UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Uso de luz UV-C en mango “Tommy Atkins” y su efecto en los atributos de calidad e inocuidad: Estudio matemático basado en CFD

Alba Mery Garzón García

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Administración
Departamento de Ingeniería
Palmira, Colombia

Diciembre, 2021

Uso de luz UV-C en mango “Tommy Atkins” y su efecto en los atributos de calidad e inocuidad: Estudio matemático basado en CFD

Alba Mery Garzón García

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:

Doctora en Ciencia y Tecnología de Alimentos

Director:

MSc. y Ph.D. Saúl Dussán Sarria

Codirectores

MSc. y Ph.D. José Igor Hleap Zapata
MSc. y Ph.D. Saúl Ruíz Cruz

Línea de Investigación:

Procesamiento agroindustrial de productos de origen biológico

Grupo de Investigación:

Manejo y agroindustrialización de productos de origen biológico

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería y Administración

Departamento de Ingeniería

Palmira, Colombia

Diciembre, 2021

A mi abuela Mery, quien no pudo presenciar el final de este proceso.

A mi familia por apoyarme incondicionalmente.

Agradecimientos

Agradezco a los profesores Saúl Dussán Sarria, José Igor Hleap Zapata y Saúl Ruíz Cruz por guiarme en el desarrollo de esta tesis, a la Universidad Nacional de Colombia – Sede Palmira por mi formación académica y al Sistema de Becas para Estudiantes de Posgrado por brindarme los fondos para realizar mis estudios de doctorado.

Siento mucha gratitud con la Universidad de Sonora (UNISON) y el Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos (DIPA) por mantenerme las puertas abiertas. Doy las gracias especialmente a los doctores Enrique Márquez, Carmen Del Toro y José Rogelio Ramos, por brindarme su apoyo.

También quiero agradecerle al profesor Hugo Lobatón por los conocimientos que me compartió para desarrollar las simulaciones con la dinámica de fluidos computacional.

Finalmente, agradezco a los amigos que estuvieron en los tiempos difíciles y a mi familia por su valioso apoyo, cariño y comprensión.

Resumen

El mango es una fruta de alto nivel nutricional y potencial para el procesamiento mínimo. Sin embargo, este proceso puede acelerar su de deterioro y contaminación microbiana. Por esto, es necesario aplicar una tecnología que ayude a preservar los atributos de calidad e inocuidad durante el almacenamiento. En el primer capítulo, se validó la dinámica de fluidos computacional (CFD) y el modelo de radiación de ordenadas discretas (DO) como herramienta para la simulación de una cámara de desinfección para el tratamiento con luz ultravioleta de onda corta (UV-C). Con la información obtenida de la simulación, se efectuó el modelamiento de las cinéticas de inactivación *in vitro* de suspensiones de los patógenos *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella enterica* serovar Typhimurium y *Listeria monocytogenes* en términos de dosis de UV-C. En el segundo capítulo, se realizó la integración de CFD con los parámetros cinéticos con el fin de pronosticar dosis de UV-C para inactivar los patógenos inoculados en el mango 'Tommy Atkins' mínimamente procesado, y calcular una dosis óptima mediante el promedio de los tiempos de tratamiento. En el tercer capítulo, se evaluó el efecto de la dosis óptima de 6 kJ/m^2 en los atributos de calidad del mango mínimamente procesado almacenado por 12 días a 5 °C. Los resultados mostraron que la aplicación de esta dosis permitió asegurar la inocuidad y preservar la mayoría de los atributos de calidad del mango 'Tommy Atkins' mínimamente procesado. Se concluyó que el uso de la CFD en integración con las cinéticas de inactivación es prometedor para la estimación de tratamientos con UV-C en mango mínimamente procesado y podría ser usado en otros productos hortofrutícolas.

Palabras clave: Dinámica de fluidos computacional, Microbiología predictiva, Parámetros cinéticos, Procesamiento mínimo, Atributos de calidad

Abstract

Mango is a highly nutritional fruit with potential for minimal processing. However, this process can accelerate its deterioration and microbial contamination. Therefore, it is necessary to apply a technology that helps to preserve quality and safety attributes during storage. In the first chapter, the computational fluid dynamics (CFD) and the discrete ordinate (DO) radiation model were validated as a tool for the simulation of a disinfection chamber for treatment with short-wave ultraviolet light (UV-C). With the information obtained from the simulation, in vitro inactivation kinetics of suspensions of the pathogens *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella enterica* serovar Typhimurium, and *Listeria monocytogenes* were modeled in terms of UV-C dose. In the second chapter, the integration of CFD with the kinetic parameters was performed to predict UV-C doses to inactivate each of these pathogens inoculated in fresh-cut 'Tommy Atkins' mango and to calculate an optimal dose by averaging of treatment times. In the third chapter, the effect of the optimal dose of 6 kJ/m^2 on the quality attributes of fresh-cut 'Tommy Atkins' mango stored for 12 days at 5 ° C was evaluated. The results showed that the application of this dose ensured safety and preserve most of the quality attributes of fresh-cut mango. It was concluded that the use of CFD in integration with inactivation kinetics is promising for estimating UV-C treatments in fresh-cut mango and could be used in other horticultural products.

Keywords: Computational fluid dynamics, Predictive microbiology, Kinetic parameters, fresh-cut, Quality attributes

Contenido

Pág.

Introducción 1

Planteamiento del problema 5

Hipótesis 9

Justificación 11

Estado del arte 13

Marco teórico 25

Objetivos 39

Capítulo 1: Estudio de la inactivación *in vitro* de microorganismos patógenos 41

Capítulo 2: Determinación de la dosis óptima de luz UV-C mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) y su efecto sobre la carga microbiana *in vivo* 65

Capítulo 3: Estudio del efecto de la dosis óptima de luz UV-C en la calidad del mango 83

Anexo A: Análisis de varianza de dos vías para evaluar el efecto de los tratamientos de desinfección y el tiempo de almacenamiento en los análisis experimentales .. 167

Anexo B: Análisis de vida útil sensorial 175

Referencias 179

Lista de figuras

Pág.

Figura 0-1: Línea de tiempo de la aplicación de luz UV-C en la agroindustria alimentaria. 14
Figura 0-2: Métodos para la determinación de la dosis óptima de luz UV-C en productos hortofrutícolas. 17
Figura 0-3: Ventajas, métodos y factores de la dinámica de fluidos computacional (CFD) para simular la desinfección de productos hortofrutícolas con luz UV-C. 21
Figura 0-4: Pared interna opaca. 26
Figura 0-5: Pared interna semitransparente. 27
Figura 0-6: Normatividad vigente para la inocuidad alimentaria. 31
Figura 1-1: Cámara de desinfección. 45
Figura 1-2: Vista lateral del ajuste dentro de la cámara de desinfección para el tratamiento con UV-C de las suspensiones bacterianas. 46
Figura 1-3: Geometría (a) y mallado (b) de la cámara de desinfección. 48
Figura 1-4: Cámara de desinfección durante el postprocesamiento de la simulación con el plano circular para el cálculo de la intensidad de radiación promedio en la parte superior de las suspensiones bacterianas 50
Figura 1-5: Intensidad de radiación experimental y simulada en puntos verticales (a) y horizontales (b) dentro de la cámara de desinfección para la validación del modelo de radiación de ordenadas discretas 51
Figura 1-6: Comportamiento de la población de *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium y *L. monocytogenes* durante el tratamiento con UV-C. Las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado. Las distintas letras en minúscula en las barras indican diferencias significativas entre las medias en la población microbiana (Tukey, α= 0,05). 53
Figura 1-7: Curva de supervivencia en función de la dosis UV-C de *E. coli* O157:H7 (a), *S.* Typhimurium (b) y *L. monocytogenes* (c) ajustada a la ecuación logarítmica lineal y al modelo de Weibull (líneas punteadas). Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado. 56
Figura 2-1: Geometría de la cámara de desinfección con los trozos de mango. Vista isométrica (a), frontal (b) y lateral (c). 69
Figura 2-2: Mallado de la cámara de desinfección con los trozos de mango. Vista externa (a) e interna (b). 70
Figura 2-3: Isocontorno de la intensidad de radiación incidente en los trozos de mango ubicados en la cámara de desinfección. Vista superior (a), frontal (b) e inferior (c). 74

Figura 3-1: Flujograma del procesamiento mínimo de mango con la aplicación de tratamientos de desinfección. 88
Figura 3-2: Espectro visible de absorción del estándar de β-caroteno en etanol absoluto. 92
Figura 3-3: Evolución de los valores de pH del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el almacenamiento refrigerado. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado. 100
Figura 3-4: Gráficas factoriales para pH. Gráfica de efectos principales (a) y gráfica de interacción (b). 101
Figura 3-5: Evolución del contenido de sólidos solubles del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el tiempo de almacenamiento. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado. 102
Figura 3-6: Gráficas factoriales para sólidos solubles. Gráfica de efectos principales (a) y gráfica de interacción (b). 103
Figura 3-7: Evolución de los valores de acidez titulable del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el almacenamiento refrigerado. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado. 104
Figura 3-8: Gráficas factoriales para acidez titulable. Gráfica de efectos principales (a) y gráfica de interacción (b). 105
Figura 3-9: Evolución de los Índices de madurez del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el tiempo de almacenamiento. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado. 106
Figura 3-10: Gráficas factoriales para índice de maduración. Gráfica de efectos principales (a) y gráfica de interacción (b). 107
Figura 3-11: Evolución de los valores de firmeza del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el almacenamiento refrigerado. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado. 108
Figura 3-12: Gráficas factoriales para firmeza. Gráfica de efectos principales (a) y gráfica de interacción (b). 109
Figura 3-13: Porcentaje de pérdida de peso acumulado del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el tiempo de almacenamiento. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado. 110
Figura 3-14: Evolución de los valores de la coordenada L* del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el tiempo de almacenamiento. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado. 112
Figura 3-15: Gráficas factoriales para L*. Gráfica de efectos principales (a) y gráfica de interacción (b). 113

Figura 3-16: Evolución de los valores de la coordenada a* del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el almacenamiento refrigerado. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado. 114
Figura 3-17: Gráficas factoriales para a*. Gráfica de efectos principales (a) y gráfica de interacción (b). 115
Figura 3-18: Evolución de los valores de la coordenada b* del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el almacenamiento refrigerado. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado. 116
Figura 3-19: Gráficas factoriales para b*. Gráfica de efectos principales (a) y gráfica de interacción (b). 117
Figura 3-20: Cambios en los valores de cromaticidad (C*) del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el almacenamiento refrigerado. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado. 118
Figura 3-21: Gráficas factoriales para C*. Gráfica de efectos principales (a) y gráfica de interacción (b). 119
Figura 3-22: Cambios en los valores de tonalidad (h*) del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el almacenamiento refrigerado. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado. 119
Figura 3-23: Gráficas factoriales para h*. Gráfica de efectos principales (a) y gráfica de interacción (b). 120
Figura 3-24: Evolución de la población de mesófilos del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el almacenamiento refrigerado. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado. 124
Figura 3-25: Gráficas factoriales para mesófilos. Gráfica de efectos principales (a) y gráfica de interacción (b). 125
Figura 3-26: Evolución de la población de coliformes totales del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el almacenamiento refrigerado. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado. 126
Figura 3-27: Gráficas factoriales para coliformes totales. Gráfica de efectos principales (a) y gráfica de interacción (b). 127
Figura 3-28: Población de mohos y levaduras del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el tiempo de almacenamiento. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado. 128
Figura 3-29: Gráficas factoriales para mohos y levaduras. Gráfica de efectos principales (a) y gráfica de interacción (b). 129

Figura 3-30: Evolución de la población de psicrófilos del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el almacenamiento refrigerado. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado. 130
Figura 3-31: Gráficas factoriales para psicrófilos. Gráfica de efectos principales (a) y gráfica de interacción (b). 131
Figura 3-32: Cambios en el contenido de carotenoides totales del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el almacenamiento refrigerado. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado. 136
Figura 3-33: Gráficas factoriales para carotenoides totales. Gráfica de efectos principales (a) y gráfica de interacción (b). 137
Figura 3-34: Cambios en el contenido de fenoles totales del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el almacenamiento refrigerado. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado. 139
Figura 3-35: Gráficas factoriales para fenoles totales. Gráfica de efectos principales (a) y gráfica de interacción (b). 140
Figura 3-36: Cambios en el contenido de flavonoides del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el almacenamiento refrigerado. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado. 141
Figura 3-37: Gráficas factoriales para flavonoides. Gráfica de efectos principales (a) y gráfica de interacción (b). 142
Figura 3-38: Evolución de la capacidad antioxidante por DPPH del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el almacenamiento refrigerado. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado. 144
Figura 3-39: Gráficas factoriales para capacidad antioxidante por DPPH. Gráfica de efectos principales (a) y gráfica de interacción (b). 145
Figura 3-40: Evolución de la capacidad antioxidante por ABTS del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el almacenamiento refrigerado. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado. 146
Figura 3-41: Gráficas factoriales para capacidad antioxidante por ABTS. Gráfica de efectos principales (a) y gráfica de interacción (b). 147
Figura 3-42: Evolución de la capacidad antioxidante por FRAP del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el almacenamiento refrigerado. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado. 148
Figura 3-43: Gráficas factoriales para capacidad antioxidante por FRAP. Gráfica de efectos principales (a) y gráfica de interacción (b). 149
Figura 3-44: Efecto de los distintos tratamientos de desinfección y del tiempo de almacenamiento del mango mínimamente procesado sobre el grado de satisfacción del

consumidor en su apariencia global. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado. 151
Figura B-1: Prueba de bondad de ajuste Anderson-Darling para los datos de la función de riesgo acumulado obtenidos a partir de las calificaciones del mango mínimamente procesado del tratamiento C almacenado en refrigeración por 12 días. 175
Figura B-2: . Regresión exponencial de la distribución de Weibull para el análisis de vida útil sensorial del mango mínimamente procesado del tratamiento C. 176
Figura B-3: Prueba de bondad de ajuste Anderson-Darling para los datos de la función de riesgo acumulado obtenidos a partir de las calificaciones del mango mínimamente procesado del tratamiento H almacenado en refrigeración por 12 días. 176
Figura B-4: . Regresión exponencial de la distribución de Weibull para el análisis de vida útil sensorial del mango mínimamente procesado del tratamiento H. 177
Figura B-5: Prueba de bondad de ajuste Anderson-Darling para los datos de la función de riesgo acumulado obtenidos a partir de las calificaciones del mango mínimamente procesado del tratamiento UV almacenado en refrigeración por 12 días..... 177
Figura B-6: . Regresión exponencial de la distribución de Weibull para el análisis de vida útil sensorial del mango mínimamente procesado del tratamiento UV. 178

Lista de tablas

Pág.

