complementados por técnicos del área de Mantenimiento de Zamorano, quienes confirmaron un factor de carga promedio entre 39 % y 46 %. Con este rango se estimó un consumo diario en kWh, y su equivalente a kWh/mes, empleado posteriormente para calcular el costo de operatividad según la tarifa vigente de la CREE (2025)

El análisis estadístico se realizó en InfoStat® versión 2020, aplicando análisis de varianza (ANOVA) para el modelo bifactorial y comparación de medias mediante la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Para las variables categóricas, como la incidencia de enfermedades, se utilizó la prueba de Chi-cuadrado a partir de tablas de contingencia. Las figuras de tendencia y gráficos de líneas con barras de error estándar se elaboraron en el software R (versión 4.3.3; R Core Team, 2024) utilizando el paquete *ggplot2*.

Figura 1

Línea de tiempo del experimento y aplicación de hipoclorito de Sodio (NaOCl) a tratamientos, durante el tiempo de duración del ensayo.



Fuente: Elaborada por los autores, 2025

Resultados y discusión

Eficiencia de las cámaras de enfriamiento (ColdStore y Coolbot®)

La cámara Coolbot® mantuvo un promedio de 12.5 ± 2.05 °C y 72.0 ± 6.63 % HR, la cámara ColdStore de 23.06 ± 2.13 °C y 84.7 ± 10.6 % HR, mientras que el ambiente alcanzó 25.1 ± 3.52 °C y 60.8 ± 13.8 % HR (Tabla 1 y 2) Estas diferencias fueron significativas (ANOVA, $p < 0.05$) y validaron la efectividad diferencial de cada tecnología.

Estudios previos destacan que temperaturas superiores a 20 °C aceleran la respiración y maduración del tomate (Kader, 2002; Saltveit, 2019), mientras que humedades bajas aumentan la pérdida de peso y

deshidratación (FAO, 2019). En concordancia, la cámara Coolbot® ofreció las condiciones más estables, lo que explica su mayor desempeño en la conservación. Este resultado demuestra que el control simultáneo de temperatura y HR es crítico para extender la vida de anaquel del tomate en ambientes tropicales.

Tabla 1. Separación de medias y Desviación estándar para temperatura

Cámara	Media_Temp °C	DE_T °C	N
Ambiente	25.1	3.52	607
ColdStore	23.06	2.13	2025
Coolbot®	12.51	2.05	2024

Tabla 2. Separación de medias y desviación estándar para humedad relativa

Cámara	Media_HR %	DE_HR	N
Ambiente	60.78	13.8	607
ColdStore	84.7	10.6	2025
Coolbot®	72.04	6.63	2024

Fuente: Elaboradas por los autores, 2025

Clasificación visual

La clasificación visual, evaluada en una escala Likert de 1 a 9 (1 = excelente calidad, 9 = no apto o comercializable), presentó diferencias significativas entre las cámaras de almacenamiento ($F = 32.13$; $p < 0.0001$), pero no entre las frecuencias de inmersión en hipoclorito de sodio ($p = 0.3847$) (Tabla 3).

Al analizar la media ponderada de la clasificación a lo largo del tiempo, sí se observaron diferencias significativas entre cámaras ($p < 0.0001$), entre días de almacenamiento ($p < 0.0001$) y en la interacción de ambos factores ($p < 0.0001$). Este resultado confirma que el tipo de cámara influyó directamente en la preservación de la calidad visual durante el almacenamiento. Aunque ColdStore y ambiente no se diferenciaron en el conteo total de frutos aceptables, la evolución de la escala mostró que ColdStore retardó la pérdida de calidad en comparación con el ambiente, mientras que Coolbot® mantuvo la mejor calidad global y durante más tiempo.

Tabla 3. Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	19529.96	11	1775.45	70.18	<0.0001
Cámara	1625.55	2	812.78	32.13	<0.0001
Tratamiento	48.60	2	24.30	0.96	0.3847
fecha	17855.80	7	2550.83	100.83	<0.0001
Error	4477.85	177	25.30		
Total	24007.81	188			

Fuente: Elaborada por los autores, 2025

En promedio, la cámara Coolbot® conservó un mayor número de frutos en calidad comercial (41.8) que ColdStore (38.0) y el ambiente (38.46). Sin embargo, la prueba de Tukey indicó que solo la Coolbot® se diferenció estadísticamente (letra A), mientras que ColdStore y ambiente compartieron la misma letra (B), lo que significa que estos últimos no difirieron entre sí en el número de frutos clasificados (Tabla 4).

Tabla 4. Prueba de comparación múltiple de Tukey, para número de frutos clasificados

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=2.15545					
Error: 25.2986 gl: 177					
<u>Cámara</u>	<u>Medias</u>	<u>n</u>	<u>E.E.</u>		
Coolbot®	41.81	72	0.59	A	
Ambiente	38.46	45	0.82		B
ColdStore	38.00	72	0.59		B
Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)					
Fuente: Elaborada por los autores, 2025					

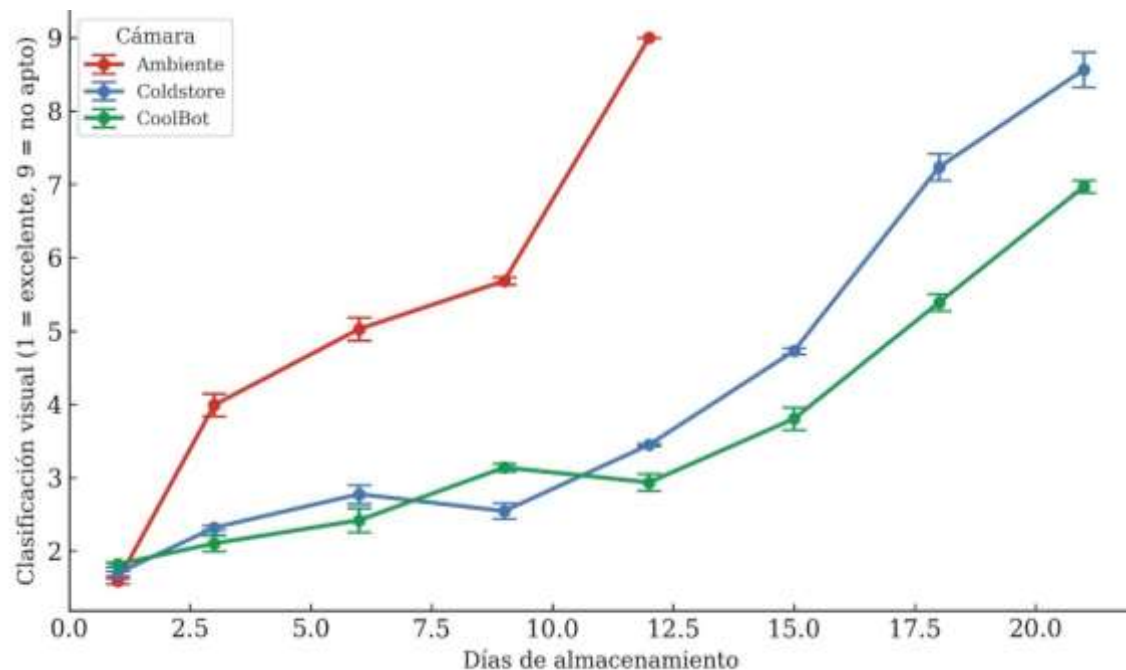
Los tomates iniciaron el almacenamiento al día 1 en condiciones de calidad visual muy similares, con valores promedio entre 1.6 y 1.8 en las tres cámaras (Figura 2). Sin embargo, para el día 3 ya se evidenció un deterioro temprano y claramente diferenciable en los frutos mantenidos en condiciones ambientales, cuya clasificación visual aumentó hasta 3.99 ± 0.15 , mientras que los frutos almacenados en las cámaras ColdStore y CoolBot® se mantuvieron con valores visuales de mejor calidad, (2.32 ± 0.03 y 2.10 ± 0.11 respectivamente).

En los días posteriores se observó una pérdida acelerada de calidad en los tomates almacenados en condiciones ambientales ya para el día 9, alcanzaron valores de 5.68 ± 0.05 , mostrando daños visibles y pérdida de turgencia, aunque aún dentro de los límites comerciales. No obstante, para el día 12, los frutos en condiciones ambientales ya habían perdido completamente su valor comercial, alcanzando valores de 9, lo que reflejó un deterioro severo y pérdida de aceptabilidad visual.

En contraste, los frutos almacenados en las cámaras de enfriamiento mantuvieron su calidad visual por más tiempo. En ColdStore, los tomates conservaron valores de calidad visual aceptables hasta el día 18, (7.23 ± 0.18), mientras que los frutos almacenados en la cámara CoolBot® mantuvieron una calidad superior incluso hasta el día 21, con valores de 6.97 ± 0.08 , evidenciando un deterioro más lento y una conservación prolongada de la calidad bajo estas condiciones de almacenamiento.

Figura 2

Evolución de clasificación visual en las cámaras a través de los días



Fuente: Elaborado por los autores, 2025

El uso del hipoclorito de sodio no mostró efecto en este parámetro, lo que concuerda con lo señalado por Gemida et al. (2023) y Mani et al. (2023), quienes encontraron que al usarlo como desinfectante no modifica características físicas o sensoriales del fruto, como color o firmeza, limitando su acción a la reducción de patógenos superficiales.

Por otro lado, los resultados del estudio coinciden con lo reportado por Li et al. (2025), quienes observaron que tomates almacenados a temperaturas de 4 a 14°C presentaron una mejor conservación de la calidad visual durante un periodo de evaluación de hasta 15 días, en comparación con aquellos almacenados a 24 °C, donde la pérdida de calidad visual fue más rápida, especialmente asociada a la disminución de la firmeza y al incremento de la deshidratación del fruto. De igual forma, Saltveit (2019), Al-Dairi y Pathare (2021) y Chen et al. (2020) destacan que temperaturas entre 10 y 12 °C reducen la tasa de respiración y retrasan el deterioro visual, lo que respalda el efecto observado en este estudio en la cámara Coolbot® y, en menor medida, en la cámara ColdStore.

Color (maduración)

El índice de color, evaluado con la escala Kader 2010, (Kader & Cantwell, 2010), mostró diferencias significativas para cámara y día ($p < 0.0001$) y en consecuencia la interacción entre ambos parámetros (Tabla 5).

Tabla 5. *Análisis de la Varianza para maduración*

Cuadro de Análisis de la Varianza Color (SC tipo I)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	6819.27	11	619.93	12.94	<0.0001
Cámara	1137.55	2	568.77	11.87	<0.0001
Tratamiento	7.41	2	3.70	0.08	0.9256
fecha	5674.31	7	810.62	16.92	<0.0001
Error	8480.49	177	47.91		
Total	15299.76	188			

Fuente: Elaborada por los autores, 2025

Los tomates de las tres cámaras iniciaron el almacenamiento con una coloración muy similar, con valores entre 2.39 y 2.61 en el día 1, correspondientes a un estado verde–pintón según la escala Kader (Figura 3). Para el día 3, se observó un cambio de color más acelerado de pintón a rosado, en los frutos almacenados en condiciones ambientales (3.97 ± 0.05) y en la cámara ColdStore (3.81 ± 0.12), mientras que los tomates almacenados en CoolBot® mostraron un avance mucho más lento, manteniéndose en 2.97 ± 0.02 , todavía dentro del rango verde–pintón.

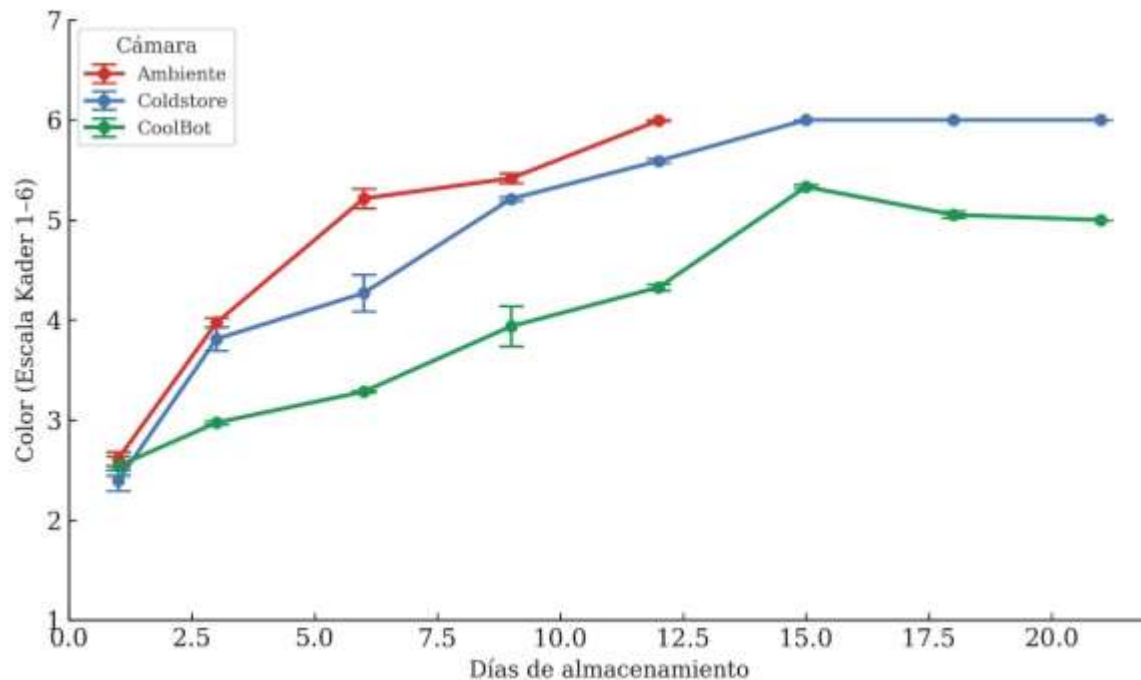
A partir de este punto, el desarrollo de color mostró tendencias claramente diferenciadas entre cámaras. En Ambiente, los frutos continuaron madurando rápidamente y para el día 9 alcanzaron 5.41 ± 0.05 , correspondientes a un color rojo avanzado; en cambio, los frutos en ColdStore presentaron un avance más moderado (5.21 ± 0.02), mientras que los de CoolBot® mantuvieron una maduración más lenta (3.94 ± 0.20), equivalente a un estado pintón–rosado.

Para el día 12, los frutos en Ambiente alcanzaron valores cercanos al máximo de la escala (5.99 ± 0.01), indicando sobremaduración, lo cual coincidió con la pérdida completa de la calidad visual descrita anteriormente y con su respectivo descarte. En contraste, ColdStore® mostró valores ligeramente inferiores (5.59 ± 0.02), mientras que CoolBot® mantuvo un desarrollo de color más controlado (4.32 ± 0.03), aún dentro de niveles aceptables de madurez.

En los días finales del almacenamiento, ambas cámaras de enfriamiento mantuvieron diferencias en la velocidad de cambio de color. ColdStore alcanzó valores máximos de 6.0 para el día 15, mientras que los frutos en CoolBot® conservaron valores más bajos (5.33 ± 0.02) para ese mismo día, evidenciando que esta cámara retardó de manera más efectiva la maduración y el avance del color, en concordancia con su mejor desempeño en la conservación de la calidad visual.