Tabla 0-1: Beneficios de la aplicación de diferentes dosis de luz UV-C en productos hortofrutícolas..... 15
Tabla 0-2: Requisitos microbiológicos para los alimentos mínimamente procesados (NTC 6005). 32
Tabla 0-3: Requisitos microbiológicos de pulpa de fruta sin tratamiento térmico congelada o no (Resolución 3929 de 2013). 32
Tabla 0-4: Descripción morfológica del fruto del mango de variedad “Tommy Atkins”. 34
Tabla 1-1: Parámetros de ajuste y cinéticos de los modelos de inactivación *in vitro* de *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium y *L*. *monocytogenes* en función de la dosis UV-C (0 kJ/m^2 - 6,028 kJ/m^2). 55
Tabla 1-2: Modelos de inactivación *in vitro* de *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium y *L*. *monocytogenes* en función de la dosis UV-C (0 kJ/m^2 - 6,028 kJ/m^2)..... 58
Tabla 2-1: Parámetros de las condiciones de frontera y del dominio computacional para la simulación. 70
Tabla 2-2: Parámetros para el cálculo de los tiempos de tratamiento con UV-C de los trozos de mango y la inactivación de *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium y *L. monocytogenes.*... 71
Tabla 2-3: Comparación de la reducción experimental y teórica de los patógenos en los trozos de mango y error porcentual medio absoluto (MAPE) en el pronóstico de las reducciones cuando aplicada luz UV-C como mecanismo de desinfección. 76
Tabla 3-1: Escala hedónica de 9 puntos utilizada para la evaluación sensorial. 94
Tabla 3-2: Condiciones de desinfección estudiadas en mango 'Tommy Atkins' mínimamente procesado. 96
Tabla 3-3: Propiedades fisicoquímicas, firmeza y color superficial del mango entero..... 98
Tabla 3-4: Valores de las propiedades fisicoquímicas de mango mínimamente procesado variedad ‘Tommy Atkins’. 99
Tabla 3-5: Resultados del diseño para los parámetros de color. 111
Tabla 3-6: Cambios de la diferencia total de color del mango mínimamente procesado generados por el tratamiento de desinfección y el tiempo de almacenamiento. 121
Tabla 3-7: Resultados de los análisis microbiológicos en mango mínimamente procesado tratado con diferentes alternativas de desinfección. 123

Tabla 3-8: Parámetros de ajuste y cinéticos de los modelos de inactivación de los microorganismos nativos del mango mínimamente procesado sometido a los distintos tratamientos de desinfección.....133
Tabla 3-9: Resultados del diseño para carotenoides totales y RAE.....134
Tabla 3-10: Resultados del diseño para fenoles totales y flavonoides.....138
Tabla 3-11: Resultados del diseño para capacidad antioxidante 143
Tabla 3-12: Coeficiente de correlación entre carotenoides totales, fenoles totales, flavonoides y las pruebas de capacidad antioxidante.....150
Tabla 3-13: Tiempos de vida útil sensorial estimados para el mango mínimamente procesado tratado con diferentes alternativas de desinfección. 153
Tabla A-1: Análisis de varianza de dos vías para pH.....167
Tabla A-2: Análisis de varianza de dos vías para sólidos solubles. 167
Tabla A-3: Análisis de varianza de dos vías para acidez titulable.....168
Tabla A-4: Análisis de varianza de dos vías para índice de maduración.....168
Tabla A-5: Análisis de varianza de dos vías para firmeza.....168
Tabla A-6: Análisis de varianza de dos vías para L*.....169
Tabla A-7: Análisis de varianza de dos vías para a*.....169
Tabla A-8: Análisis de varianza de dos vías para b*.....169
Tabla A-9: Análisis de varianza de dos vías para C*. 170
Tabla A-10: Análisis de varianza de dos vías para h*.....170
Tabla A-11: Análisis de varianza de dos vías para mesófilos. 170
Tabla A-12: Análisis de varianza de dos vías para coliformes totales.....171
Tabla A-13: Análisis de varianza de dos vías para mohos y levaduras.....171
Tabla A-14: Análisis de varianza de dos vías para psicrófilos.....171
Tabla A-15: Análisis de varianza de dos vías para carotenoides totales.....172
Tabla A-16: Análisis de varianza de dos vías para fenoles totales.....172
Tabla A-17: Análisis de varianza de dos vías para flavonoides. 172
Tabla A-18: Análisis de varianza de dos vías para capacidad antioxidante por DPPH. 173
Tabla A-19: Análisis de varianza de dos vías para capacidad antioxidante por ABTS. .173
Tabla A-20: Análisis de varianza de dos vías para capacidad antioxidante por FRAP. .173
Tabla B-1: Análisis de varianza de dos vías para grado de satisfacción.....175

Introducción

Los productos hortofrutícolas son fuentes importantes de nutrientes y compuestos que promueven la salud, pero son perecederos. Estos pueden contaminarse con diferentes microorganismos durante la producción, cosecha, poscosecha, procesamiento, almacenamiento, distribución, venta y consumo final (Harris et al., 2011; Pinela & Ferreira, 2017). En los últimos años, ha aumentado el número de enfermedades transmitidas por los alimentos (ETA) relacionados con el consumo de alimentos de origen vegetal debido a las malas prácticas agrícolas, como el uso de agua no tratada y de desechos biológicos sólidos, y una higiene inadecuada en las instalaciones donde se desarrollan las diferentes etapas ya mencionadas (Puig-Peña et al., 2002). Los patógenos más frecuentemente vinculados a los brotes en frutas son *Escherichia coli*, *Salmonella* spp. y *Listeria* spp. (Pinela & Ferreira, 2017). En consecuencia, es importante garantizar la inocuidad de productos hortofrutícolas mediante el uso de una desinfección adecuada durante una operación control en la poscosecha.

Por lo general, para efectuar la desinfección se emplean sistemas de limpieza a base de compuestos clorados, en gran medida el hipoclorito de sodio (NaClO), debido a su bajo costo y porque al agregarse en agua se disocia parcialmente en ácido hipocloroso y actúa como componente activo antimicrobiano (Silveira et al., 2008). Sin embargo, la desventaja radica en que la reposición continua del cloro en el agua puede promover la formación de compuestos halogenados carcinogénicos y la contaminación de afluentes (Gil et al., 2009). Por consiguiente, se han propuesto tratamientos alternativos con ozono, agua electrolizada, peróxido de hidrógeno, plasma frío, pulsos de luz y la radiación ultravioleta (Ali et al., 2018; Pinela & Ferreira, 2017).

La luz ultravioleta de onda corta (UV-C) es un tipo de radiación no ionizante emitida por lámparas con mercurio y comprende longitudes de onda de 100 a 280 nm (Shama, 2005). Se ha reportado que la irradiación UV-C de frutas y hortalizas conduce a la estimulación de la defensa de los tejidos vegetales a través de la acumulación de fenilpropanoides, el

retraso de la senescencia, la preservación de la calidad y la mejora de la vida útil (Gutiérrez et al., 2016; Nigro & Ippolito, 2016). Sin embargo, se ha reportado que las altas dosis de UV-C o la exposición continua a la radiación provoca pérdida de vitamina C, oscurecimiento, fotorreactivación microbiana y enzimática (Quintero-Cerón et al., 2013). La aplicación de UV-C depende de factores como el material a tratar, los microorganismos a reducir y las condiciones de operación, incluyendo la distancia entre el material vegetal y la lámpara (Millán-Villarroel et al., 2015). Todo lo anterior influye directamente en la dosis, la cual se considera como la cantidad de energía suministrada en términos de intensidad de radiación durante un cierto tiempo (Shama, 2007). Distintas investigaciones han determinado este parámetro mediante mediciones dentro del equipo, la rotación del producto, las películas radiocrómicas, la dosimetría y recientemente, la dinámica de fluidos computacional (CFD) (Ho, 2009; Obande et al., 2011; Taze & Unluturk, 2018).

La dinámica de fluidos computacional es una herramienta de simulación aplicada en la industria alimentaria para el diseño y optimización de operaciones y equipos (Norton & Sun, 2010). La adopción de CFD fomenta la reducción de costos y tiempo asociados con la experimentación. Asimismo, permite resolver ecuaciones de conservación de masa, momento y energía mediante métodos numéricos para hacer predicciones (Anandharamakrishnan, 2013; Norton & Sun, 2006). El análisis con CFD consta de tres etapas: preprocesamiento, procesamiento y postprocesamiento. En el preprocesamiento, se considera el problema de flujo y se delimita el sistema. La segunda etapa implica el uso de una computadora para resolver ecuaciones matemáticas de fluido después del sistema de malla, que es equivalente a dividir el sistema en las celdas para resolver ecuaciones. Finalmente, durante el postprocesamiento, los datos generados se evalúan numérica y gráficamente (Xia & Sun, 2002). Koutchma et al. (2009) mencionaron que los modelos de radiación pueden ser resueltos con CFD, y es factible evaluar la distribución de intensidad de radiación para la operación de desinfección. El modelo de radiación de ordenadas discretas (DO) se ha empleado para describir la inactivación de los mohos *Cladosporium cladosporiodes* y *Penicillium digitatum* causantes del deterioro durante la poscosecha (Trivittayasil et al., 2015), analizar la distribución de la intensidad de radiación UV-C y la inactivación de mohos en las fresas (Trivittayasil et al., 2016), y reportar la distribución de dosis de UV-C y la inactivación de moho en fresas en un sistema transportador (Tanaka et al., 2016).

Conociendo las ventajas y avances del uso de CFD y correspondiendo al uso de técnicas informáticas y numéricas innovadoras, el objetivo de esta investigación fue evaluar la desinfección con luz UV-C del mango de variedad 'Tommy Atkins' mínimamente procesado mediante simulaciones fundamentadas en CFD. En una primera fase se realizó la cinética de inactivación *in vitro* de tres microorganismos patógenos humanos (*Salmonella enterica* serovariedad Typhimurium, *E. coli* O157:H7 y *Listeria monocytogenes*) por la aplicación de distintas dosis con luz UV-C. Subsecuentemente, se determinó la dosis óptima de luz UV-C para la desinfección del mango mínimamente procesado, mediante la integración de las cinéticas de inactivación de los microorganismos patógenos y las simulaciones con CFD. Finalmente, se identificó el efecto de la dosis óptima en los frutos mediante análisis fisicoquímicos, microbiológicos, bioquímicos y sensoriales.

Planteamiento del problema

El proceso de desinfección es una operación de control durante la poscosecha de productos hortofrutícolas en la que se aplican tratamientos físicos y químicos para reducir la población de microorganismos patógenos y causantes de la pudrición. Generalmente, los tratamientos químicos comprenden el uso de clorados (hipoclorito de sodio y dióxido de cloro), ácido peracético, peróxido de hidrógeno, ozono y agua electrolizada (Pinela & Ferreira, 2017; Silveira et al., 2008). No obstante, la eficacia de estos compuestos químicos depende del tipo de tratamiento, los microorganismos objetivo, las características de la superficie, el tiempo de exposición, el pH, la temperatura y la concentración (Parish et al., 2003). Algunos compuestos a base de cloro son percibidos negativamente por los consumidores porque son peligrosos para la salud humana y el medio ambiente. Consecuentemente, se han propuesto métodos físicos no térmicos como la radiación ionizante, la luz pulsada (PL), el plasma frío (CP) y la radiación ultravioleta (UV) (Pinela & Ferreira, 2017).

Los tratamientos con luz UV-C para la desinfección de productos hortofrutícolas se relacionan directamente con la dosis, es decir, con la cantidad de energía en forma de radiación aplicada en la superficie de un material vegetal durante el tiempo de tratamiento. En la literatura se ha reportado que las dosis bajas o los tiempos cortos de irradiación conllevan al desarrollo de efectos horméticos y a la reducción de la carga microbiana. Mientras que las dosis altas o exposición continua generan la pérdida de calidad, así como la disminución de la vida útil y la reactivación de los microrganismos (Quintero-Cerón et al., 2013; Rivera-Pastrana et al., 2007). Existen pocas técnicas que permiten estimar la dosis óptima de luz UV-C para la desinfección de productos hortofrutícolas. Estas son de índole experimental o emplean las películas radiocrómicas, conocimientos de microbiología y modelos matemáticos, y la dinámica de fluidos computacional (CFD). Las técnicas experimentales consisten en evaluar diferentes configuraciones del equipo y la exposición de distintos lados de los frutos por medio de la rotación manual (Stevens et al.,

2005). No obstante, pueden generar gran incertidumbre a la hora de analizar la uniformidad de la radiación o al tener como objetivo la inactivación de microorganismos patógenos, pues en los estudios reportados sólo se enfocaron en la reducción de microorganismos causantes de pudrición. En contraste, las películas radiocrómicas resultaron ser una herramienta útil para investigar la uniformidad de las dosis de luz UV-C en la superficie de las manzanas (Yan et al., 2017), pero sus inconvenientes radican en el alto costo y la difícil adquisición de los equipos y elementos necesarios para el desarrollo de las pruebas. En cuanto a las técnicas que comprenden conocimientos de microbiología y los modelos matemáticos, se caracterizaron por ser eficaces en la determinación de la dosis e intensidad de radiación, aunque no se podrían generalizar del todo, ya que sólo se han probado con sólidos que tienen la forma de un producto hortofrutícola y no sus propiedades (Obande & Shama, 2011). Finalmente, se destaca la dinámica de fluidos computacional (CFD) porque las simulaciones se realizan de manera rápida en un ordenador con un entorno real, en donde se tienen las propiedades de los elementos de la geometría y se pueden usar modelos validables a nivel experimental (Hu, 2012; Sandia National Laboratories, 2007).

En algunas investigaciones con CFD se ha efectuado el modelamiento de la inactivación *in vitro* por aplicación de luz UV-C de los microorganismos *Penicillium digitatum* y *Cladosporium cladosporioides*, los cuales son causantes de pudrición en la poscosecha (Trivittayasil et al., 2015). También se han desarrollado simulaciones para analizar la distribución de la intensidad de radiación y la inactivación de los microorganismos previamente mencionados en fresa, articulando las cinéticas de inactivación con simulaciones hechas con el modelo de radiación de ordenadas discretas (DO) para predecir las dosis de luz UV-C, y teniendo en cuenta la orientación de los frutos en la que la intensidad de radiación incide de forma más homogénea en toda su superficie (Trivittayasil et al., 2016). Cabe resaltar que los estudios se enfocaron en conocer teóricamente el mejor tratamiento para reducir los microorganismos que causan pérdidas poscosecha en fresa, pero no fueron validados experimentalmente, faltando el reporte de los efectos fisiológicos, bioquímicos y microbiológicos que posiblemente puedan generarse en los frutos.

Por lo tanto, en la desinfección poscosecha de un fruto potencial como el mango, el cual tiene una naturaleza climatérica y es altamente susceptible a la contaminación cruzada

durante su cadena agroindustrial, se nota importante la integración de componentes tanto teóricos como experimentales para estimar un tratamiento con luz UV-C que reduzca los microorganismos causantes de enfermedades transmitidas por los alimentos (ETA), y a su vez extienda su vida útil y mantenga sus propiedades nutrimentales. Con lo expuesto previamente, se establece como pregunta objeto de investigación: ¿En qué medida el uso de CFD es válido para estimar la dosis óptima de luz UV-C que inactive de forma segura los microrganismos patógenos *in vitro* e *in vivo* y que proporcione las mejores características fisicoquímicas, bioquímicas y vida útil del mango '*Tommy Atkins'* mínimamente procesado?

Hipótesis

Considerando que este es un trabajo de investigación cuantitativo experimental, partiendo de la pregunta de investigación se formulan las siguientes hipótesis para cada capítulo de la tesis.

Capítulo 1: Estudio de la inactivación *in vitro* de microorganismos patógenos

H0: La aplicación *in vitro* de dosis de luz UV-C comprendidas entre 0 y 25 kJ/m^2 no logra reducir hasta 3 unidades logarítmicas la población de *Salmonella enterica*, *Listeria monocytogenes* y *Escherichia coli* O157:H7.

H1: La aplicación *in vitro* de dosis de luz UV-C comprendidas entre 0 y 25 kJ/m^2 logra reducir hasta 3 unidades logarítmicas la población de *Salmonella enterica*, *Listeria monocytogenes* y *Escherichia coli* O157:H7.

Capítulo 2: Determinación de la dosis óptima de luz UV-C mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) y su efecto sobre la carga microbiana *in vivo*

H0: La dosis óptima de luz UV-C para la desinfección superficial del mango ‘Tommy Atkins’ mínimamente procesado no se puede determinar mediante la integración de las cinéticas de inactivación de los microorganismos patógenos y las simulaciones con CFD.

H1: La dosis óptima de luz UV-C para la desinfección superficial del mango ‘Tommy Atkins’ mínimamente procesado se puede determinar mediante la integración de las cinéticas de inactivación de los microorganismos patógenos y las simulaciones con CFD.

Capítulo 3: Estudio del efecto de las dosis óptimas de luz UV-C en la calidad del mango

H0: El tratamiento del mango ‘Tommy Atkins’ mínimamente procesado con la dosis óptima de luz UV-C no genera la reducción de los microorganismos nativos ni la conservación de las propiedades fisicoquímicas, funcionales y sensoriales en el fruto durante su almacenamiento.

H1: El tratamiento del mango ‘Tommy Atkins’ mínimamente procesado con la dosis óptima de luz UV-C genera la reducción de los microorganismos nativos y la conservación de las propiedades fisicoquímicas, funcionales y sensoriales en el fruto durante su almacenamiento.