Figura 3

Evolución del color del tomate, de 1- Verde a 6- muy Rojo



Fuente: Elaborado por los autores, 2025

Estos resultados coinciden con lo descrito por Chen et al. (2020) y Li et al. (2025), quienes señalan que temperaturas cercanas a 12–15 °C reducen la síntesis de licopeno y retrasan la degradación de clorofilas, ralentizando el cambio de color y prolongando la vida de anaquel del tomate.

La ausencia de diferencias significativas entre frecuencias de inmersión en hipoclorito de sodio confirma que este desinfectante no influye en los procesos bioquímicos relacionados con la maduración y el cambio de color, limitando su acción a la reducción microbiana. (Al-Dairi & Pathare, 2021; Mani et al., 2023), esto reafirma que la temperatura de almacenamiento fue el factor determinante en el control de la evolución del color.

Firmeza

El parámetro de firmeza del fruto mostró variaciones significativas a lo largo del almacenamiento, con efectos principalmente significativos de Cámara ($p < 0.05$) por día ($p < 0.0001$) como se observa en la Tabla 6.

Tabla 6. *Análisis de la varianza para Firmeza del fruto (SC tipo I)*

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	139.41	11	12.67	74.70	<0.0001
Cámara	21.62	2	10.81	63.72	<0.0001
Tratamiento	0.88	2	0.44	2.59	0.0760
fecha	116.92	7	16.70	98.45	<0.0001
Error	77.36	456	0.17		
<u>Total</u>	<u>216.78</u>	<u>467</u>			

Fuente: Elaborada por los autores, 2025

En el análisis de las medias de las cámaras (Tabla 7), los valores fueron Coolbot® = 1.39 kg·cm⁻², ColdStore = 0.91 kg·cm⁻² y Ambiente = 0.36 kg·cm⁻². La prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) mostró que Coolbot® presentó firmezas significativamente mayores que ColdStore y Ambiente, y que ColdStore también superó significativamente a Ambiente. En conjunto, esto evidencia que el almacenamiento en Coolbot® y ColdStore retardó de manera efectiva el ablandamiento del fruto frente a las condiciones ambientales.

Tabla 7. *Comparación de medias – Firmeza (Tukey $\alpha=0.05$)*

<i>Error: 0.1697 gl: 456</i>					
<u>Cámara</u>	<u>Medias</u>	<u>n</u>	<u>E.E.</u>		
Coolbot®	1.39	198	0.03	A	
ColdStore	0.91	180	0.03		B
<u>Ambiente</u>	<u>0.36</u>	<u>90</u>	<u>0.05</u>		<u>C</u>

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Fuente: Elaborada por los autores, 2025

Como se puede observar en la Figura 4, los tomates iniciaron el almacenamiento con niveles de firmeza similares entre cámaras, con valores que oscilaron entre 1.68 y 1.99 kg·cm⁻² el día 1. No obstante, para el día 3, los frutos almacenados en condiciones ambientales presentaron una reducción marcada en firmeza (0.88 ± 0.05), mientras que los almacenados en ColdStore (1.70 ± 0.09) y CoolBot® (2.23 ± 0.15) conservaron valores superiores, evidenciando un ablandamiento más lento bajo condiciones de enfriamiento.

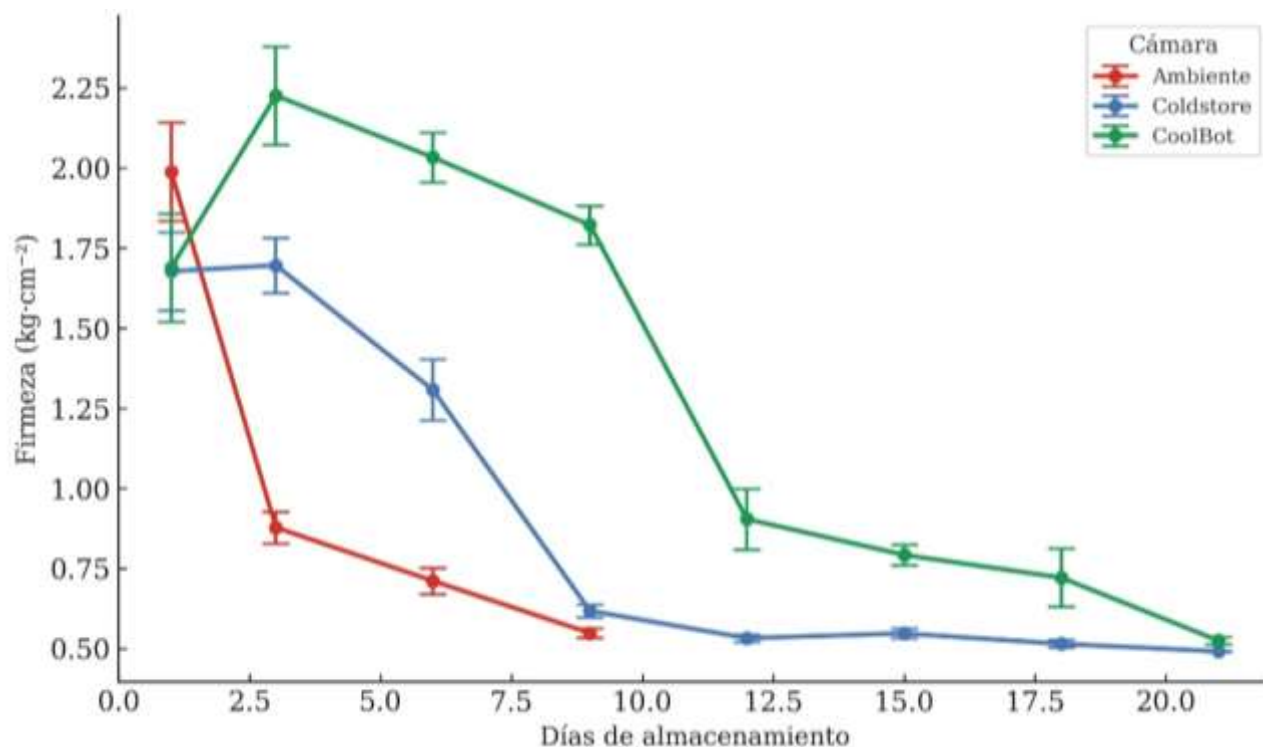
La pérdida de firmeza avanzó rápidamente en Ambiente, alcanzando valores de 0.55 ± 0.02 hacia el día 9, mientras que ColdStore mostró una disminución más gradual (0.62 ± 0.02) y CoolBot® mantuvo la mayor resistencia a la penetración (1.82 ± 0.06). Esta diferencia coincide con el avance más acelerado del estado de madurez y la pérdida de calidad visual observada en las cámaras.

En los días posteriores, la tendencia se mantuvo: los frutos en Ambiente perdieron casi por completo la firmeza hacia el día 12, mientras que ColdStore registró valores bajos pero estables (0.53 ± 0.01 al día 12 y

0.55 \pm 0.02 al día 15). Por su parte, CoolBot® conservó niveles superiores durante más tiempo (0.90 \pm 0.09 al día 12 y 0.79 \pm 0.03 al día 15), reflejando un ablandamiento más lento del tejido. Al día 21, CoolBot® aún presentó valores de 0.52 \pm 0.01, ligeramente superiores a los de ColdStore (0.49 \pm 0.01), lo que indica una mejor conservación de la firmeza bajo estas condiciones de almacenamiento.