Justificación

La desinfección de frutas y hortalizas es una operación esencial en el manejo poscosecha (Feliziani et al., 2016). Por consecuente, se requiere el uso de tecnologías emergentes para mantener la calidad e inhibir el crecimiento microbiano no deseado en todos los pasos de la cadena de producción y distribución a medida que los microorganismos se adaptan a los métodos de control previamente efectivos (Allende et al., 2006). La investigación de dichas tecnologías se ha centrado principalmente en el diseño del proceso, las características de los productos hortofrutícolas y la cinética de la inactivación microbiana, pero su desarrollo también depende de analizar en detalle las respuestas de los productos hortofrutícolas al estrés generado por la desinfección (Artés & Allende, 2014).

La aplicación de luz UV-C es una de las tecnologías emergentes propuestas en la agroindustria para la desinfección poscosecha, ya que además de disminuir la carga microbiana, puede dar un valor agregado al inducir la producción de compuestos como fitoalexinas, y retrasar procesos de maduración y senescencia (Rivera-Pastrana et al., 2007). En consecuencia, es importante determinar la dosis óptima para tratar cualquier producto hortofrutícola, ya que su composición difiere (Guerrero-Beltrán & Barbosa-Cánovas, 2004). En el caso del mango de variedad 'Tommy Atkins', hay que reconocer que es una fruta altamente perecedera, de elevado consumo en Colombia y el mundo por sus características sensoriales y funcionales, pues posee un alto contenido de compuestos antioxidantes, β-caroteno y vitaminas A y C (de Morais et al., 2003; Dussán-Sarria, Torres-León, & Reyes-Calvache, 2014).

A nivel de proceso, es esencial que toda la superficie de un producto hortofrutícola se irradien, por lo que tanto la dosis de aplicación de luz UV-C como su distribución homogénea tienen efectos críticos en la desinfección (Sastry et al., 2000). Según Guerrero-Beltrán & Barbosa-Cánovas (2004), la técnica más consistente para controlar la dosis de radiación es la biodosimetría, la cual consiste en evaluar tanto de forma teórica como

experimental el comportamiento de respuesta de las esporas no patogénicas a la radiación en sólidos semejantes a los productos hortofrutícolas (Obande & Shama, 2011). Sin embargo, recientemente los estudios desarrollados por Trivittayasil et al. (2015) y Trivittayasil, Tanaka, & Uchino (2016) destacan el uso de la dinámica de fluidos computacional (CFD) para pronosticar un tratamiento óptimo para la reducción de los microorganismos causante de la pudrición en fresas.

Los vínculos entre la CFD y los procesos asociados con la agroindustria son profundos, pues se utilizan regularmente para mejorar la calidad, la inocuidad y extender la vida útil de los productos alimenticios de forma eficiente (Norton & Sun, 2007). Mediante CFD se efectúan simulaciones en un ordenador con un entorno real, en donde se tienen las propiedades de los elementos de la geometría del sistema y se pueden usar modelos validables a nivel experimental (Sandia National Laboratories, 2007; Xia & Sun, 2002). Esto conlleva a la disminución del uso de materia prima, materiales, reactivos y tiempo de experimentación (Norton & Sun, 2010). Además, es posible crear y probar nuevas configuraciones de los equipos para optimizar operaciones como la desinfección a nivel piloto e industrial (Tanaka et al., 2016).

De esta forma, al considerarse la desinfección con luz UV-C de productos hortofrutícolas como una operación alternativa ante el uso de agentes químicos contaminantes y una tecnología emergente, se hace necesario estudiar los factores que gobiernan su operación. Por ende, se emplea la CFD como herramienta innovadora para describir el funcionamiento de un sistema de desinfección mediante la simulación de la distribución de la intensidad de la luz UV-C en la superficie vegetal, y para el modelamiento matemático de la inactivación de los microorganismos patógenos para el ser humano en conjunto con la microbiología predictiva. Al contrastar la información derivada de dicha integración con pruebas experimentales, es posible estimar una dosis óptima para el tratamiento con UV-C del mango mínimamente procesado que asegure la inocuidad y mantenga su calidad.

Estado del arte

Efectos de la aplicación de agentes químicos en la desinfección de frutas en la agroindustria

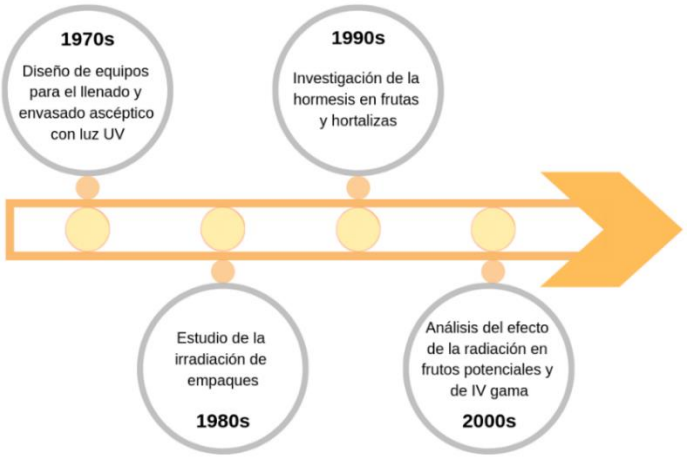
La desinfección poscosecha de los productos hortofrutícolas es una operación que permite disminuir la carga bacteriana patógena y de deterioro, lo cual conlleva a una reducción de más del 50 % de pérdidas en materia prima (Feliziani et al., 2016). De acuerdo con de Siqueira-Oliveira et al. (2018) y Gil et al. (2015), el cloro es el principal agente aplicado por aspersión, inmersión o en canales para la desinfección de los productos de origen vegetal y superficies de procesamiento, ya que es eficaz para un amplio espectro de microorganismos, económico y de fácil adquisición. No obstante, su uso en soluciones acuosas provoca la liberación de compuestos cancerígenos como trihalometanos y ácido haloacético al reaccionar con la materia orgánica del agua (Ali et al., 2018). También se generan altas tasas de consumo de agua y descargas de agua residuales, lo que aumenta los riesgos asociados con la reutilización del agua y el costo para el reacondicionamiento del agua (Gil et al., 2015).

En consecuencia, existen métodos de desinfección poscosecha alternativos que se han implementado para el desarrollo de tecnologías económicamente viables, seguras, ecológicas, que en su mayoría dan un valor agregado al prolongar la vida útil de los productos hortofrutícolas (Ali et al., 2018). Las tecnologías emergentes se dividen en la aplicación de tratamientos químicos con compuestos como el ozono, agua electrolizada y peróxido de hidrógeno, y de tratamientos físicos principalmente con diferentes sistemas de empaque, radiación ionizante, radiación ultravioleta (UV), luz pulsada (PL), ultrasonido de alta potencia (US), plasma frío (CP), alta presión hidrostática (HHP) y dióxido de carbono en fase densa (DP-CO_2) (Pinela & Ferreira, 2017).

Aplicación de la luz UV-C en la agroindustria alimentaria

La luz UV-C inicialmente se incorporó en dispositivos diseñados para alimentos desinfectados o esterilizados que debían pasar por una estación en donde se efectuaban el llenado y envasado aséptico (Bachmann, 1978; Bachmann & Sturm, 1979). Posteriormente, se continuó con el estudio de su aplicación en cajas preformadas para eliminar microorganismos como *Bacillus subtilis* y sus formas vegetativas (Stannard et al., 1983, 1985). No obstante, sólo fue hasta la década de los noventa que se observaron los efectos positivos de la aplicación de UV-C en productos hortofrutícolas (Stevens et al., 1990), se refirieron por primera vez a la hormesis (Liu et al., 1993) y se fabricaron equipos de desinfección de frutas para líneas de producción continua (Wilson et al., 1997). Finalmente, en el siglo XXI, se indagó la efectividad de las dosis cortas de luz UV-C para obtener respuestas en frutos exóticos y de IV gamma (Gutiérrez et al., 2016; Huang et al., 2017) (Figura 0-1).

Figura 0-1: Línea de tiempo de la aplicación de luz UV-C en la agroindustria alimentaria.



Fuente: Garzón-García et al. (2020)

Efectos benéficos y adversos de la aplicación de luz UV-C en productos hortofrutícolas

Los tratamientos con luz UV-C en frutas y hortalizas se determinan considerando la dosis de irradiación. Dentro de los beneficios de las dosis bajas, se encontró que un tratamiento con 11,8 kJ/m^2 provocaba la acumulación de la ascorbato peroxidasa y menor actividad de la lipasa en melón cortado, lo que supuso una disminución de la rancidez y mayor firmeza

durante su vida útil (Lamikanra et al., 2005). Asimismo, se ha reportado que la aplicación de estas dosis bajas de UV-C no afectaron los compuestos bioactivos como los fenoles, flavonoides, antioxidantes y pigmentos en arándanos (Wang, Chen, & Wang, 2009), fresa 'Diamante' (Beltrán et al., 2010), mandarina 'Satsuma' (Shen et al., 2013), ajo 'Danyang' (Park & Kim, 2015) y repollo morado (Wu et al., 2017). En la Tabla 0-1 se presenta de forma sintetizada otros beneficios que se han determinado recientemente al aplicar diferentes dosis de luz UV-C en productos hortofrutícolas.

Tabla 0-1: Beneficios de la aplicación de diferentes dosis de luz UV-C en productos hortofrutícolas.

Producto hortofrutícola	Dosis	Beneficios	Autores
Tomate (*Solanum lycopersicum*)	Para alcanzar la dosis total (4 kJ/m^2) se rotó el fruto y se irradiaron dos lados, cada uno durante 6 min.	• Se indujo la expresión de genes que codifican enzimas clave en la ruta de los fenilpropanoides. • Aumento del contenido total e individual de compuestos fenólicos.	Liu, Zheng, Sheng, Liu, & Zheng (2018)
Mangostino (*Garcinia mangostana* L.)	Los frutos se dispusieron a 15 cm de la fuente de luz UV-C y fueron rotados para asegurar una exposición uniforme. Las dosis fueron de 6, 13, 26 y 40 kJ/m^2.	• El tratamiento con la dosis de 13 kJ/m^2 generó la mayor reducción de la pudrición. • Incremento de la actividad de las enzimas fenilalanina amonio liasa (PAL), quitinasa, β-1,3-glucanasa y peroxidasa (POD). • Disminución de la pérdida de peso y la tasa respiratoria durante el almacenamiento.	Sripong, Jitareerat, & Uthairatanakij (2019)
Raíces de loto mínimamente procesadas (*Nelumbo nucifera* Gaertn.)	El material vegetal fue empacado en bolsas y dispuesto a una distancia de 30 cm de una lámpara germicida. Las dosis dentro del paquete fueron de 0,3, 1,5, 3, 6, 12 kJ/m^2.	• Las dosis de 1,5 y 3 kJ/m^2 provocaron una disminución en el contenido de quinonas solubles y malondialdehído, y en la actividad de las enzimas polifenol oxidasa (PPO), peroxidasa (POD) y fenilalanina amonio liasa (PAL). • Los tratamientos con dosis de 1,5–12 kJ/m^2 inhibieron el crecimiento microbiano.	Wang et al. (2019)

(Continuación)

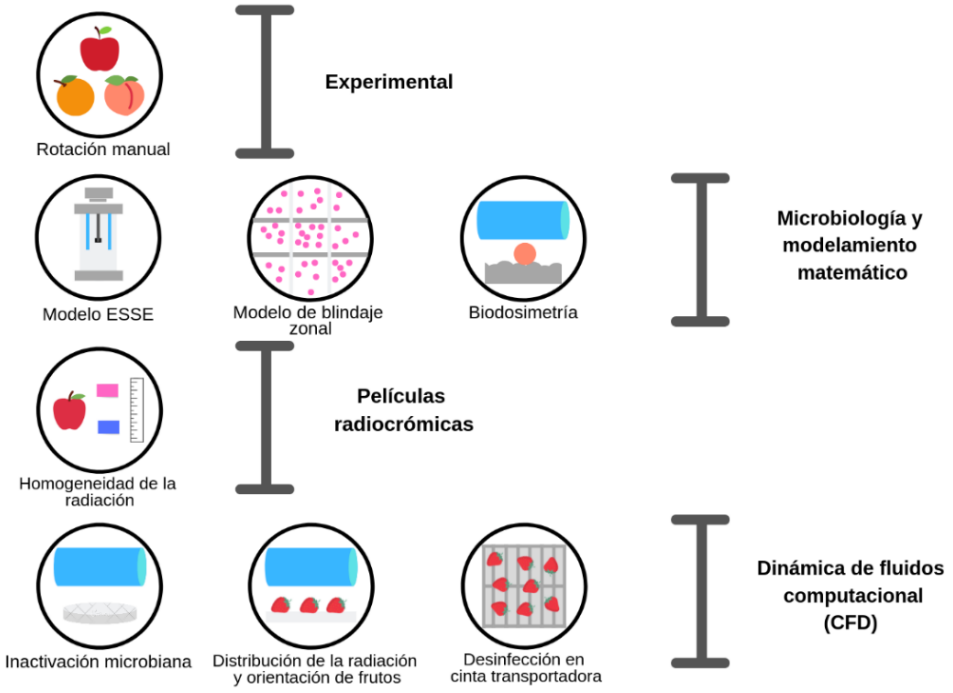
Producto hortofrutícola	Dosis	Beneficios	Autores
Albaricoque (*Prunus armeniaca* L.)	7,75, 11,63, 15,50, 19,38, 23,26, 31,01, 34,88, 38,76 y 48,45 kJ/m^2.	• La dosis de 31,01 kJ/m^2 provocó una reducción de 3 log en el número de bacterias aeróbicas mesofílicas. • El tratamiento con una dosis de 7,75 kJ/m^2 generó la disminución de hasta 2,37 log en el recuento de hongos y levaduras. • Todos los tratamientos provocaron la inactivación de bacterias coliformes. • Las cinéticas de inactivación de las bacterias aeróbicas mesofílicas y de hongos y levaduras se ajustaron a un modelo logarítmico lineal con cola.	Taze & Unluturk (2018)
Limón Tahíti (*Citrus latifolia*)	Los frutos se ubicaron a aproximadamente 20 cm de la fuente de luz UV-C. Las dosis fueron de 3,4, 7,2 y 10,5 kJ/m^2.	La dosis de 10,5 kJ/m^2 provocó una reducción en la producción de etileno, la pérdida de peso y la tasa de respiración durante el almacenamiento. También permitió la retención del cáliz y el color verde del exocarpo.	Pristijono et al. (2019)

En cuanto a los efectos adversos, se observó que una dosis alta de 10 kJ/m^2 desencadenó la formación de feofitina en brócoli de forma similar a los vegetales no irradiados (Costa et al., 2006). De igual forma, la exposición de rodajas de manzana ‘Granny Smith’ a 5,6 kJ/m^2, 8,4 kJ/m^2 y 14,1 kJ/m^2 causó una disminución de la vida útil debido al oscurecimiento enzimático (Gómez et al., 2010). En trozos de piña cortados de forma transversal expuestos a dosis de 4,5 kJ/m^2 por cada lado durante 60 y 90 s, se indujo tanto el oscurecimiento enzimático como la disminución del contenido de vitamina C durante el período de almacenamiento (Pan & Zu, 2012). Finalmente, Imaizumi et al.(2018), encontraron que al irradiar persimón y pepino a una intensidad de radiación de 12,9 W/m^2 hasta por 15 minutos, no se generó un aumento de fitonutrientes tales como polifenoles, β-caroteno, ácido ascórbico y clorofila. Por el contrario, algunos frutos de persimón se ennegrecieron durante el almacenamiento, probablemente debido a la transferencia de taninos desde el parénquima al tejido epidérmico; mientras que la luminosidad del exocarpo del pepino se vio afectada, ya que la cutícula fue dañada por la irradiación y hubo una ligera pérdida de humedad.

Técnicas para la determinación de la dosis óptima de luz UV-C en productos hortofrutícolas

La determinación de la dosis óptima de luz UV-C en productos hortofrutícolas usualmente se realiza basándose en investigaciones previas y de forma manual. En la literatura no se reportan muchas técnicas empleadas para este fin, ni su clasificación debido a su naturaleza. Sin embargo, se pueden identificar de acuerdo con los principios y elementos adaptados. Es posible encontrar algunas empíricas o de carácter experimental, otras que comprenden la microbiología y matemáticas, los materiales con propiedades físicas significativas y, por último, la informática y las ecuaciones de transporte de energía (Figura 0-2).

Figura 0-2: Métodos para la determinación de la dosis óptima de luz UV-C en productos hortofrutícolas.



Fuente: Garzón-García et al.(2020)

Técnicas experimentales

Las técnicas experimentales se rigen bajo un principio de ensayo y error. Se desarrollan probando combinaciones de tiempo e intensidad de radiación en diferentes configuraciones de los equipos o fuentes de luz UV-C, y evaluando la orientación de los

productos hortofrutícolas para lograr una irradiación uniforme. También se ha notado el uso de distintas dosis señaladas como benéficas en investigaciones previas (Liu et al., 2018). Se reportó la aplicación de dosis de 0,25 y 1 kJ/m^2 en fresas (Baka et al., 1999), y entre 1,3 y 40 kJ/m^2 en tomates (Liu et al., 1993), las cuales se dividieron en cuatro subdosis para que los frutos fueran irradiados en cuatro posiciones distintas y así asegurar un mayor control de la pudrición. Por otra parte, las uvas se trataron con dosis que variaron de 0,125 a 4 kJ/m^2, exponiendo solamente dos lados. Las dosis mayores a 0,5 kJ/m^2 provocaron una resistencia inducida al moho gris (*Botrytis cinerea*) a temperaturas de almacenamiento de 4 y 13 °C (Nigro et al., 1998). En otra investigación, se irradiaron manzanas, mandarinas y duraznos con 7,5 kJ/m^2, 1,3 kJ/m^2 y 7,5 kJ/m^2 respectivamente, y se comparó el efecto de la distribución de las dosis en cuatro lados, dos lados, un lado y un tratamiento estacionario del tallo. Con este último proceder, se ocasionó una resistencia a la descomposición en los productos hortofrutícolas mencionados, incluso mejor que cuando se rotaron el mayor número de veces. Esto pudo ocurrir debido a la penetración de la radiación en las capas externas de los tejidos dérmicos en el extremo del tallo de cada fruta, en donde la luz UV-C entró en contacto con un sitio de fotorrecepción; o por una señal transmitida sistémicamente desde el extremo del tallo al tejido vascular del floema (Stevens et al., 2005).

Técnicas microbiológicas con modelos matemáticos

Estas técnicas surgieron fundamentalmente para establecer si el modelamiento matemático de la inactivación de microorganismos en superficies de objetos sólidos podía contribuir al desarrollo de la desinfección con luz UV-C a nivel comercial (Gardner & Shama, 1998). Así que es posible obtener tanto de forma teórica como experimental el comportamiento de respuesta de las esporas no patogénicas a la radiación, al evaluar su supervivencia fraccional a las condiciones en las que se pretende estimar las dosis (Obande & Shama, 2011). De acuerdo con Alfano et al. (1986), existen dos tipos principales de modelos de radiación para este caso: modelos de incidencia y emisión. Los modelos de incidencia requieren la distribución de energía adyacente al sistema, desarrollada en dos o tres dimensiones. Se subdivide en modelo de incidencia radial (RI), modelo de incidencia parcialmente difusa (PDI) y modelo de incidencia difusa (DI). Estos modelos no se recomiendan para el diseño de equipos, ya que siempre necesitan

parámetros ajustables experimentalmente. Por otro lado, la base de los modelos de emisión reside en las características de la fuente de emisión. Se clasifican en modelos de fuente de línea (LS) y modelos de fuente de extensión (ES), que consideran la lámpara como una fuente de línea y como un cilindro perfecto con diferentes formas de emisión, respectivamente. Uno de los estudios iniciales desarrollado por Gardner & Shama (1999), constó de un bioensayo con esporas de *Bacillus subtilis* depositadas en la superficie de papel filtro en forma de pequeños cilindros de distintos tamaños (cilindro 1: 66 mm de diámetro y 20 mm de longitud, cilindros 2 y 3: 40 mm de diámetro y 75 mm de longitud), los cuales se suspendieron en un campo UV creado por cuatro lámparas de mercurio que se encontraban en la parte superior de una cámara de desinfección compuesta por una columna de vidrio de 0,23 m de diámetro y 1 m de longitud. Las intensidades de radiación se hallaron experimentalmente en las bases y laterales relacionando la supervivencia de los microorganismos con la dosis aplicada mediante una curva, y se predijeron con el modelo de emisión esférica (ESSE), suponiendo que el volumen de la fuente de radiación comprendía elementos de volumen diferencial. En definitiva, se obtuvo una correlación en un rango del 75 al 95 % entre los valores pronosticados y los experimentales, y se observó que la parte superior del cilindro recibía una irradiación uniforme y en los laterales variaba considerablemente.

Posteriormente, Gardner & Shama (2000) emplearon la información reportada en la investigación descrita previamente para modelar la incidencia de la luz en la inactivación de microorganismos, delimitando el número de zonas en las que se analizaba la distribución de los microorganismos por medio de programación no lineal, y la fracción de la población antes y después de la aplicación de luz UV-C. De modo que se requirieron los datos de inactivación obtenidos a las condiciones en las que los microorganismos estuvieran completamente expuestos a la radiación, así como la cinética microbiana hallada durante el tratamiento. Con esto, se proporcionó información cuantitativa de las dosis necesarias para las reducciones específicas de la carga microbiana.

Para simular y evaluar las distribuciones de las dosis en frutas esféricas durante el tratamiento de luz UV-C, se aplicó la biodosimetría con esferas de poliestireno de 70 mm que incluían membranas impregnadas de esporas del microorganismo *Bacillus subtilis*. La determinación de las dosis se abordó de forma teórica y experimental para las esferas irradiadas en diferentes posiciones y en un dispositivo giratorio hasta por 80 s. Por consiguiente, se calculó una dosis teórica de 10,6 J por medio de la ley del cuadrado

inverso, y se estimaron dosis de 9,1, 10,7 y 6,1 J para cuando las esferas se giraron una, dos y cuatro veces respectivamente, adaptando la fracción de esporas sobrevivientes a una curva dosis-respuesta. Para la exposición durante la rotación mecánica continua por 80 s, se alcanzaron 3,5 J, es decir, sólo el 33 % de la dosis teórica. Al duplicarse el tiempo de exposición, se irradiaron 10,2 J. Igualmente, se consideró el efecto de la interferencia de las esferas adyacentes, con lo que resultó la inactivación de esporas a lo largo del eje de rotación al alcanzarse una dosis de 8,9 J, cantidad menor en comparación al caso de una esfera (Obande & Shama, 2011).

Películas radiocrómicas

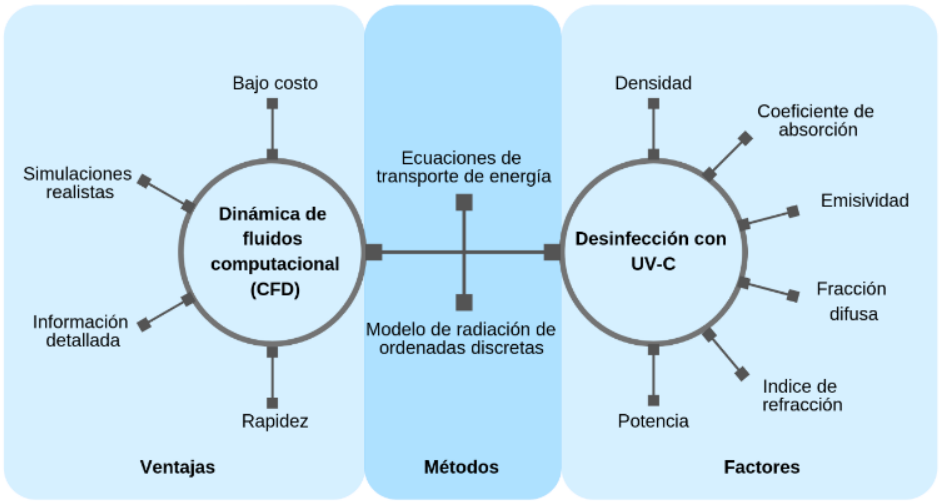
Las películas radiocrómicas están compuestas por materiales plásticos tales como polisulfona, diazo y cloruro de polivinilo, a los que se les adiciona un colorante y un agente liberador para emplearse en la actinometría de la radiación UV. Se consideran indicadores sensibles y los cambios en sus propiedades después de los tratamientos pueden ser medibles (Abdel-Fattah et al., 2000). Comúnmente, la respuesta de las películas se expresa en términos del cambio en su densidad óptica, lo cual se refiere a la diferencia en las densidades ópticas de una pieza de película antes y después de la irradiación (Devic, 2011). Varios reportes exponen que las películas radiocrómicas han sido útiles en la dosimetría de radiación médica (Butson et al.,2003) y solar (Butson et al., 2010).

Yan et al. (2017) usaron películas radiocrómicas en manzanas “Fuji” con el objetivo de conocer qué tipo de película y longitud de onda emplear para calcular las dosis de luz UV-C. Por tanto, se notó que la película FWT (43,5 µm de espesor y 10 × 10 mm de tamaño) fue la más sensible a la radiación UV-C entre los rangos de 0 a 12 kJ/m^2 en comparación a la película B3WINDOSE (19,4 µm de espesor y 10 × 10 mm de tamaño), lo cual fue medido mediante la densidad óptica a 510 y 600 nm en un lector radiocrómico. Como resultado, la dosis de radiación de UV-C se expresó con una ecuación polinómica en términos de A510 nm. Asimismo, para lograr mayor uniformidad de la dosis en las manzanas, se evaluaron bandejas de materiales reflectivos a 5 cm debajo de los frutos, entre ellos un paño negro, papel aluminio y una hoja de acero inoxidable, así como un dispositivo giratorio. Con este último elemento se logró mayor homogeneidad en la irradiación, aunque las frutas no recibieron dosis tan significativas como con los materiales reflectivos.

Dinámica de fluidos computacional (CFD)

La dinámica de fluidos computacional (CFD) es una técnica numérica que se desarrolla con la ayuda de computadoras digitales, y permite la solución o predicción cuantitativa de fenómenos de flujo de fluido basándose en las leyes de conservación de masa, momento y energía, bajo condiciones definidas en términos de geometría de flujo, las propiedades físicas de un fluido, y las condiciones límite e iniciales de un campo de flujo (Hu, 2012; Scott & Richardson, 1997). Las principales ventajas de la CFD son la generación de información detallada y completa de todas las variables relevantes de forma económica y rápida, facilidad en la modificación de parámetros, optimización de diseños, simulación en condiciones realistas e ideales, e investigación de situaciones no deseadas (Hu, 2012).En la industria agroalimentaria, la CFD ha tenido distintas aplicaciones en la higienización de equipos y algunas operaciones unitarias tales como el secado, la pasteurización, la esterilización, la humidificación, la refrigeración, el mezclado y el horneado (Kaushal & Sharma, 2011; Ren & Zhang, 2011; Xia & Sun, 2002).

Figura 0-3: Ventajas, métodos y factores de la dinámica de fluidos computacional (CFD) para simular la desinfección de productos hortofrutícolas con luz UV-C.



Fuente: Garzón-García et al.(2020)

Por otra parte, Koutchma et al. (2009) reportaron que los métodos de CFD son útiles para hallar las distribuciones de dosis de luz UV-C, pero es necesario considerar modelos que puedan ser validados con datos experimentales (Sandia National Laboratories, 2007). El balance de energía radiativa se expresa en la ecuación de transferencia radiativa (RTE), la cual describe el campo de intensidad radiativa como función de ubicación, dirección y variable espectral (longitud de onda). La integración de RTE conduce a la conservación de

energía radiativa aplicada a un volumen infinitesimal (Modest, 2013). Los diferentes métodos para desarrollar la RTE incluyen P-1, Rosseland, superficie a superficie, modelos de radiación de ordenadas discretas y de transferencia discreta (ANSYS Inc., 2009a) El método de ordenadas discretas (DO) es uno de los más comunes para resolver la ecuación de transferencia radiativa, ya que permite calcular la intensidad de radiación en las coordenadas espaciales teniendo en cuenta las propiedades espectrales del sistema (Trivittayasil et al., 2016) (Figura 0-3). Previamente, este modelo ha sido empleado en diferentes estudios relacionados con la desinfección de aguas residuales con reactores UV (Hashemabadi et al., 2014; Sultan, 2016).

Trivittayasil et al. (2015) describieron la inactivación *in vitro* con luz UV-C de los microorganismos *Cladosporium cladosporioides* y *Penicillium digitatum*, responsables de la pudrición de frutas como la fresa. La experimentación se llevó a cabo con placas de agar papa dextrosa (PDA) que contenían de forma individual 10^7 UFC/mL de los microrganismos bajo estudio. Estas placas se dispusieron a diferentes distancias de una lámpara germicida (50, 100, 150 y 200 mm) y se irradiaron con aproximadamente 100 W/m^2 hasta por 30 minutos. El software ANSYS Fluent 13.0 y el modelo DO se usaron para hallar la intensidad de irradiación promedio en la superficie del agar a las distancias mencionadas, ya que era un parámetro necesario en el cálculo de las cinéticas microbianas y los modelos de predicción en función de la dosis UV. Con este estudio, se estimó que los tratamientos provocaron que la población microbiana disminuyera hasta cuatro unidades logarítmicas y que la intensidad promedio en la superficie del agar variara de 13,8 a 2,13 W/m^2 y de 13,2 a 2,29 W/m^2 para las placas con la suspensión de *C. cladosporioides* y *P. digitatum*, respectivamente. También se encontró que la curva de supervivencia de *C. cladosporioides* fue de naturaleza bifásica, lo que significó que la tasa de inactivación fue alta al inicio y disminuyó al aumentarse la dosis; mientras que la curva del microorganismo *P. digitatum* fue más lineal y se ajustó a una cinética de primer orden.

Posteriormente, Trivittayasil et al. (2016) desarrollaron simulaciones en el software ANSYS Fluent 14.0 empleando el modelo de radiación DO, con el fin conocer la orientación más adecuada para irradiar una fresa con una sola lámpara germicida de luz UV-C. El fruto fue puesto en tres posiciones en donde el cáliz se encontraba de lado, arriba y abajo. El área que no estaba expuesta directamente a la radiación (en la que incidían intensidades menores a 0,5 W/m^2) correspondió al 43,9, 55,7 y 51,9 % del área total, respectivamente.

La máxima intensidad que recibió la fresa con el cáliz de lado, dispuesto para arriba y abajo fue de 5,13, 6,06 y 5,86 W/m^2, respectivamente. Por lo tanto, se determinó que poniendo el cáliz de lado se lograba que la mayor área de fresa se irradiara a una intensidad de radiación más baja en comparación con las otras orientaciones. De igual forma, en el estudio se analizó el efecto del número de lámparas (2, 4 y 8) y sus posiciones para conseguir una radiación más uniforme de 9 fresas dispuestas con el cáliz de lado en una bandeja de polietileno de baja densidad (LLDPE). Así pues, la mejor distribución de la dosis de luz UV-C se obtuvo con el modelo de cuatro lámparas organizadas de tal forma que dos estuvieran tanto en la parte superior como inferior de los frutos y a una distancia horizontal entre ellas de 300 mm, alcanzando una intensidad mínima y máxima de 0,071 y 4,35 W/m^2, respectivamente. Finalmente, al realizarse la integración de los modelos de inactivación de los microrganismos *C. cladosporioides* y *P. digitatum* reportados en el estudio de Trivittayasil et al. (2015) con el de transferencia de radiación para esta configuración, se observó que el tiempo requerido para la inactivación de un ciclo logarítmico de *C. cladosporioides* y *P. digitatum* fue de 226 s y 96 s, respectivamente.