Figura 4

Disminución del parámetro de firmeza en frutos analizados por cámara (medias)



Fuente: Elaborado por los autores, 2025

Estos resultados concuerdan con lo reportado por Li et al. (2025), quienes documentaron que el almacenamiento de tomate a 24 °C reduce la firmeza significativamente en comparación con temperaturas más bajas, y con Al-Gaadi et al. (2024) quienes observaron disminuciones más rápidas a 22 °C que a 12 °C. Lana et al. (2005) también describieron que el ablandamiento sigue una pérdida exponencial con base en la temperatura de almacenamiento, mientras que Kathimba et al. (2022) y Thole et al. (2021) afirman que temperaturas entre 4 °C y 16 °C preservan la textura y dureza del fruto por periodos más prolongados.

A nivel fisiológico, el enfriamiento reduce la actividad de enzimas asociadas a la degradación de la pared celular responsables del ablandamiento del fruto, lo que contribuye a retardar la pérdida de firmeza durante el almacenamiento (Li et al., 2025).

El tratamiento con hipoclorito de sodio no produjo diferencias significativas en firmeza, lo que coincide con Mani et al. (2023), quienes señalan que su función principal es el control de patógenos sin alterar propiedades fisicoquímicas del fruto cuando se aplica en concentraciones poscosecha recomendadas.

°Brix (Contenido de Sólidos- Grados Brix)

El análisis estadístico mostró que el contenido de sólidos totales, expresado en °Brix, presentó diferencias significativas entre cámaras de almacenamiento ($F = 14.31$; $p < 0.0001$) y entre los días (fechas) de evaluación ($F = 7.41$; $p < 0.0001$), mientras que no se detectaron diferencias por tratamiento de inmersión en hipoclorito de sodio ($p = 0.9849$), ni en la interacción cámara \times tratamiento, como se observa en la Tabla 8.

Tabla 8. *Análisis de varianza para sólidos totales (°Brix).*

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	10.71	11	0.97	7.32	<0.0001
Cámara	3.81	2	1.90	14.31	<0.0001
Tratamiento	4.0E-03	2	2.0E-03	0.02	0.9849
Día (fecha)	6.90	7	0.99	7.41	<0.0001
Error	60.68	456	0.13		
<u>Total</u>	<u>71.39</u>	<u>467</u>			

Fuente: Elaborada por los autores, 2025

Esto indica que la variación en °Brix estuvo determinada principalmente por el tipo de cámara y el tiempo de almacenamiento, el tratamiento con cloro no generó ninguna variación en este parámetro.

En cuanto al efecto del tipo de cámara, la prueba de Tukey (Tabla 9), indicó que Coolbot® (3.52 °Brix) mantuvo valores significativamente más altos que ColdStore (3.32 °Brix) y ambiente (3.39 °Brix), estas dos no presentan diferencias significativas entre sí. Esto sugiere que las condiciones de almacenamiento de Coolbot®, más estables y frías, permitieron conservar mejor el contenido de azúcares durante el almacenamiento de los frutos, reduciendo la tasa de respiración y el consumo de carbohidratos.

Tabla 9. *Comparación de medias de °Brix por cámara (Tukey $\alpha=0.05$)*

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.10302					
<i>Error: 0.1331 gl: 456</i>					
<u>Cámara</u>	<u>Medias</u>	<u>n</u>	<u>E.E.</u>		
Coolbot®	3.52	198	0.03	A	
Ambiente	3.39	90	0.04		B
<u>ColdStore</u>	<u>3.32</u>	<u>180</u>	<u>0.03</u>		<u>B</u>
<i>Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)</i>					

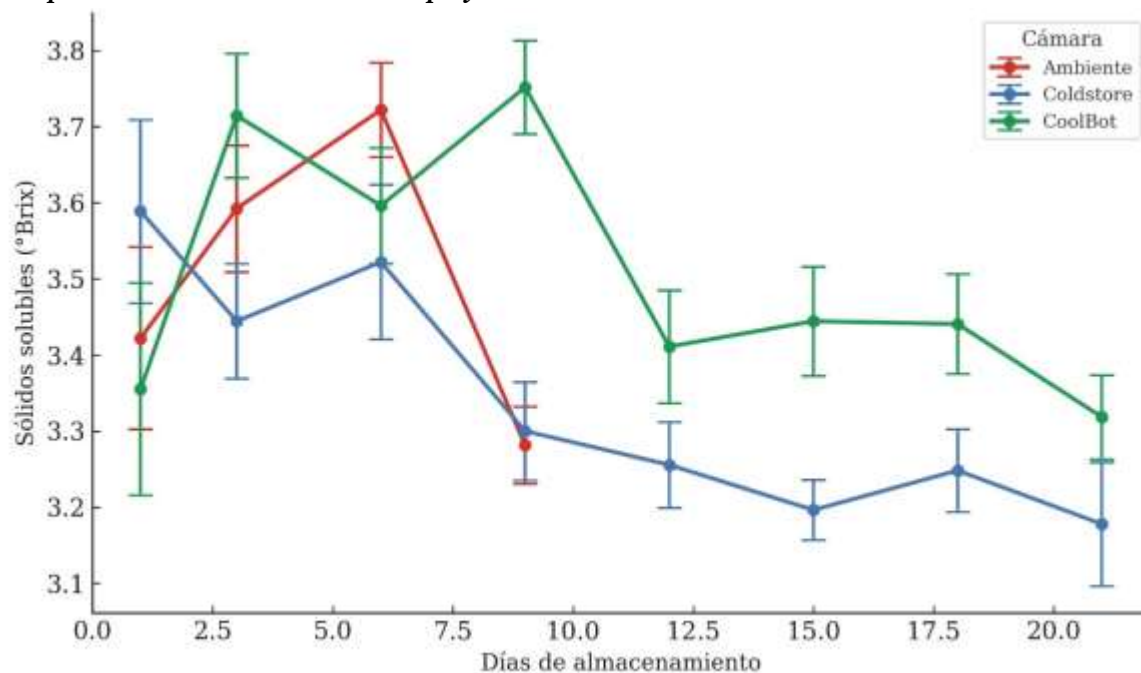
Fuente: Elaborada por los autores, 2025

Los tomates iniciaron el almacenamiento con valores de sólidos solubles muy similares entre cámaras, con concentraciones de 3.42 ± 0.12 °Brix en Ambiente, 3.59 ± 0.12 en ColdStore y 3.36 ± 0.14 en CoolBot® (Figura 5). Para el día 3, se registró un incremento moderado en las tres condiciones de almacenamiento, alcanzando 3.59 ± 0.08 en Ambiente, 3.44 ± 0.08 en ColdStore y 3.71 ± 0.08 en CoolBot®, reflejando el aumento natural de azúcares asociado al avance inicial de la madurez.

A partir del día 6, los tomates almacenados en Ambiente alcanzaron su valor máximo (3.72 ± 0.06), mientras que los frutos en ColdStore y CoolBot® presentaron valores ligeramente inferiores (3.52 ± 0.10 y 3.60 ± 0.08 respectivamente). Para el día 9, los frutos en Ambiente mostraron una ligera disminución a 3.28 ± 0.05 °Brix, coincidiendo con el estado de sobremaduración observado en esa condición de almacenamiento. En contraste, en las cámaras de enfriamiento, ColdStore registró 3.30 ± 0.06 y CoolBot® alcanzó su valor más alto (3.75 ± 0.06 °Brix).