Asimismo, para detallar la distribución de las dosis de luz UV-C durante la desinfección de fresas en una banda transportadora en movimiento continuo por medio de un modelo de radiación tridimensional basado en un modelo DO y un método de malla deslizante, Tanaka, Nashiro, Trivittayasil, & Uchino (2016) simularon en el software ANSYS Fluent 14.0 cuatro modelos que consistían en configuraciones de cuatro lámparas germicidas de distintos tamaños (190 o 250 mm con un diámetro de 15 mm, o 985 mm con un diámetro de 22,5 mm) instaladas en forma paralela o vertical a la dirección del movimiento, y una bandeja de LLDPE de 1 mm de espesor que contenía nueve fresas. De tal forma que la distribución total de la dosis de UV-C se estimó acumulando las dosis de UV-C incidentes en la superficie de las fresas durante seis posiciones dependientes del tiempo. Los resultados mostraron que los modelos con cuatro lámparas instaladas en paralelo a la dirección del movimiento proporcionaron una distribución uniforme de la dosis, y que para lograr la inactivación de tres ciclos logarítmicos del microorganismo *P. digitatum* en la superficie de las fresas, se necesitaba un tratamiento de 131 s.

Marco teórico

Modelo de radiación

El modelo de radiación de ordenadas discretas (DO) (Ecuación 1) resuelve la ecuación de transferencia de radiación (RTE) para un número finito de ángulos sólidos discretos, cada uno asociado con una dirección vectorial fija en el sistema cartesiano global (He et al., 2018). Este modelo se expresa en función de la absorción, reflexión, dispersión y emisión, y además considera los medios participantes y la radiación en las superficies (ANSYS Inc., 2009b; Trivittayasil et al., 2016).

$$\nabla.(\mathrm{I}(\vec{\mathrm{r}},\vec{\mathrm{s}})\vec{\mathrm{s}}) + (\alpha+\sigma_{\mathrm{s}})\mathrm{I}(\vec{\mathrm{r}},\vec{\mathrm{s}}) = \alpha\eta^2\frac{\sigma\mathrm{T}^4}{\pi} + \frac{\sigma_{\mathrm{s}}}{4\pi}\int_0^{4\pi}\mathrm{I}\,(\vec{\mathrm{r}},\vec{\mathrm{s}}')\Phi(\vec{\mathrm{s}},\vec{\mathrm{s}}')\mathrm{d}\Omega' \quad (1)$$

Donde I es la intensidad de radiación que depende de la posición ($\vec{\mathrm{r}}$) y dirección ($\vec{\mathrm{s}}$), $\vec{\mathrm{s}}'$ es el vector de dirección de dispersión, α es el coeficiente de absorción, η es el índice de refracción, σ_{s} es el coeficiente de dispersión, σ la constante de Stefan-Boltzmann, T la temperatura local, Φ la función de fase y Ω' el ángulo sólido.

También hay que considerar que la irradiación total G (W/m^2) abarca todas las contribuciones espectrales, las cuales son la absorción ($G_{\lambda,abs}$), transmisión ($G_{\lambda,tr}$) y reflexión ($G_{\lambda,ref}$). Esto se puede representar en un balance de radiación (Ecuación 2) (Incropera & De Witt, 1999).

$$G_\lambda = G_{\lambda,ref} + G_{\lambda,abs} + G_{\lambda,tr} \quad (2)$$

En un medio semitransparente, tanto la absorción como la transmisión y reflexión pueden producirse, pero en un medio opaco, $G_{\lambda,tr}$ es igual a cero y los procesos de absorción y reflexión se tratan como fenómenos superficiales (Incropera & De Witt, 1999).

El modelo DO permite especificar el tipo de pared interior del dominio. Normalmente, se diferencia entre pared opaca y semitransparente. La energía radiante que impacta una pared opaca (q_{in}) puede emitirse o reflejarse en el medio circundante y ser absorbida. La radiación se puede reflejar de forma difusa o especular, dependiendo de la fracción difusa (f_d) (Figura 0-4). Se debe tener en cuenta las siguientes determinaciones (ANSYS Inc., 2009b).

$$Emisión\ de\ la\ superficie\ de\ la\ pared = \eta^2 \epsilon_w \sigma T_w^4 \quad (3)$$

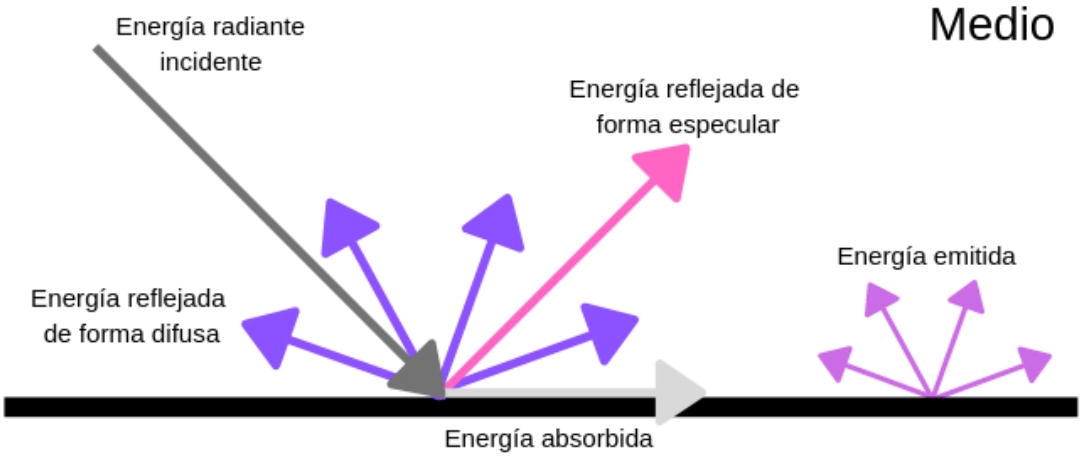
$$Energía\ reflejada\ de\ forma\ difusa = f_d(1-\epsilon_w)q_{in} \quad (4)$$

$$Energía\ reflejada\ de\ forma\ especular = (1-f_d)(1-\epsilon_w)q_{in} \quad (5)$$

$$Absorción\ en\ la\ superficie\ de\ pared = \epsilon_w q_{in} \quad (6)$$

Donde ϵ_w es la emisividad de la pared y T_w es la temperatura de la pared.

Figura 0-1: Pared interna opaca.

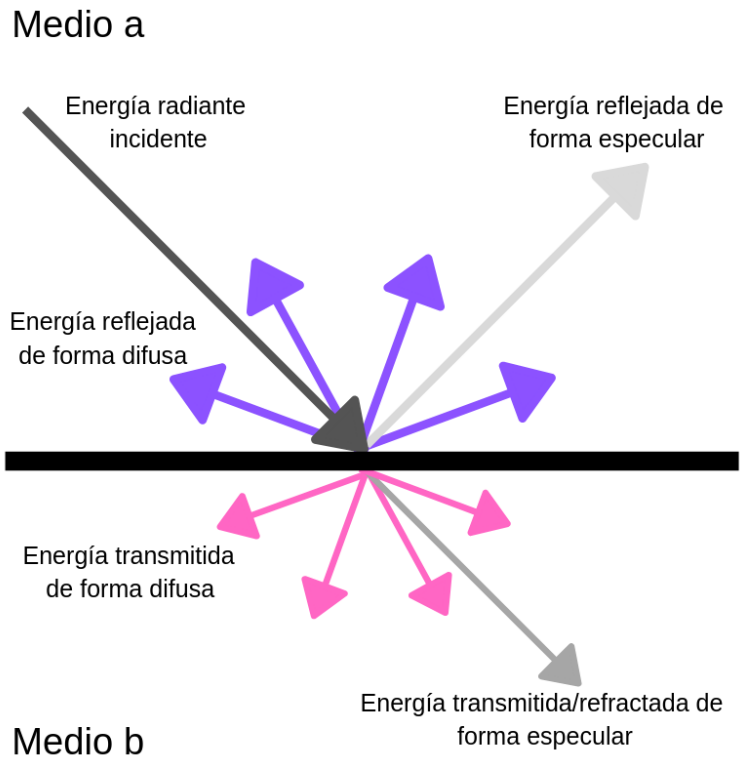


Adaptado de: ANSYS Inc. (2009b)

En el caso de la pared semitransparente, se tiene que la radiación incidente puede pasar a través de la pared, transmitirse o refractarse al medio adyacente, o reflejarse nuevamente en el medio circundante y absorberse por la pared si los índices de refracción de los medios involucrados son diferentes (Figura 0-5) (ANSYS Inc., 2009b). Hay que resaltar que para una pared semitransparente se debe modificar el valor del índice de refracción (ANSYS Inc., 2006).

Cabe mencionar que el valor de la fracción difusa (f_d) que se considere entre 0 y 1, determina la forma en que la energía radiante se refleja y transmite. Cuando f_d es igual a 0 la pared es netamente especular y si tiene un valor de 1, la pared es difusa. Si se ingresa un valor entre el rango previamente mencionado, la pared es parcialmente difusa y especular.

Figura 0-2: Pared interna semitransparente.



Adaptado de: ANSYS Inc. (2009b)

Microorganismos patógenos

Las enfermedades transmitidas por los alimentos (ETA) son generalmente de carácter infeccioso o tóxico, y son ocasionadas por microorganismos (bacterias y virus), parásitos o sustancias químicas (WHO, 2018b). Esto ha originado una gran preocupación en los consumidores, los productores y los organismos oficiales que velan por la inocuidad de los alimentos a nivel mundial (Tafur-Garzón, 2009). En el caso del consumo de frutas y hortalizas en fresco, se conciben como potencialmente peligrosos en caso de que exista contaminación. La aplicación inadecuada de Buenas Prácticas Agrícolas (BPA),

especialmente el riego con agua residual o no tratada, es la principal fuente de contaminación de frutas y hortalizas durante la cosecha y la poscosecha (González-Mendoza et al., 2017). En Colombia, los principales agentes etiológicos identificados en brotes de ETA en 2010 fueron *Escherichia coli* y *Salmonella* spp., bacterias establecidas en la normativa nacional. También se notó la presencia de otros microorganismos como *Listeria monocytogenes* (Soto-Varela et al., 2016).

Salmonella enterica

El microorganismo *Salmonella enterica* es una enterobacteria Gramnegativa en forma de bacilo, no esporulada y móvil (Soto-Varela et al., 2016), reside en humanos, algunos animales y en el medio ambiente. Es un patógeno facultativo que se presenta en alimentos contaminados y causa enfermedades gastrointestinales (salmonelosis) (Dandekar et al., 2015). Los síntomas se manifiestan entre las 6 y 72 horas después de la ingesta de *Salmonella*, y la enfermedad dura entre 2 y 7 días (WHO, 2018d). Los serotipos no tifoideos que causan las enfermedades gastrointestinales pertenecen a la sub-especie *enterica*, pero difieren en el rango de hospederos a los cuales infectan y los síntomas clínicos. Las serovariedades Enteritidis y Typhimurium poseen muchos hospederos y son los que generalmente afectan al ser humano (Barreto et al., 2016). En condiciones de debilidad, estas serovariedades pueden provocar infecciones en el torrente sanguíneo y posteriormente, la muerte (Dandekar et al., 2015).

La *S. enterica* es capaz de sobrevivir a la acidez del estómago y la alta osmolaridad del intestino delgado, ya que se internaliza por las células epiteliales intestinales del íleon (Soto-Varela et al., 2016). Por lo tanto, para ingresar a las células no fagocíticas como las epiteliales intestinales, expresa una proteína de superficie capaz de unirse a receptores de superficie involucrados en la matriz de las células o de adherencia célula-célula. La expresión de la proteína permite la formación de una vacuola que envuelve a la bacteria. Las interacciones entre la proteína bacteriana y el receptor desencadenan una cascada de señales que culminan en el cierre de la copa fagocítica y la internalización bacteriana (Cossart & Sansonetti, 2004). Asimismo, una de las principales preocupaciones que se relacionan con este patógeno es el aumento de su resistencia a antibióticos como el ácido nalidíxico, sulfafurazol y la penicilina. Por lo cual, es importante la implementación de

tecnologías de control en la industria de alimentos (Soto-Varela et al., 2016), como la aplicación de luz UV-C.

Escherichia coli

Bacilo Gramnegativo y anaerobio facultativo, con un metabolismo tanto fermentativo como respiratorio. Su movilidad depende de los flagelos perítricos. Normalmente, se localiza en el intestino grueso de los animales de sangre caliente y el ser humano, y es ubicuo en el medio ambiente (Benjamin et al., 2018). Este microorganismo es empleado como indicador de contaminación fecal y presencia de patógenos en agua y alimentos (Soto-Varela et al., 2016).

Según Soto-Varela et al. (2016), las cepas de *E. coli* que producen diarrea y otras enfermedades extraintestinales en humanos, pertenecen a los serotipos O:H y poseen diferentes propiedades de virulencia. Normalmente se dividen en seis grupos patógenos: *E. coli* enteropatogénica (EPEC), *E. coli* enteroagregante (EAEC), *E. coli* enterotoxigénica (ETEC), *E. coli* de adhesión difusa (DAEC), *E. coli* enteroinvasora (EIEC) y *E. coli* enterohemorrágica (EHEC). No obstante, el serotipo de *E. coli* O157:H7 es uno de los más representativos porque produce la toxina Shiga, la cual se asemeja con las toxinas producidas por *Shigela dysenteriae*. También puede crecer a temperaturas entre 7 y 50 °C (temperatura óptima de 37 °C), proliferar en alimentos ácidos de hasta un pH de 4,4 y con una actividad de agua mínima de 0,95. En consecuencia, se considera la más importante por su impacto en la salud pública, ya que puede causar graves enfermedades a través de los alimentos. Entre los principales síntomas se destacan los calambres abdominales y diarrea, los cuales puede progresar a colitis hemorrágica, y el período de incubación varía entre 3 y 8 días (WHO, 2018a).

Listeria monocytogenes

Es un bacilo Grampositivo, anaerobio facultativo y no esporulado. Se encuentra comúnmente en aguas de desecho, distintos afluentes, el suelo, el ambiente y en alimentos, sobre todo en vegetales contaminados con tierra o estiércol de animales usado como fertilizante (de Curtis et al., 2002). Este microorganismo ha sido una seria amenaza para la industria alimentaria, ya que tiene la capacidad para sobrevivir a las condiciones

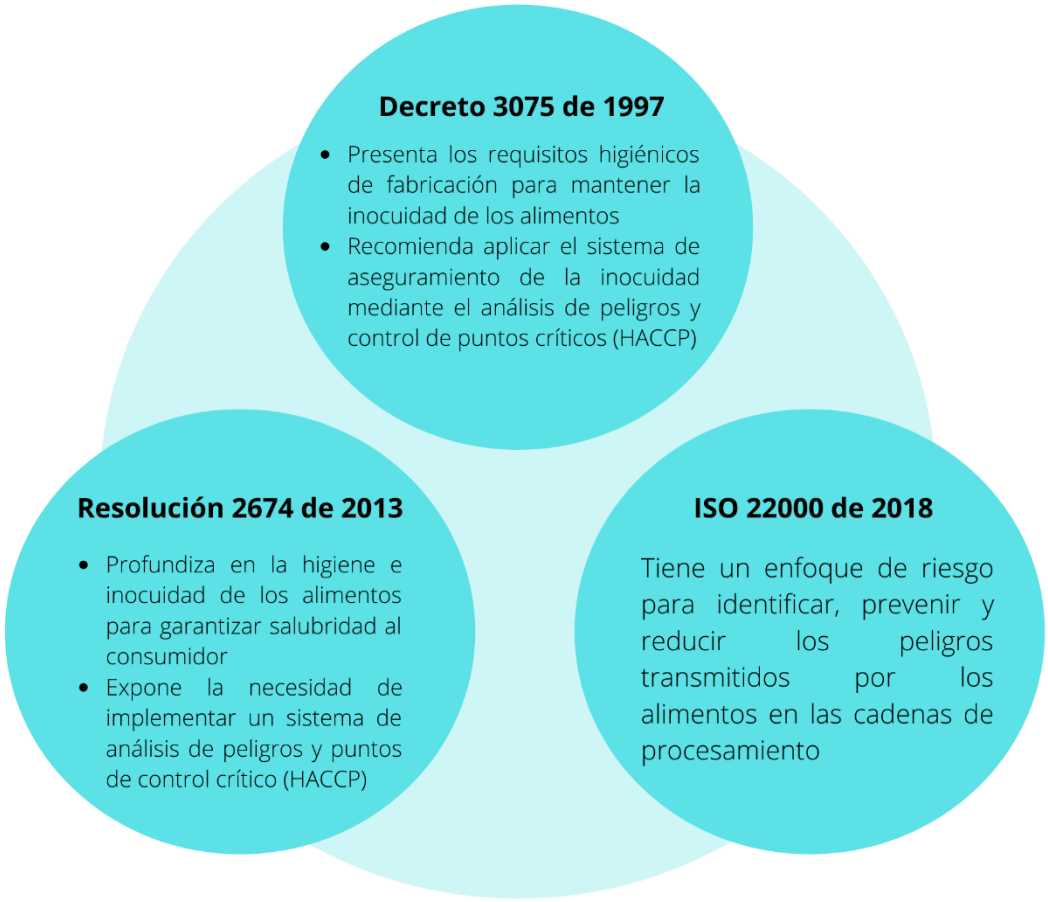
más comunes de procesamiento de alimentos; pH extremo (menores a 4,4 y hasta 9,6), altas concentraciones de sal (hasta del 20 %), baja actividad de agua y crece a temperaturas entre 1 y 45 °C (Castañeda-Ruelas et al., 2014; Law et al., 2015; Soto-Varela et al., 2016). También puede adherirse a las superficies que tienen contacto con los alimentos y formar biopelículas para su supervivencia en ambientes hostiles. Estas biopelículas pueden persistir por un largo tiempo y tolerar altas concentraciones de desinfectantes y antimicrobianos. Por lo tanto, la contaminación se puede llevar a cabo indefinidamente debido al contacto entre alimentos y superficies que cuenten con la presencia de este patógeno durante y después del procesamiento por medio de la contaminación cruzada (Law et al., 2015).