En los días posteriores, se observó una disminución gradual en la cámara ColdStore, con valores entre 3.26 ± 0.06 y 3.18 ± 0.08 (día 12 a día 21 respectivamente). En cambio, los frutos en la cámara CoolBot® mantuvieron valores relativamente estables desde el día 12 hasta el día 18 (entre 3.41 y 3.44), seguido de un descenso leve hacia el día 21. Esta estabilidad prolongada concuerda con el avance más lento de la maduración y el retraso observado en los cambios de color bajo esta condición de almacenamiento.

Figura 5
Comportamiento de °Brix en el tiempo y en cada cámara



Fuente: Elaborado por los autores, 2025

Este comportamiento coincide con lo descrito por Li et al. (2025), quien indica que temperaturas moderadas (14 °C) reducen la respiración y el consumo de azúcares, prolongando la estabilidad del contenido de sólidos solubles en el tiempo. Saltveit (2019) también reporta que el almacenamiento en frío moderado retrasa la conversión de almidones y evita fluctuaciones en °Brix.

Por el contrario, temperaturas elevadas, como las del ambiente (>25 °C), aceleran el metabolismo y pueden incrementar temporalmente el contenido de sólidos por concentración, seguido de un rápido deterioro, tal como lo han reportado (Arah et al., 2016)

La ausencia de diferencias significativas por tratamiento de cloro confirma lo señalado por Mani et al. (2023), quienes concluyen que el hipoclorito de sodio en concentraciones de 50–200 ppm no altera los atributos fisicoquímicos, ejerciendo su acción principal en la reducción de la carga microbiana de los frutos.

Incidencia de enfermedades poscosecha

En la Tabla 10, se presenta la frecuencia de aislamiento de hongos y bacterias poscosecha identificados en los tomates. Se identificaron un total de 12 patógenos o géneros de microorganismos, con predominio de *Alternaria spp.*, *Erwinia spp.*, *Xanthomonas spp.*, *Colletotrichum spp.* y *Glomerella spp.*, patógenos de importancia por su presencia mayoritaria en pudriciones y manchas foliares y de frutos en tomate. La mayoría de los hongos se detectó en la cámara ColdStore, siendo *Alternaria spp.* y *Glomerella spp.* los que se identificaron con mayor incidencia (8 y 6 aislamientos respectivamente), seguidos de *Erwinia spp.* y *Xanthomonas spp.* (5 aislamientos cada uno). En Coolbot® se observó una menor frecuencia relativa de *Alternaria spp.* (4) y *Colletotrichum spp.* (2), pero una presencia importante de bacterias como *Erwinia spp.* y *Pseudomonas spp.* (5 y 4 aislamientos, respectivamente). En condiciones ambientales (AP) destacó la presencia de *Bacillus spp.* (4 aislamientos), *Colletotrichum spp.* (4) y *Xanthomonas spp.* (4), además de aislamientos de *Penicillium spp.* y *Rhizopus spp.*, asociados con pudriciones blandas y desarrollo rápido en ambientes de alta temperatura y humedad relativa.

Estos resultados sugieren que, aunque las cámaras de enfriamiento reducen la velocidad de deterioro, cada sistema presenta un perfil distinto de patógenos, influenciado por las condiciones internas de temperatura y humedad. En este sentido, *Alternaria spp.* y *Glomerella spp.* tienden a predominar en condiciones de humedad elevada y temperaturas moderadas, características de ColdStore (HR >90% y T≈23.06 °C), mientras que bacterias como *Pseudomonas spp.* se favorecen en ambientes fríos y húmedos como el de Coolbot®

Tabla 10. Patógenos identificados según tipo de almacenamiento

Microorganismo	Ambiente (AP)	Coolbot® (CB)	ColdStore (CT)
<i>Alternaria spp</i>	1	4	8
<i>Aspergillus spp</i>	0	1	0
<i>Bacillus spp</i>	4	1	0

Cladosporium spp	0	3	2
Colletotrichum spp	4	2	4
Erwinia spp	1	5	5
Glomerella spp	0	4	6
Penicillium spp	2	1	1
Phoma spp	0	0	1
Pseudomonas spp	0	4	0
Rhizopus spp	2	3	1
Xanthomonas spp	4	2	5

Fuente: Elaborada por los autores, 2025

Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Bartz et al. (2020) y Pico Poma et al. (2023), quienes indican que la interacción entre temperatura y humedad relativa en almacenamiento poscosecha es determinante para el desarrollo diferencial de patógenos, y que la reducción de temperatura, aunque limita la proliferación de ciertos hongos, no elimina completamente el riesgo de infecciones bacterianas.

Efectividad del hipoclorito de sodio como desinfectante (comparación entre frecuencias de inmersión)

Para evaluar el efecto de la inmersión de los frutos en hipoclorito de sodio como desinfectante y su efecto sobre la incidencia de microorganismos, se analizaron las frecuencias observadas bajo cada uno de los tres tratamientos (sin cloro, cloro cada 3 días y cloro cada 5 días). Las frecuencias observadas para cada microorganismo se presentan en la Tabla 11, donde se evidencia que la distribución general de patógenos fue similar entre los tres tratamientos.

Tabla 11. Tabla de Frecuencias observadas de microorganismos según tratamiento

<u>Microorganismo</u>	<u>Tr1</u>	<u>Tr2</u>	<u>Tr3</u>	<u>Total</u>
Alternaria spp	4	5	2	11
Cladosporium spp	2	0	2	4
Colletotrichum spp	2	4	2	8
Erwinia spp	3	2	5	10
Glomerella spp	4	4	2	10
Penicillium spp	0	1	0	1
Phoma spp	0	0	1	1
Rhizopus spp	0	0	3	3
Xanthomonas spp	3	5	2	10
Total	18	21	19	58

Fuente: Elaborada por los autores, 2025

A partir de estas frecuencias se calcularon las frecuencias esperadas bajo el supuesto de independencia entre tratamiento y tipo de microorganismo. Estas frecuencias esperadas se muestran en la Tabla 12, constituyendo la base para el análisis de efectividad del hipoclorito de sodio mediante la prueba de Chi-cuadrado.

Tabla 12. *Tabla de Frecuencias esperadas bajo el modelo de independencia*

Microorganismo	Tr1	Tr2	Tr3	Total
Alternaria spp	3.41	3.98	3.60	11.00
Cladosporium spp	1.24	1.45	1.31	4.00
Colletotrichum spp	2.48	2.90	2.62	8.00
Erwinia spp	3.10	3.62	3.28	10.00
Glomerella spp	3.10	3.62	3.28	10.00
Penicillium spp	0.31	0.36	0.33	1.00
Phoma spp	0.31	0.36	0.33	1.00
Rhizopus spp	0.93	1.09	0.98	3.00
Xanthomonas spp	3.10	3.62	3.28	10.00
<u>Total</u>	<u>18.00</u>	<u>21.00</u>	<u>19.00</u>	<u>58.00</u>

Fuente: Elaborada por los autores, 2025

Los valores obtenidos mediante la prueba de χ^2 de Pearson $\chi^2 = 17.44$; $p = 0.3577$ y χ^2 de verosimilitud (G^2) = 19.94; $p = 0.2230$, indican que los tratamientos no mostraron diferencias estadísticas entre sí (Tabla 13). Asimismo, con la prueba de Cochran-Mantel-Haenszel, al considerar las cámaras como factor de estratificación ($\chi^2 = 7.79$; $p = 0.9548$), tampoco se detectaron diferencias estadísticas entre tratamientos (Tabla 14).

Tabla 13. *Evaluación de chi cuadrado para incidencia de patógenos según tratamientos*

Estadístico	Valor	gl	p
Chi Cuadrado Pearson	17.44	16	0.3577
Chi Cuadrado MV- G^2	19.94	16	0.2230
Coef.Conting.Cramer	0.32		
Coef.Conting.Pearson	0.48		

Tabla 14. *Prueba de Cochran-Mantel-Haenszel, para factor cámara.*

Estadísticos corregidos por efecto de estrato			
Prueba de Cochran-Mantel-Haenszel			
Estadístico	gl	p	
7.79	16	0.9548	

Fuente: Elaboradas por los autores, 2025

Estos valores indican que los microorganismos encontrados (hongos y bacterias) se mantuvieron muy parecidos entre cámaras y tratamientos y que las diferencias observadas podrían deberse al azar. Estos datos coinciden con lo reportado por Gu et al. (2023), quienes observaron que los sanitizantes como el cloro, ayudan a reducir la cantidad total de microorganismos desde un inicio y no siempre logran cambiar las especies que predominan a lo largo del almacenamiento, sobre todo si las condiciones como temperatura y humedad relativa favorecen que algunos patógenos se mantengan activos.

No obstante, diversos estudios han demostrado que la efectividad del cloro como desinfectante poscosecha se incrementa cuando se integra con otras estrategias de manejo, como el control de temperatura, humedad relativa y condiciones de almacenamiento, más que cuando se emplea de forma aislada (Gil et al., 2015).

Aunque los lavados con sanitizantes clorados reducen la carga microbiana inicial, algunos patógenos pueden sobrevivir y reorganizarse durante el almacenamiento en función de las condiciones ambientales, sin que el sanitizante por sí solo determine la dinámica de las poblaciones microbianas (Gu et al., 2023).

En conjunto, estos resultados sugieren que el cloro, bajo las condiciones del presente estudio, no fue suficiente para modificar la dinámica de los patógenos, y que su mayor efectividad depende de su integración dentro de un manejo poscosecha combinado con control ambiental y buenas prácticas de manejo.

Descarte de Frutos por cámara

El análisis de varianza para el porcentaje de frutos descartados (tabla 15), mostró diferencias altamente significativas entre cámaras de almacenamiento ($F = 11.87$; $p < 0.0001$) y entre las fechas de evaluación ($F = 16.92$; $p < 0.0001$), mientras que no se detectaron diferencias significativas entre las frecuencias de inmersión en hipoclorito de sodio ($F = 0.08$; $p = 0.9256$). Esto indica que el descarte estuvo determinado principalmente por las condiciones de almacenamiento y por el avance del tiempo, pero no por el tratamiento desinfectante.

Tabla 15. *Análisis de varianza para descarte de frutos.*

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)					
<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	6819.27	11	619.93	12.94	<0.0001
Cámara	1137.55	2	568.77	11.87	<0.0001
Tratamiento	7.41	2	3.70	0.08	0.9256
fecha	5674.31	7	810.62	16.92	<0.0001
Error	8480.49	177	47.91		
<u>Total</u>	<u>15299.76</u>	<u>188</u>			

Fuente: Elaborada por los autores, 2025

Según la prueba de separación de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$) el almacenamiento en condiciones ambientales registró el porcentaje de descarte de frutos más alto con un 10.08 %, mientras que la cámara ColdStore 3.44 % y CoolBot 1.51 % (Tabla 16), sin diferencias significativas entre sí. Estos resultados confirman el efecto positivo de ambas cámaras en la reducción de pérdidas poscosecha en comparación con el almacenamiento ambiental.

Tabla 16. Prueba de Separación de medias para el descarte de frutos por la variable cámara

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=2.96629					
Error: 47.9124 gl: 177					
Cámara	Medias	n	E.E.		
Ambiente	10.08	45	1.12	A	
Coldstore	3.44	72	0.82		B
CoolBot	1.51	72	0.82		B
Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)					
Fuente: Elaborada por los autores, 2025					

Los valores de descarte observados en cada cámara reflejan una marcada relación entre las condiciones de almacenamiento y los procesos fisiológicos y microbiológicos que determinan el deterioro del fruto del tomate durante la poscosecha.

El valor más alto registrado en almacenamiento bajo condiciones ambientales (10.08 %) es consistente con el efecto acelerado que generan las temperaturas elevadas y las fluctuaciones térmicas sobre la respiración, la pérdida de turgencia y la susceptibilidad de los tejidos vegetales a los patógenos (Kader, 2002).

Esto coincide con lo reportado por Saltveit (2019), quien señala que temperaturas elevadas incrementan la respiración y la degradación de tejidos en tomate.

En cambio, los datos observados en las cámaras de enfriamiento Coolbot® (1.51%) y ColdStore (3.44 %), coinciden con reportes en literatura reciente, donde indican que la refrigeración moderada y la estabilidad térmica retrasan los procesos metabólicos asociados al ablandamiento y reducen la incidencia de pudriciones al limitar el crecimiento de microorganismos oportunistas (Kathimba et al., 2022; Kefas et al., 2024).

Asimismo, la ausencia de diferencias significativas entre las frecuencias de inmersión en hipoclorito de sodio confirma lo señalado por Gil et al. (2015) y Gu et al. (2023), quienes documentaron que los desinfectantes reducen la carga microbiana superficial, pero su efecto sobre el deterioro final del fruto depende principalmente de las condiciones del almacenamiento post cosecha.

Estos resultados resaltan que la eficiencia en la conservación del tomate estuvo determinada principalmente por el tipo de almacenamiento y no directamente por el desinfectante aplicado, lo que explica la marcada reducción de descartes en ambas cámaras respecto al ambiente.

Costos de instalación y operatividad de las cámaras

En cuanto a la operatividad de las cámaras evaluadas, se pueden observar en la Tabla 17, donde se presenta una comparativa de los costos de instalación y operatividad de las cámaras, donde la cámara Coolbot® requiere una inversión inicial aproximada de L 98,586, mientras que la cámara ColdStore puede construirse

con materiales locales con un costo aproximado de L 7,200, según datos reportados y evaluaciones previas en estudios realizados en Zamorano (Díaz Rubio, 2017; Avecillas Ureña, 2015).

Tabla 17. Costos de instalación y operatividad de las cámaras de enfriamiento Coolbot® y ColdStore en Zamorano, Honduras

Parámetro	Coolbot®	ColdStore
Costo de instalación (Lempiras)	≈ L 98,586 (Díaz Rubio, 2017)	≈ L 7,200 (Avecillas Ureña, 2015)
Consumo energético estimado	1,170 – 1,365 kWh/mes	0 kWh/mes
Costo operativo mensual (Lempiras)	L 6,100 – 7,120 (con tarifa vigente de L 5.2146/kWh; CREE, 2025)	No requiere mantenimiento mensual
Ciclo de trabajo del aire acondicionado	Compresor activo ≈ 39–46 % del tiempo (Dato técnico)	No aplica
Temperatura promedio interna (°C)	≈ 15 °C	≈ 23.06 °C
Desempeño poscosecha	Mayor firmeza, menor incidencia de enfermedades, prolonga vida de anaquel	Conservación intermedia, mejor que ambiente pero inferior al Coolbot®

Fuente: Elaborada por los autores, 2025

En lo referente a la operatividad, el aire acondicionado de 220 V, doble fase, 9.4 A por fase, que constituye el núcleo de la Coolbot®, operó con un patrón de encendido/apagado equivalente a 39-46 % del tiempo, lo que permitió estimar un consumo de 39.0–45.5 kWh, equivalente a 1,170 – 1,365 kWh mensual y que bajo la tarifa vigente de la ENEE-CREE de L 5.2146/kWh (CREE, 2025), este rango equivale a un gasto mensual de L 6,100–7,120, mientras que la cámara ColdStore no genera costos eléctricos al funcionar por enfriamiento evaporativo.