Los alimentos contaminados con *L. monocytogenes* pueden causar una infección grave conocida como listeriosis (Law et al., 2015), la cual se manifiesta de forma invasiva o no invasiva. La forma invasiva puede provocar abortos, septicemia, meningitis y encefalitis. Además, se caracteriza por tener una alta tasa de mortalidad (20-30 %). Por otro lado, la forma no invasiva produce fiebre, dolor de cabeza, diarrea y dolores musculares (Soto-Varela et al., 2016; WHO, 2018c).

Inocuidad en frutas

Según el Ministerio de Salud y Protección Social (2013), la inocuidad considera un conjunto de condiciones y medidas aplicadas durante la cadena agroindustrial para asegurar que los alimentos no representen un riesgo para la salud humana. En cuanto a los productos hortofrutícolas, estos están expuestos a la contaminación por el contacto con el agua y medio ambiente en general (Díaz-Sobac & Vernon-Carter, 2009). La falta de inocuidad de dichos productos de origen vegetal se debe principalmente a la contaminación de microorganismos patógenos durante etapas como la precosecha, la poscosecha, el almacenamiento, la distribución, en los puntos de venta, y en el mismo empleo final. Esto puede prevenirse al implementar sistemas de control eficientes en los que se incluya la desinfección poscosecha, y al aplicar la normativa vigente (Díaz-Sobac & Vernon-Carter, 2009). En Colombia se destacan el Decreto 3075 de 1997, la Resolución 2674 de 2013 y la ISO 22000 de 2018 (Figura 0-6).

Figura 0-3: Normatividad vigente para la inocuidad alimentaria.



Adaptado de: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2018); Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos (1997, 2013)

Los mangos pueden considerarse como vehículos para ETA, o sufrir de una contaminación cruzada si se trata con equipos o elementos que tengan una significativa carga microbiana patógena (Penteado et al., 2014). Algunos reportes y estudios de la sobrevivencia de los microorganismos *E. coli*, *S. enterica* y *L. monocytogenes* en mango se presentan a continuación.

- Se han documentado cuatro brotes de salmonelosis en USA asociados con el consumo de mango en los años 1998, 1999, 2001 y 2003, debido al microorganismo *S. enterica*, serovares Oranienburg, Newport y Saintpaul (Strawn & Danyluk, 2010).
- Penteado et al. (2014) indicaron que el mango es un buen substrato debido a su baja acidez, y a bajas temperaturas ciertos microorganismos como *L. monocytogenes* pueden hallar las condiciones para sobrevivir y multiplicarse.

- Se reportó que *E. coli* O157:H7 puede sobrevivir durante la vida útil de los mangos en trozos congelados y refrigerados (Strawn & Danyluk, 2010).

Según la NTC 6005 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2013) y la Resolución 3929 de 2013 (Ministerio de Salud y Protección Social, 2013b), entre los requisitos microbiológicos de la pulpa fresca y los vegetales mínimamente procesados, se menciona que no se debe presentar *Salmonella* spp. ni *Listeria monocytogenes*, y el recuento de *Escherichia coli* (UFC/g) se recomienda menor a 10^1 para tener un nivel de buena calidad, y menor a 10^2 para un nivel de calidad aceptable (Tabla 0-2 y Tabla 0-3).

Tabla 0-1: Requisitos microbiológicos para los alimentos mínimamente procesados (NTC 6005).

Requisitos	n	m	M	C
Recuento de bacterias aerobias mesófilas, UFC/g	5	10^5	10^6	2
Recuento de *Escherichia coli*, UFC/g	5	10	10^2	0
Detección de *Listeria monocytogenes*/ 25 g	5	Ausencia	-	0
Detección de *Salmonella* spp/ 25 g	5	Ausencia	-	0

Tabla 0-2: Requisitos microbiológicos de pulpa de fruta sin tratamiento térmico congelada o no (Resolución 3929 de 2013).

Requisitos	n	m	M	c
Recuento de *E. coli*, UFC/g	5	<10	-	0
Recuento de mohos y levaduras UFC/g o mL	5	1000	3000	0
Detección de *Salmonella*/ 25 g	5	Ausencia	-	0

donde;

n= número de muestras.

m= índice máximo permisible para identificar nivel de buena calidad.

M= índice máximo permisible para identificar nivel aceptable de calidad.

c= número de muestras permitidas con resultado entre m y M.

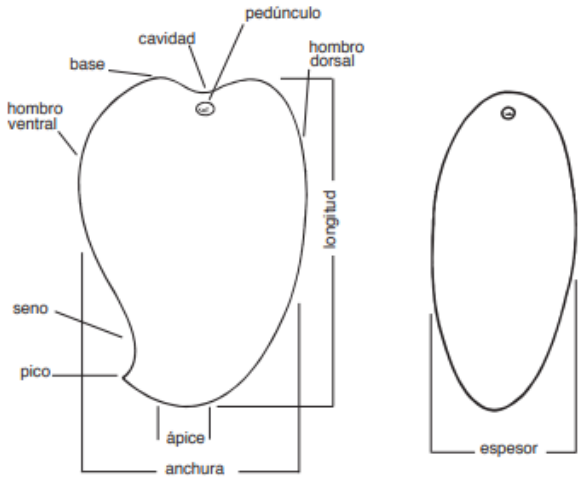
Generalidades del mango ‘Tommy Atkins’

Colombia es un país con potencial en la producción y exportación de frutas y hortalizas. Las principales áreas productoras que se destacan son las regiones centro, pacífica y cafetera, puesto que llegan a aportar aproximadamente 6,4 millones de toneladas de productos hortofrutícolas (Asohofrucol, 2016a). Cabe resaltar que entre dichos productos el mango se ha destacado por tener una alta tasa de crecimiento de producción (mayor al 10%) (Asohofrucol, 2016b). Se han identificado variedades tradicionales tales como 'Tommy Atkins', 'Keitt', 'Van Dyke' y 'Magdalena River', las cuales tienen un alto contenido de antioxidantes, buen aroma y sabor (Agronet, 2018), No obstante, la variedad ‘Tommy Atkins’ es la de mayor producción y consumo a nivel nacional por su resistencia a la manipulación, gran tamaño y fácil procesamiento (Dussán-Sarria, Torres-León, & Reyes-Calvache, 2014).

Morfología

El fruto del mango es una drupa grande y carnosa, que posee un mesocarpio comestible, resinoso, variable en tamaño, color y presencia de fibra. El sabor varía desde trementina a dulce. Posee un exocarpio grueso y glandular, y un endocarpio leñoso, espeso y fibroso. Normalmente, la longitud del fruto varía de 2,5 a 30 cm dependiendo de la variedad (Mukherjee & Litz, 2009). Las características morfológicas del mango de variedad “Tommy Atkins” se describen en la Tabla 0-4 de acuerdo con la Figura 0-7.

Figura 0-7: Partes del fruto de mango.



Fuente: Coello-Torres, Fernández-Galván, & Galán-Saúco (1997)

Tabla 0-3: Descripción morfológica del fruto del mango de variedad “Tommy Atkins”.

Carácter	Descripción
Longitud	Larga (mayor a 11,5 cm)
Anchura	Ancha (mayor a 9 cm)
Peso	Alto (450 a 600 g)
Forma	Oblongo oval
Cavidad peduncular	Ligera
Seno	Ausente
Pico	Ausente
Color de exocarpio	Rojo
Adherencia piel-pulpa	Media
Color de la pulpa	Naranja
Textura de la pulpa	Media a basta
Presencia de pulpa	Alta

Adaptado de: Coello-Torres et al. (1997)

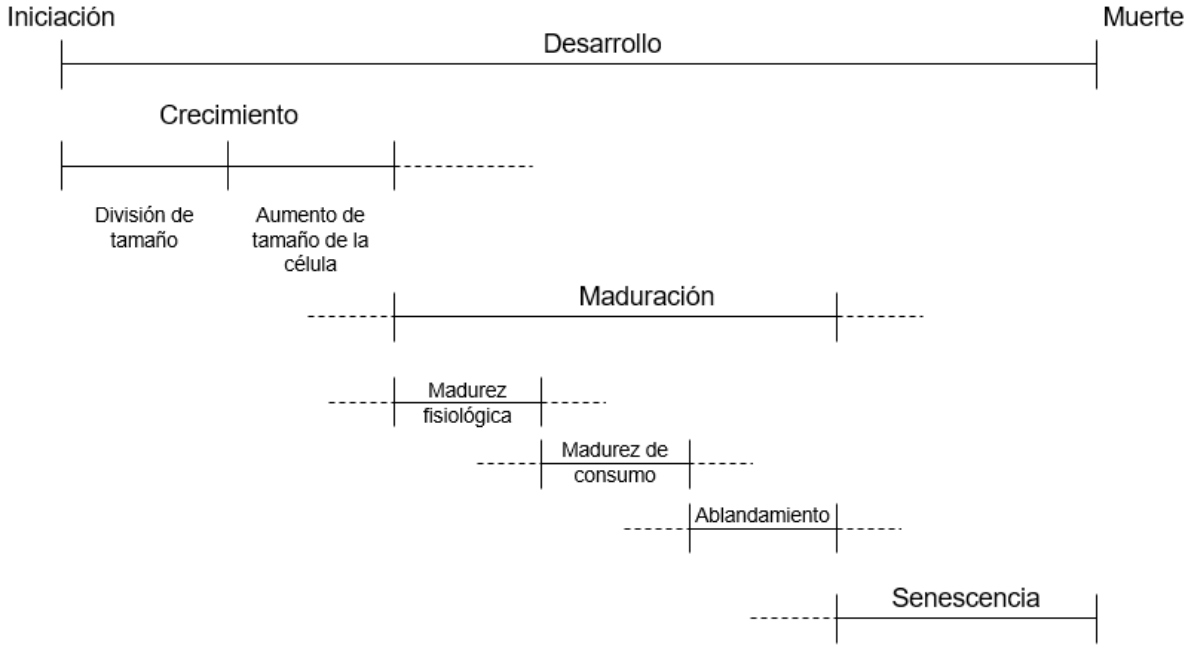
Maduración

Las frutas son autosuficientes y poseen su propia maquinaria catalítica. Se clasifican de acuerdo con su tasa de respiración y biosíntesis de etileno durante la maduración, como climatéricas y no climatéricas. Estas últimas se caracterizan porque no continúan su maduración después de desprenderse de la planta madre, producen una cantidad muy pequeña de etileno endógeno y no responden al etileno exógeno. Por el contrario, las frutas climatéricas aumentan la tasa de respiración y la formación de etileno al desprenderse de la planta madre, lo que conlleva a un pico climatérico al inicio de la maduración (Prasanna et al., 2007). La biosíntesis de etileno está regulada metabólicamente y su inducción también obedece a una variedad de señales de estrés como la refrigeración, heridas mecánicas, infección por patógenos y estrés nutricional (Corpas-Iguarán & Tapasco-Alzate, 2014).

Comúnmente, el proceso de maduración ocurre en dos pasos. Primero, se alcanza la madurez fisiológica cuando el fruto alcanza el máximo tamaño, el mayor vigor de las semillas y se desarrolla la parte basal. Luego, la madurez de consumo, momento en que

se lleva a cabo la transformación del contenido de clorofilas y carotenoides, la acumulación de flavonoides, la alteración del turgor celular, la modificación de azúcares, ácidos orgánicos y compuestos volátiles que afectan la calidad nutricional y organoléptica, y el aumento de la susceptibilidad al ataque de patógenos (Martínez-González et al., 2010).

Figura 0-8: Etapas entre la formación del fruto y senescencia.



Adaptado de: Martínez-González et al. (2010)

Los principales ácidos orgánicos presentes en esta fruta son el ácido cítrico y málico (Maldonado-Celis et al., 2019). Durante la maduración del mango, la acidez titulable disminuye de 0,6 a 0,2%, mientras que el contenido de los sólidos solubles (SS) aumenta de 9,1 a 17,3% (Zafar & Sidhu, 2017). El mango también es una fuente rica en antioxidantes, incluyendo el ácido ascórbico (vitamina C), compuestos fenólicos y carotenoides (Ruales et al., 2018). De acuerdo con Maldonado-Celis et al. (2019) el contenido de vitamina C disminuye durante la maduración porque es coenzima de algunas enzimas involucradas en diferentes rutas metabólicas como la del etileno, oxalato y tartrato. La pulpa de mango posee principalmente ácidos fenólicos derivados del ácido hidroxibenzoico (ácido gálico, vainílico, siríngico y protocatecuico) e hidroxicinámico (ácidos p-cumárico, clorogénico, ferúlico y cafeico), y los principales flavonales y xantonas son los glucósidos de quercetina y la mangiferina, respectivamente. La cantidad de

compuestos polifenólicos y flavonoides totales disminuye cuando el fruto alcanza la maduración (Zafar & Sidhu, 2017).

En cuanto a la variedad 'Tommy Atkins', se presenta un cambio de color en la cáscara durante la maduración, desde un tono verde oscuro pasando por tonalidades naranja-rojizas, hasta rojo-púrpura (Mahecha et al., 1991). Este proceso también está acompañado por modificaciones moleculares estructurales en los constituyentes de la pared celular, tanto a nivel de sustrato (polisacáridos), como de enzimas (glucanasas y glicosidasas), que promueven el ablandamiento y es un atributo de calidad importante que determina la aceptación del consumidor (Tharanathan et al., 2006). En la pulpa de mango de esta variedad, durante la madurez fisiológica puede alcanzar un pH de 4,33, 17,32 °Brix (Ramírez-Méndez et al., 2010), 0,61 g/100 g de lípidos, 0,44 g/100 g de proteínas, 4-13 g/100 g de azúcares reductores, 8,94 g/100 g de azúcares no reductores, 0,15 g/100 g de almidón (Marques et al., 2010), 28,13 µ/g de carotenoides totales, 133,23 mg/ 100 g de fenoles totales y 20,85 mg/100 g de ácido ascórbico (De Almeida-Melo & Rodrigues De Araújo, 2011).