Los resultados experimentales mostraron que la Coolbot® mantuvo temperaturas promedio cercanas a 15 °C, preservando con mayor eficacia la firmeza y reduciendo la incidencia de enfermedades, en contraste con la ColdStore, que operó alrededor de 23.06 °C, con un efecto intermedio de conservación.

Estos resultados concuerdan con reportes académicos y estudios aplicados, los cuales indican que las cámaras equipadas con tecnología CoolBot® pueden alcanzar y mantener rangos de temperatura de refrigeración similares a los de cuartos fríos convencionales, permitiendo condiciones térmicas adecuadas para el almacenamiento poscosecha de productos hortícolas (Díaz Rubio, 2017; Majubwa et al., 2021).

De igual manera, Majubwa et al. (2021), Manyoo et al. (2018) y Ambuko et al. (2017), demostraron que tecnologías evaporativas como la cámara ColdStore logran reducir pérdidas de peso y mantener la calidad visual de tomates en comparación con el almacenamiento ambiente, aunque sin alcanzar la eficiencia de tecnologías activas de refrigeración.

A partir de estos resultados y de la evidencia bibliográfica, se infiere que, aunque la cámara ColdStore constituye una alternativa de bajo costo para pequeños productores en entornos rurales, la cámara Coolbot® ofrece ventajas más consistentes en la preservación de la calidad y extensión de la vida de anaquel del tomate, lo que justifica su adopción en sistemas productivos de mediana y gran escala, donde los mayores costos de instalación y operatividad pueden ser compensados por los beneficios económicos derivados de la reducción de pérdidas poscosecha y el acceso a mercados con mayores exigencias de calidad.

Conclusiones

El estudio demostró que las cámaras de enfriamiento CoolBot® y ColdStore prolongan de manera efectiva la vida de anaquel del tomate en condiciones tropicales. CoolBot® mantuvo las temperaturas internas más bajas y conservó la firmeza y la calidad visual de los frutos hasta el día 21 de almacenamiento, mientras que ColdStore preservó calidad comercial hasta el día 15, superando ampliamente al almacenamiento en ambiente, que se volvió no apto entre los días 9 y 12.

Aunque las inmersiones en hipoclorito de sodio no generaron diferencias estadísticas en la incidencia de patógenos, en conjunto con las cámaras contribuyeron a reducir el descarte por pudriciones, destacándose CoolBot® (1.51 %) y ColdStore (3.44 %) frente al ambiente (10.08 %). Esto refuerza que el control térmico es el factor determinante para la extensión de la vida útil, mientras que la desinfección actúa como un complemento funcional más que como un factor principal.

En síntesis, la combinación de enfriamiento y desinfección periódica permitió mantener la calidad comercial y reducir pérdidas poscosecha, validando la hipótesis planteada y ofreciendo una estrategia adaptable y viable para pequeños y medianos productores en regiones tropicales. La adopción de tecnologías accesibles como CoolBot® y ColdStore brinda una alternativa eficiente para mejorar la conservación, la competitividad y la sostenibilidad del sistema hortícola regional.

Finalmente, estos resultados abren oportunidades de investigación para evaluar la aplicación de estas tecnologías en otros cultivos hortícolas de alta susceptibilidad, ampliando su potencial impacto en la reducción de pérdidas alimentarias y la sostenibilidad agroindustrial.

Contribución de Autoría CRediT

En el presente estudio, todos los autores contribuyeron de manera equitativa en todas las etapas de la investigación. La conceptualización del estudio, el diseño de la metodología, la implementación del software, la validación de los resultados y el análisis formal fueron desarrollados en conjunto. No obstante, en la etapa de manejo del experimento, la recolección, análisis de datos y la gestión de recursos, estuvo a cargo del autor, Ricardo José Menjivar Polanco. La redacción del borrador original, así como la revisión y edición del manuscrito, fueron realizadas colaborativamente. Además, la supervisión y la administración del proyecto fueron llevadas a cabo de manera conjunta, asegurando la adecuada ejecución y finalización del estudio.

Declaración de intereses contrapuestos

Los autores declaran que no tienen intereses financieros en conflicto, ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

Declaratoria de uso de inteligencia artificial

Los autores declaran que utilizaron la herramienta de inteligencia artificial *ChatGPT* (OpenAI, 2024) exclusivamente como apoyo para mejorar la redacción del manuscrito, sin intervenir en el análisis de datos, interpretación científica, diseño experimental, ni en la generación de contenido académico original. Su uso fue necesario para optimizar la claridad, coherencia y precisión lingüística del texto, manteniendo la estructura científica requerida y garantizando una presentación más eficiente de los hallazgos del estudio. Todo el contenido científico, así como las decisiones metodológicas, analíticas e interpretativas, fueron elaborados exclusivamente por los autores, quienes verificaron, corrigieron y validaron manualmente cada fragmento del texto ajustado con IA.

Disponibilidad de datos

Los conjuntos de datos generados y/o analizados durante el estudio actual están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

Agradecimientos y financiamiento

Los autores expresan su sincero agradecimiento a la Dra. Noemí del Carmen Obregón, docente de la Universidad Nacional Francisco Luis Espinoza Pineda, por su valioso acompañamiento académico, orientación metodológica y asesoría científica brindada durante el desarrollo de la tesis de maestría que dio origen al presente artículo. Sus aportes y experiencia contribuyeron significativamente al fortalecimiento del rigor científico y la calidad de la investigación. Asimismo, se declara que este estudio no recibió ninguna subvención específica de ninguna agencia de financiación del sector público, comercial o sin fines de lucro.

Referencias

- Al-Dairi, M., & Pathare, P. (2021). Effect of Storage Conditions on Postharvest Quality of Tomatoes: A Case Study at Market-Level. *Journal of Agricultural and Marine Sciences*. https://doi.org/https://www.researchgate.net/publication/347948199_Effect_of_Storage_Conditions_on_Postharvest_Quality_of_Tomatoes_A_Case_Study_at_Market-Level
- Al-Gaadi, K. A., Z., A. M., T., E., A. A., M, A. K., R, M., & Edrris, M. K. (2024). Impact of Storage Conditions on Fruit Color, Firmness and Total Soluble Solids of Hydroponic Tomatoes Grown at Different Salinity Levels. *Applied Sciences*, 14(14), 6315. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app14146315>
- Ambuko, J., Karithi, M., Hutchinson, M., Owino, W., Wasilwa, L., & Hansen, B. (2017). The Coolbot™: a low-cost cold storage alternative for smallholders in developing countries. *The 1st All Africa Post Harvest Congress & Exhibition, Reducing food losses and waste: sustainable solutions for Africa, 28th-31st March 2017, Nairobi, Kenya. Conference Proceedings*. Nairobi, Kenya.: Department of Plant Science & Crop Protection, University of Nairobi. <https://doi.org/https://doi.org/10.5539/jfr.v7n5p7>
- Arah, I. K., Ahorbo, G. K., Anku, E. K., Kumah, E., & Amaglo, H. (2016). Postharvest Handling Practices