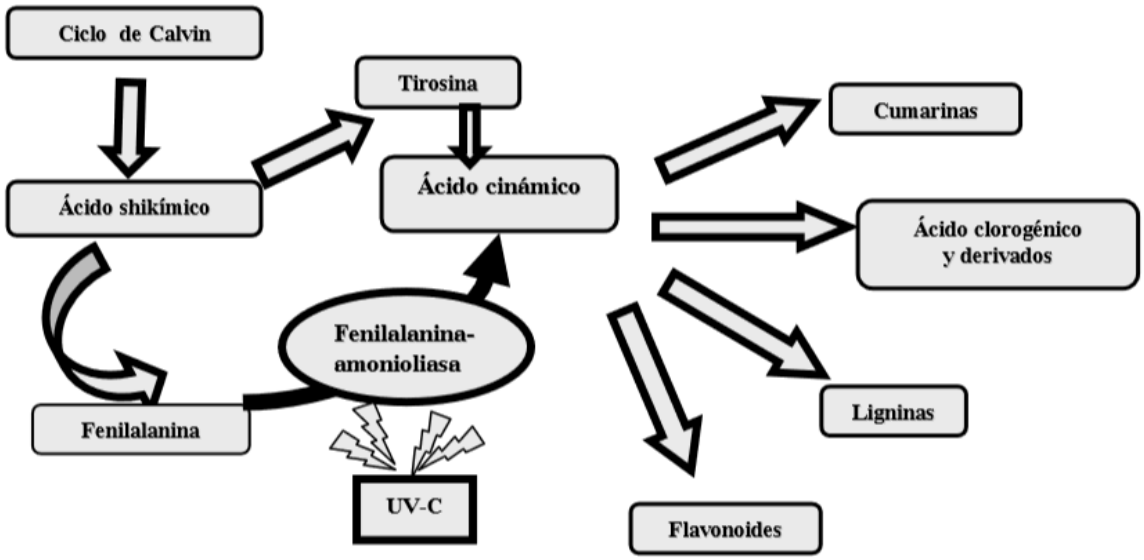
Generalidades de la aplicación de la luz UV-C en frutas y hortalizas

La aplicación de la luz UV-C en frutas y hortalizas genera principalmente un efecto antimicrobiano, el cual se desarrolla cuando la radiación es absorbida por el ADN y puede detener el crecimiento celular, conllevar a la muerte celular y ocasionar mutaciones en el ácido nucleico de los microorganismos tratados. La incidencia en el ADN es proporcional a la exposición de los microorganismos a la luz UV-C. Sin embargo, el ácido nucleico dividido por el tratamiento con luz UV-C puede fotorreactivarse debido a la acción de la enzima fotoliasa y a los ambientes oscuros (Guerrero-Beltrán & Barbosa-Cánovas, 2004). En consecuencia, las dosis a las que se someten los alimentos, sobre todo frutas y hortalizas deben ser estudiadas y elegirse bien.

Otro efecto que se logra con esta tecnología es la preservación de la calidad sensorial en lo referente al ablandamiento de tejidos, daño por frío y oscurecimiento enzimático (Chisari et al., 2011; Falguera et al., 2012). Es importante resaltar que la aplicación de la luz UV-C

tiene un efecto hormético. La hormesis implica la estimulación de una respuesta beneficiosa de la planta a dosis bajas de un elicitor o agente (Terry & Joyce, 2004). En consecuencia, el estrés generado por la radiación puede incrementar la actividad de la fenilalanina amonio liasa (PAL). Esta enzima es clave en la estimulación del metabolismo fenilpropanoide, el cual da lugar a la formación de fitoalexinas, fenoles, ligninas y flavonoides (Figura 0-9), genera un aumento de la resistencia de las frutas y hortalizas a los microorganismos causantes de la pudrición y la disminución de la síntesis de etileno (Rivera-Pastrana et al., 2007).

Figura 0-9: Estimulación del metabolismo fenilpropanoide de los vegetales por la aplicación de la luz UV-C.



Fuente: Rivera-Pastrana et al. (2007)

La irradiación con la luz UV-C también induce las especies de oxígeno reactivas (ROS), seguido por la producción de captadores de radicales de oxígeno, tales como catalasas (CAT), superóxido dismutasas (SOD), peroxidasas (POD) y el sistema de glutatión (glutatión reducido, GSH; glutatión peroxidasa, GPX; glutatión reductasa, GR) (Maurer et al., 2017), previniendo la muerte o daño celular mediante mecanismos de homeostasis celular y la canalización de sustratos. Por otra parte, la actividad de la enzima polifenol oxidasa (PPO) se ve inhibida en diferentes frutas y hortalizas ante tratamientos con UV-C

posiblemente por la agregación de proteínas que se genera. El oscurecimiento de los tejidos puede limitarse por la integridad de estos (pérdida de electrolitos) o por el nivel de la enzima (Moreno et al., 2017).

Objetivos

Objetivo general

Estudiar la desinfección con luz UV-C del mango de variedad ‘Tommy Atkins’ mínimamente procesado mediante simulaciones fundamentadas en la dinámica de fluidos computacional (CFD).

Objetivos específicos

- Estimar *in vitro* e *in vivo* la inactivación de los microorganismos patógenos *Salmonella enterica*, *Listeria monocytogenes* y *Escherichia coli* O157:H7 por la aplicación de luz UV-C.
- Determinar la dosis óptima de luz UV-C para la desinfección del mango de variedad ‘Tommy Atkins’ mínimamente procesado mediante la integración de la dinámica de fluidos computacional.
- Evaluar el efecto de la dosis óptima de luz UV-C en los atributos de calidad y vida útil del mango de variedad ‘Tommy Atkins’ mínimamente procesado durante su almacenamiento.

Capítulo 1: Estudio de la inactivación *in vitro* de microorganismos patógenos

Resumen

La desinfección con luz ultravioleta de onda corta (UV-C) es un proceso emergente propuesto para prevenir enfermedades transmitidas por los alimentos (ETA) mediante la disminución de la carga de patógenos microbianos. En esta investigación, se empleó la dinámica de fluidos computacional (CFD) como herramienta de simulación numérica que permitió la resolución del modelo de radiación de ordenadas discretas (DO) para el análisis de supervivencia a la UV-C de algunos patógenos causantes de ETA (*Eschericha coli* O157:H7, *Salmonella enterica* serovar Typhimurium y *Listeria monocytogenes)*, mediante el cálculo de la intensidad de radiación promedio en la parte superior de suspensiones bacterianas tratadas en una cámara de desinfección por 0, 3, 6, 9, 12 y 15 min a 75 mm de la fuente de radiación. Se obtuvieron los modelos y parámetros cinéticos de inactivación al analizar la supervivencia de los microorganismos usando la ecuación logarítmica lineal y el modelo de Weibull en función de la dosis UV-C (0 – 6,028 kJ/m^2). Los resultados indicaron que la inactivación de *S.* Typhimurium se pudo describir con la ecuación logarítmica lineal y las curvas de supervivencia de *E. coli* O157:H7 y *L. monocytogenes* tuvieron mayor ajuste al modelo de Weibull. Asimismo, estos dos últimos microrganismos se adaptaron rápidamente al estrés generado por la radiación. Los métodos de CFD en integración con los modelos de inactivación microbiana pueden proporcionar referencias para la disminución de la carga bacteriana en alimentos de origen vegetal y para el diseño de procesos a mayor escala.

Palabras clave:

Patógenos alimentarios, Inactivación microbiana, Modelamiento cinético, Dinámica de fluidos computacional, Modelo de radiación ordenadas discretas

Abstract

Shortwave ultraviolet light (UV-C) disinfection is an emerging process proposed to prevent foodborne disease by decreasing the load of microbial pathogens. In this investigation, computational fluid dynamics (CFD) was used as a numerical simulation tool that allowed the resolution of the discrete ordinate (DO) radiation model for the analysis of UV-C survival of some pathogens that cause foodborne disease (*Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella enterica* serovar Typhimurium and *Listeria monocytogenes*), by calculating the average radiation intensity in the upper part of bacterial suspensions treated in a disinfection chamber for 0, 3, 6, 9, 12 and 15 min at 75 mm from the radiation source. The models and kinetic parameters of inactivation were obtained by analyzing the survival of the microorganisms using the log-linear equation and Weibull model as a function of the UV-C dose (0 - 6.028 kJ/m^2). The results indicated that the inactivation *of S.* Typhimurium could be described with the log-linear equation and the survival curves of *E. coli* O157:H7 and *L. monocytogenes* fitted better to Weibull model. Likewise, these last two microorganisms quickly adapted to the stress generated by radiation. CFD methods in integration with microbial inactivation models can provide references for the reduction of foodborne pathogens load on plant food and for the design of larger-scale processes of disinfection.

Keywords:

Foodborne pathogens, Microbial inactivation, Kinetic modeling, Computational fluid dynamics, Discrete ordinates radiation model

1. Introducción

Las enfermedades transmitidas por los alimentos o ETA son causadas por la contaminación de los alimentos por bacterias, virus, parásitos o químicos en cualquier etapa de la cadena de producción, distribución o consumo (WHO, 2018). Es común que dichas enfermedades se manifiesten con problemas gastrointestinales después de la ingesta de los alimentos contaminados, aunque se pueden producir otros diagnósticos más persistentes o incluso la muerte (WHO, 2020). En general, los patógenos que causan las ETA son de origen animal y la contaminación con dichos microorganismos se produce debido a las malas prácticas agrícolas (contacto con heces fecales, agua y suelo no

tratado), y a la poca higiene en las instalaciones de procesamiento (Chlebicz & Śliżewska, 2018).

Entre los principales agentes etiológicos de origen bacteriano causantes de brotes por el consumo de alimentos de origen vegetal contaminados se destacan *Escherichia coli*, *Salmonella enterica* serovar Typhimurium (no tifoidea) y *Listeria monocytogenes* (Chun et al., 2010; Jeon & Ha, 2018). Recientemente, la FDA publicó un aviso para anunciar que productos como manzanas, uvas, piñas y melones cortados o rebanados vendidos en supermercados tenían el potencial de estar contaminados con *Listeria monocytogenes* (U.S. Food and Drugs Administration, 2020). Yang et al. (2020) encontraron la prevalencia de *Salmonella* en vegetales crudos. Los vegetales de hojas mostraron las mayores tasas de contaminación y todos los serovares identificados habían sido previamente relacionados con brotes de enfermedades. Luna-Guevara et al. (2019) reportaron que la mayoría de los vehículos causantes de brotes de *E. coli* O157:H7 desde 2010 hasta 2018 fueron hojas verdes, alfalfa, coles, y ensaladas listas para el consumo.

Los métodos tradicionales para reducir la carga microbiana y llevar a cabo la operación de desinfección consisten en el uso de compuestos clorados de bajo costo, los cuales poseen alta eficiencia contra un amplio espectro de microorganismos. Sin embargo, la principal desventaja es que dichas soluciones en las que se emplea agua como disolvente, promueven la formación de compuestos cancerígenos y contaminantes (Hinojosa et al., 2013). Consecuentemente, se han desarrollado tecnologías alternativas para llevar a cabo la inactivación microbiana, incluyendo la aplicación de la radiación ultravioleta de onda corta (UV-C). La UV-C comprende un rango de longitud de onda entre 100 a 280 nm, cercano al pico de absorción del ADN de la mayoría de los microorganismos, lo que genera un efecto microbicida (Shama, 2007). Previamente, se han reportado investigaciones en las que se ha aplicado la luz UV-C para la inactivación de microorganismos patógenos humanos, principalmente *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium y *L.* monocytogenes en inóculos o suspensiones bacterianas. De esta forma, se ha evaluado el efecto y la eficacia de la luz UV-C en la supervivencia de dichos patógenos, se ha ampliado la comprensión de las variables involucradas en el proceso de desinfección con la radiación UV-C y se han calculado parámetros cinéticos útiles para definir con mayor precisión las dosis de UV-C requeridas para inactivar los patógenos en diferentes superficies o materiales (Chang et al., 1985; Chun et al., 2010; Jeon & Ha, 2018).

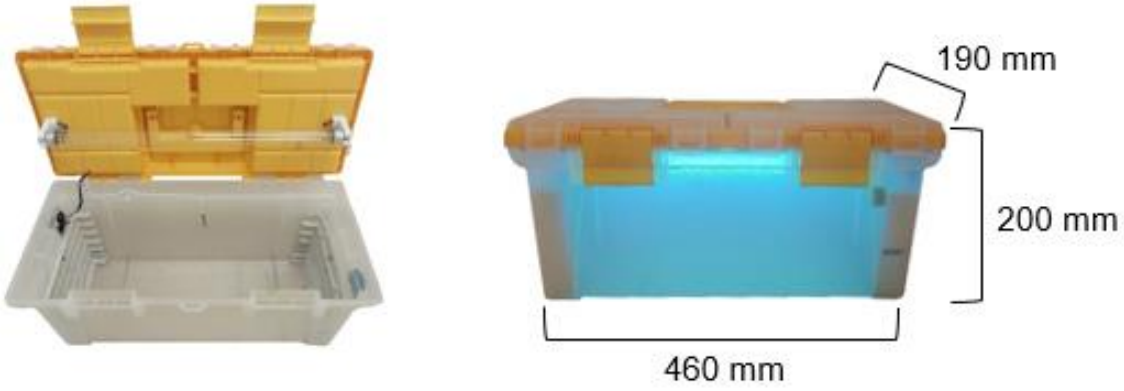
Una de las herramientas de simulación numérica para resolver modelos de radiación que se puede utilizar para evaluar la intensidad de la radiación durante el proceso de inactivación con UV-C de microorganismos es la dinámica de fluidos computacional (CFD) (Koutchma et al., 2009). La CFD permite describir el flujo de cualquier fluido mediante ecuaciones derivadas del balance de masa, momento y energía (Norton & Sun, 2007). Según Anandharamakrishnan (2013), el análisis con CFD implica tres etapas principales. La primera etapa es el preprocesamiento, que incluye la definición del problema, la creación de la geometría con la ayuda de un programa de diseño CAD, el mallado y la generación de un modelo computacional. En la segunda etapa o procesamiento, se utiliza una computadora para resolver las ecuaciones matemáticas del flujo de fluido. En la fase final (postprocesamiento) se evalúan y visualizan los datos generados por el análisis y se validan los resultados de la simulación con los datos experimentales. En investigaciones previas, la resolución del modelo de radiación de ordenadas discretas (DO) mediante CFD fue útil para describir la inactivación con UV-C de mohos *Cladosporium cladosporiodes* y *Penicillium digitatum*, los cuales causan pudrición en la poscosecha de frutas y hortalizas (Trivittayasil et al., 2015). Sin embargo, no se reportan estudios en los que se emplee la CFD para evaluar la reducción con UV-C de bacterias causantes de ETA. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue estimar la supervivencia *in vitro* a la UV-C de los microorganismos patógenos *E. coli* O157:H7, *Salmonella enterica* serovar Typhimurium y *Listeria monocytogenes* usando la dinámica de fluidos computacional.

2. Materiales y métodos

2.1. Equipo para el tratamiento con luz UV-C

La cámara de desinfección que se utilizó para llevar a cabo los tratamientos con radiación UV-C consistió en un prototipo portátil, económico y útil para investigar sobre la conservación de alimentos, el cual tenía una lámpara UV de 15 W (G15T8, Lumiaction Co., Taipei, TW) ubicada a 146 mm de la base (Rodríguez-Mijangos et al., 2014) (Figura 1-1). El prototipo mencionado se modificó agregando dos barras cuadradas de aluminio de 25,4 mm de diámetro separadas a 34,6 mm, para disponer las muestras y la intensidad de la radiación se monitoreó con un UV metro (UVC-254, Lutron Electronic Enterprise Co., Taipei, TW).

Figura 1-1: Cámara de desinfección.