- and Treatment Methods for Tomato Handlers in Developing Countries: A Mini Review. *Advances in Agricultura*(6436945). <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2016/6436945>
- Avecillas Ureña, L. C. (2015). *Análisis comparativo de dos tecnologías de enfriamiento evaporativo cero energía, dirigido a pequeños productores hortofrutícolas*. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. <https://doi.org/https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/26c8cbdc-eeeb-408e-99dd-2b0703b25c67/content>
- Bartz , J., Vallad, G., & Sargent, S. (2020). Guide to Identifying and Controlling Postharvest Tomato Diseases in Florida. *HS866/HS131*, rev 9/2020. *EDIS*, 2020(5). <https://doi.org/https://doi.org/10.32473/edis-hs131-2020>
- Chen, L., Pan, Y., Li, H., Liu, Z., Jia, X., Li, W., . . . Li, X. (2020). Constant temperature during postharvest storage delays fruit ripening and enhances the antioxidant capacity of mature green tomato. *Journal of Food Science*, 44(11), 14831. <https://doi.org/https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jfpp.14831>
- CREE, C. R. (2025). *RESUMEN INFORME DE AJUSTE TARIFARIO TERCER TRIMESTRE 2025*. Gobierno de Honduras. Recuperado. Gobierno de Honduras. Recuperado: <https://www.cree.gob.hn/informe-trimestral-de-tarifas/>
- Díaz Rubio, S. (2017). *Estudio costo-beneficio de la utilización del cuarto frío con tecnología Cool Bot en el almacenamiento de chile morrón (Capsicum annuum) en Zamorano, Honduras*. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/26c8cbdc-eeeb-408e-99dd-2b0703b25c67/content>
- FAO. (2019). *The State of Food and Agriculture. Moving forward on food loss and waste reduction*. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/11f9288f-dc78-4171-8d02-92235b8d7dc7/content>
- Gemida, J., Ardeña, R., & Pillones, C. (2023). Shelf life of tomato in different post-harvest treatments. *International Research Journal of Science, Technology, Education, and Management*, 3(2), 41-29. <https://doi.org/https://doi.org/10.5281/zenodo.8139508>
- Ghebreyesus, M., Shishay, B., Arefaine, A., Abraham, M., Gebrehiwet, R., Ahmad, J., & Naqvi, D. (2024). Designing and fabrication of evaporative cooler for enhancing tomato shelf life. *Journal of Eco-Friendly Agriculture*, 19(2), 464-470. <https://doi.org/https://doi.org/10.48165/jefa.2024.19.02.38>
- Gil, M., Selma, M., Suslow, T., Jacxsens, L., Uyttendaele, M., & Allende, A. (2015). Pre- and Postharvest Preventive Measures and Intervention Strategies to Control Microbial Food Safety Hazards of Fresh Leafy Vegetables. *Food Science and Nutrition*, 55, 453-468. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/10408398.2012.657808>
- Gu, G., Zhou, B., Mendes Oliverira, G., Redding, M., Luo, Y., Millner, P., & Nou, X. (2023). Impact of sanitizer application on Salmonella mitigation and microbiome shift on diced tomato during washing and storage. *Postharvest Biology and Technology*, 198(112268). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112268>
- Horticulture Innovation Lab. (2025). *CoolBot Cold Storage for Small-Scale Farms*. University of California, Davis. <https://horticulture.ucdavis.edu/coolbot>
- Kader, A. A. (2002). *Postharvest Technology of Horticultural Crops*. University of California Agriculture

- p>and Natural Resources.
-
- https://books.google.hn/books/about/Postharvest_Technology_of_Horticultural.html?id=O1zhx2OWftQC&redir_esc=y
- Kader, A., & Cantwell, M. (2010). *Produce Quality Rating Scales & Color Charts (2nd ed.)*. University of California, Agriculture and Natural Resources.
- Kathimba, F. K., Kimani, P. M., Narla, R. D., & Kiirika, L. M. (2022). Effect of storage temperature on fruit firmness and weight loss of nine tomato lines. *African Journal of Plant Science*, 16(10), 276-284. <https://doi.org/https://academicjournals.org/journal/AJPS/article-full-text-pdf/79AAA1E70042>
- Kefas Bwade, E., Aliyu, B., & Tashiwa, Y. I. (2024). Tomato postharvest loss: A five-year comprehensive review of treatments, optimization, and environmental influences. *Systematic Literature Review and Meta-Analysis Journal*, 5(3), 1-16. <https://doi.org/https://doi.org/10.54480/slr-m.v5i3.69>
- Lana, M., Tijskens, L., & O.van Kooten. (2005). Effects of storage temperature and fruit ripening on firmness of fresh cut tomatoes. *Postharvest Biology and Technology*, 35(1), 87-95. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2004.07.001>
- Li, X., Huang, H., Zhang, L., & Zhao, L. (2025). Effect of Postharvest Storage Temperature and Duration on Tomato Fruit Quality. *Foods*, 6(14), 1002. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/foods14061002>
- Majubwa, R., Msogoya, T., Mtui, H., & Shango, A. (2021). CoolBot Coldroom Technology Enhance Postharvest Quality and Shelf-life of Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Fruits. *Tanzania Journal of Agricultural Sciences*, 11-21. <https://www.ajol.info/index.php/tjags/article/view/234414/221416>
- Mani, V. P., Abdul-Rahaman, A., Nimbare, A. C., Buonamwen, Y. I., Musah, K., Abdul-Wahab, S., & Ghulam, K. (2023). Effects of postharvest dipping of sodium hypochlorite and hydro-cooling on the quality of 'Petomech' tomato fruits. *Journal of Postharvest Technology*, 11(4), 37-48. <https://jpht.in/MenuScriptFile/e438e558-4a70-4839-a866-358589abcc0f.pdf>
- Manyoo, F., Ambuko, J., Hutchinson, M., & Kamanula, J. (2018). Effectiveness of evaporative cooling technologies to preserve the postharvest quality of tomato. *International Journal of Agronomy and Agricultural Research (IJAAR)*, 13(2), 114-127. https://doi.org/https://www.researchgate.net/publication/337167417_Effectiveness_of_evaporative_cooling_technologies_to_preserve_the_postharvest_quality_of_tomato_International_Journal_of_Agronomy_and_Agricultural_Research_IJAAR
- Mishra, V., Abrol Shyam, G., & Dubey, N. (2018). *Sodium and Calcium Hypochlorite as Postharvest Disinfectants for Fruits and Vegetables*. Department of Post Harvest Technology, College of Horticulture, Banda University of Agriculture & Technology, Banda, India. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812698-1.00014-5>
- Nkolisa, N., Magwaza, L. S., Workneh, T. S., & Chimphango, A. (2018). Evaluating evaporative cooling system as an energy- free and cost- effective method for postharvest storage of tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) for smallholder farmers. *Scientia Horticulturae*, 241(0304-4238), 131-143. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.06.079>
- OpenAI. (2024). *ChatGPT (versión GPT-5.1)*. OpenAI: <https://www.openai.com/chatgpt>
- Pico Poma, J. P., Saravia Guevara, D. A., Rentería Chimbo, A. E., & Landivar Valverde, M. D. (2023). El manejo postcosecha de hortalizas para determinar su incidencia en la conservación. *Revista Electrónica Multidisciplinaria de Ciencias Básicas, Ingeniería y Arquitectura*, 5(8), 120-135.

https://doi.org/https://www.researchgate.net/publication/370801146_El_manejo_postcosecha_de_hortalizas_para_determinar_su_incidencia_en_la_conservacion_Post-harvest_handling_of_vegetables_to_determine_their_impact_on_conservation

- Saltveit, M. E. (2019). Respiratory Metabolism. En E. M. Yahia, *Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables* (págs. 73-91). Woodhead Publishing. <https://books.google.hn/books?id=lMlaDwAAQBAJ&printsec=copyright&hl=es#v=onepage&q&f=false>
- Sibanda, S., & Workneh, T. S. (2019). Effects of indirect air cooling combined with direct evaporative cooling on the quality of stored tomato fruit. *CYTA – Journal of Food*, 17(1), 603-612. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/19476337.2019.1622595>
- Thole, V., Vain, P., & Martin, C. (2021). Effect of Elevated Temperature on Tomato Post-Harvest Properties. *Plants (Basel)*, 1(10), 2359. <https://doi.org/10.3390/plants10112359>