2.2. Cepas bacterianas y medios

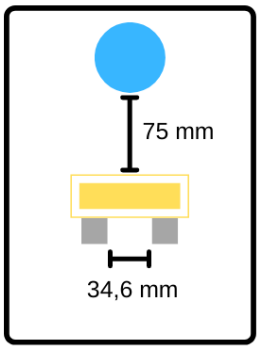
Se emplearon cepas de *E. coli* O157:H7 (ATCC 43895), *Salmonella enterica* serovar Typhimurium (ATCC 14028) y *Listeria monocytogenes* (ATCC 7644). De acuerdo con Ruiz-Cruz et al. (2007), el cultivo de bacterias se llevó a cabo por separado en 3 mL de caldo tripticasa soya y se incubó durante la noche a 37 °C (Incubator IC400, Yamato Scientific, Tokyo, KNTO, JPN). Para obtener un cultivo puro, las células bacterianas de *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium y *L. monocytogenes* se sembraron en los agares MacConkey Sorbitol (Difco, Sparks, MD, USA), Bismuto Sulfito (Difco, Sparks, MD, USA) y Oxford (Condalab, Madrid, CM, ES) respectivamente, y las placas se incubaron 24 h a 37 °C. Las células de los microorganismos se encontraban en una fase exponencial de crecimiento. Para cada microorganismo, se inoculó una colonia de las placas en 9 mL de agua peptonada (AP; Difco, Sparks, MD, USA) al 2,3% (23 g/1000 mL) y la población de esta suspensión inicial se ajustó a $1,5 \times 10^8$ células/mL mediante el estándar de turbidez McFarland (Karpiński & Adamczak, 2019). Para estimar la supervivencia *in vitro* de los microorganismos, se obtuvo otra suspensión de aproximadamente 5×10^5 células/mL incorporando 0,5 mL de suspensión bacteriana inicial en 150 mL de AP al 2,3%.

2.3. Condiciones para la estimación de la cinética de inactivación *in vitro*

Cada suspensión bacteriana se distribuyó en seis placas de Petri de 90 mm de diámetro para evaluar diferentes tratamientos con luz UV-C. Las placas se llenaron a una altura de

50 mm y se irradiaron una por una durante 0, 3, 6, 9, 12 y 15 minutos a 75 mm de la lámpara UV-C, y en la mitad de la cámara de desinfección, siguiendo la metodología de Chun et al. (2010) con algunas modificaciones. Después de los tratamientos, se realizaron diluciones decimales de las muestras con AP al 2,3%, y las alícuotas (1 mL) se pusieron en placas con agares MacConkey Sorbitol, Bismuto Sulfito y Oxford para *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium y *L. monocytogenes*, respectivamente. Las placas se incubaron a 37 °C durante 24-48 h y se enumeró la población de bacterias.

Figura 1-2: Vista lateral del ajuste dentro de la cámara de desinfección para el tratamiento con UV-C de las suspensiones bacterianas.



2.4. Modelos de cinética de inactivación UV-C

La ecuación logarítmica lineal (Ecuación 7) es el modelo más simple que describe la cinética de inactivación cuando la población de microorganismos tiene la misma sensibilidad al tratamiento y que existe una correlación negativa y lineal entre el recuento celular y la tasa de inactivación (Bevilacqua et al., 2015; Geeraerd et al., 2005)

$$\log_{10}\left(\frac{N}{N_0}\right) = -\frac{kt}{2{,}303} \qquad (7)$$

donde N y N_0 son el recuento de población a lo largo del tiempo y el recuento de población inicial, respectivamente, k es la tasa de inactivación (s^{-1}), t es el tiempo de tratamiento (s) y el valor de 2,303 corresponde a ln(10), es decir, estimado en 1 ciclo logarítmico. De acuerdo con Trivittayasil et al. (2015), la inactivación microbiana en función de la dosis de UV-C se considera en términos de intensidad de radiación y tiempo de exposición, por lo

que la intensidad de radiación promedio en la superficie superior de la suspensión bacteriana se incorporó en la Ecuación 7 como sigue.

$$\log_{10}\left(\frac{N}{N_0}\right) = -\frac{k'It}{2{,}303} \quad (8)$$

donde k' es la tasa de inactivación modificada (m^2/kJ) e I es la intensidad de radiación promedio en la superficie de suspensión bacteriana (kW/m^2) que se obtuvo mediante simulación con CFD.

Otra ecuación que explica la inactivación de microorganismos es el modelo de Weibull (Ecuación 9). Consiste en la forma acumulativa de la función de densidad de probabilidad de Weibull asimétrica (Geeraerd et al., 2005), e indica el número de células que pueden adaptarse al estrés, o aquellas que tienen un daño con un tratamiento microbicida (Trivittayasil et al., 2015; van Boekel, 2008).

$$\log_{10}\left(\frac{N}{N_0}\right) = -\frac{1}{2{,}303}\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta} \quad (9)$$

donde α modifica la pendiente y es un parámetro de escala, mientras que β describe la forma de la curva (β <1 se refiere a una curva cóncava y β > 1 alude a una curva convexa). El modelo de Weibull también se describe en términos de dosis de UV-C modificando las unidades del parámetro de escala (Ecuación 10) (Trivittayasil et al., 2015).

$$\log_{10}\left(\frac{N}{N_0}\right) = -\frac{1}{2{,}303}\left(\frac{It}{\alpha'}\right)^{\beta} \quad (10)$$

donde α' es el parámetro de escala modificado (kJ/m^2).

2.5. Análisis estadístico para el modelamiento cinético

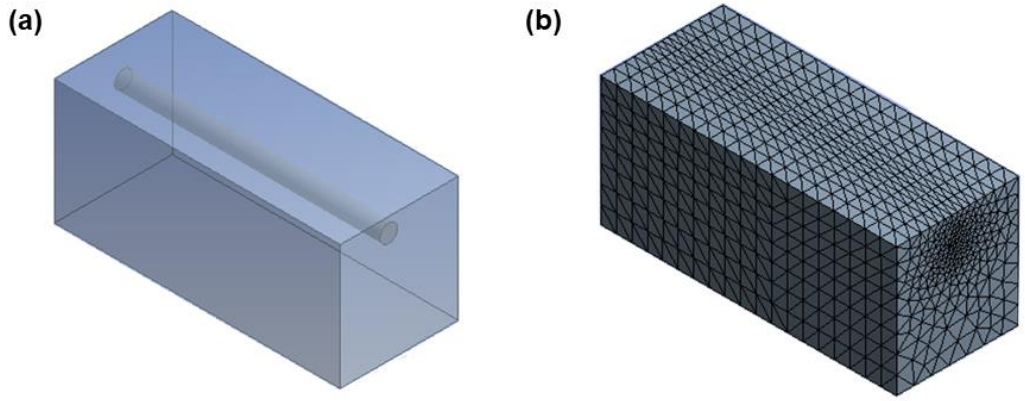
Los experimentos se realizaron con seis dosis diferentes, dos réplicas por cada suspensión bacteriana y tres placas de cada dilución. Se empleó un ANOVA de un factor y una prueba Tukey para determinar si existían diferencias significativas en la población de cada patógeno a los distintos tiempos de tratamiento con UV-C ($p<0{,}05$). Los parámetros de inactivación se obtuvieron con el promedio de las reducciones logarítmicas de los datos de población microbiana durante el tratamiento con UV-C, empleando los métodos mínimos cuadrados lineales y no lineales con la resolución del algoritmo de Gauss-Newton (número

máximo de iteraciones de 200 y una tolerancia de convergencia de 0,00001) para la ecuación logarítmica lineal y el modelo de Weibull en función de la dosis UV-C, respectivamente. El ajuste de los modelos se evaluó calculando la raíz del error cuadrático medio (RMSE), el coeficiente de determinación (R^2), el coeficiente de determinación ajustado ($\overline{R}^2$) y el error estándar de la regresión (S). Todos los análisis estadísticos se desarrollaron en Minitab 17 (Minitab Inc., State College, PA, USA).

2.6. Simulación con CFD

Se creó una geometría del equipo sin ningún accesorio en DesignModeler (Academic Student versión 2020 R1, ANSYS Inc., San José, CA, USA) para validar el modelo de radiación y calcular la intensidad de radiación promedio en la parte superior de las suspensiones bacterianas (Figura 1-3(a)). El mallado de la geometría del equipo se generó en Meshing (Academic Student versión 2020 R1, ANSYS Inc., San José, CA, USA). La calidad de la malla se eligió como alta y se incluyó tanto una discretización tetraédrica en todas las paredes de la cámara de desinfección, como un mallado de cara en las paredes de mayor área (Figura 1-3(b)). El número de elementos de malla fue de 130.379.

Figura 1-3: Geometría (a) y mallado (b) de la cámara de desinfección.



Se siguió la metodología reportada por Trivittayasil et al. (2015, 2016) para el procesamiento con CFD. En Fluent (Academic Student versión 2020 R1, ANSYS Inc., San José, CA, USA), se empleó el modelo de radiación DO para resolver la ecuación de transferencia radiativa (RTE) mediante una discretización del ángulo sólido con divisiones theta y phi de 10 × 10 y píxeles theta y phi de 3 × 3. Las ecuaciones de estado de continuidad, momento y energía para un flujo laminar incompresible fueron resueltas para

las geometrías del sistema. Para las condiciones de frontera, se consideró como 30,5 W/m^2 la intensidad de radiación promedio en la lámpara, la cual fue medida en el tubo de la lámpara. La emisividad de la lámpara fue 0,89 y de 0,95 para las paredes del equipo. La fracción difusa de la pared semitransparente de la lámpara fue 1 y de las demás paredes 0,5. El volumen dentro de la lámpara se dejó en blanco. La ecuación de régimen estacionario fue resuelta con el algoritmo SIMPLE y la discretización espacial se resolvió por un método de esquema de ceñida de primer orden para el modelo DO. Para el dominio computacional, la temperatura del fluido se redujo a 10 K para minimizar el efecto de la radiación térmica. El número de iteraciones fue 18. El tiempo promedio para alcanzar la convergencia fue de 276,598 s. La simulación se llevó a cabo en un Intel Core TM i5-1035G1 CPU (1.19 GHz) con 8 GB de RAM.

2.7. Validación del modelo de radiación

Para validar los métodos de simulación computacional, la intensidad de la radiación se estimó utilizando el UV metro y el *software Fluent* en diferentes puntos ubicados en el centro del equipo a una distancia entre 14 y 122 mm de la lámpara, y cada 60 mm en la parte media del equipo, a una distancia de 122 mm de la fuente de radiación. El ajuste del modelo de radiación DO se estableció mediante el cálculo del error absoluto medio (MAE) (Ecuación 11), el coeficiente de determinación (R^2) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) entre los datos obtenidos experimentalmente y los resultados de la simulación, de acuerdo con lo reportado por He et al. (2018).

$$MAE = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}|x_{si} - x_{mi}| \quad (11)$$

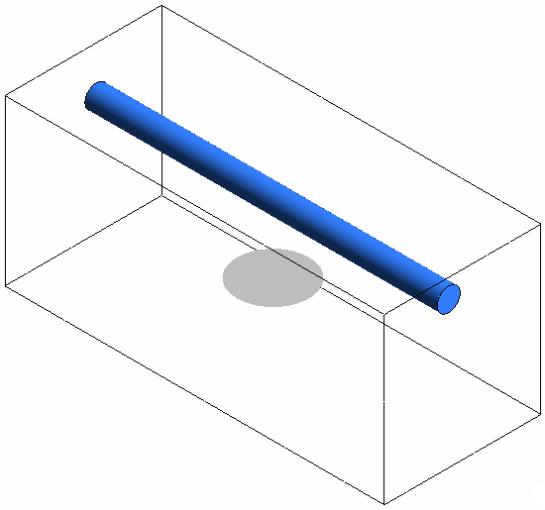
donde m es el número de determinaciones, x_{si} es el valor hallado en la simulación y x_{mi} es el valor medido con el UV-metro.

2.8. Análisis de datos

Las dosis de tratamiento con UV-C se calcularon como el producto de los tiempos de tratamiento y de la intensidad de radiación promedio en la parte superior de las suspensiones bacterianas que se obtuvo en el postprocesamiento de la simulación con el software CFD-Post (Academic Student versión 2020 R1, ANSYS Inc., San José, CA, USA) añadiendo un plano circular dentro de la geometría de la cámara (Figura 1-4). Con las curvas de supervivencia *in vitro* en función de la dosis y la reducción logarítmica de los

microorganismos *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium y *L. monocytogenes* se determinaron los parámetros cinéticos de la ecuación logarítmica lineal y el modelo de Weibull necesarios para el Capítulo 2.

Figura 1-4: Cámara de desinfección durante el postprocesamiento de la simulación con el plano circular para el cálculo de la intensidad de radiación promedio en la parte superior de las suspensiones bacterianas.



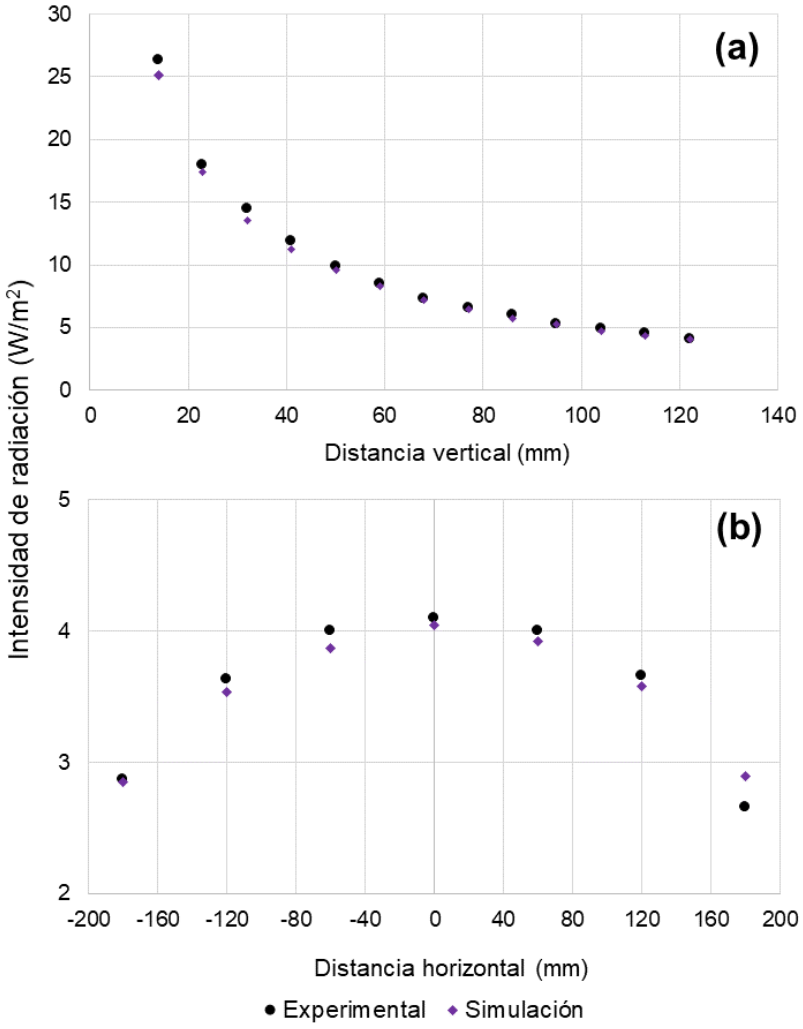
3. Resultados y discusión

3.1. Validación del modelo de radiación

Los valores de intensidad de radiación predichos por la simulación CFD se compararon con las mediciones realizadas con el medidor de UV-C en la cámara de desinfección. En general, tanto horizontal como verticalmente, los valores experimentales fueron un poco mayores que las predicciones de la simulación (Figura 1-5). El MAE, RMSE y R^2 para las estimaciones realizadas horizontalmente fueron 0,099, 0,118 y 0,975, respectivamente, y para las estimaciones realizadas verticalmente fueron 0,371, 0,508 y 0,999, respectivamente. Los resultados indicaron que el MAE y RMSE fueron menores para los datos de los puntos localizados horizontalmente en el equipo, mientras que el R^2 fue mayor para los datos de las determinaciones realizadas verticalmente. No obstante, todos los valores del R^2 se aproximaron a 1, y en cuanto el MAE y el RMSE se aproximaron a 0, más cerca estuvieron los valores de la simulación a las mediciones. Por lo tanto, se comprobó

que el modelo de ordenadas discretas (DO) era útil para predecir el comportamiento de la radiación UV-C en la cámara de desinfección.

Figura 1-5: Intensidad de radiación experimental y simulada en puntos verticales (a) y horizontales (b) dentro de la cámara de desinfección para la validación del modelo de radiación de ordenadas discretas.



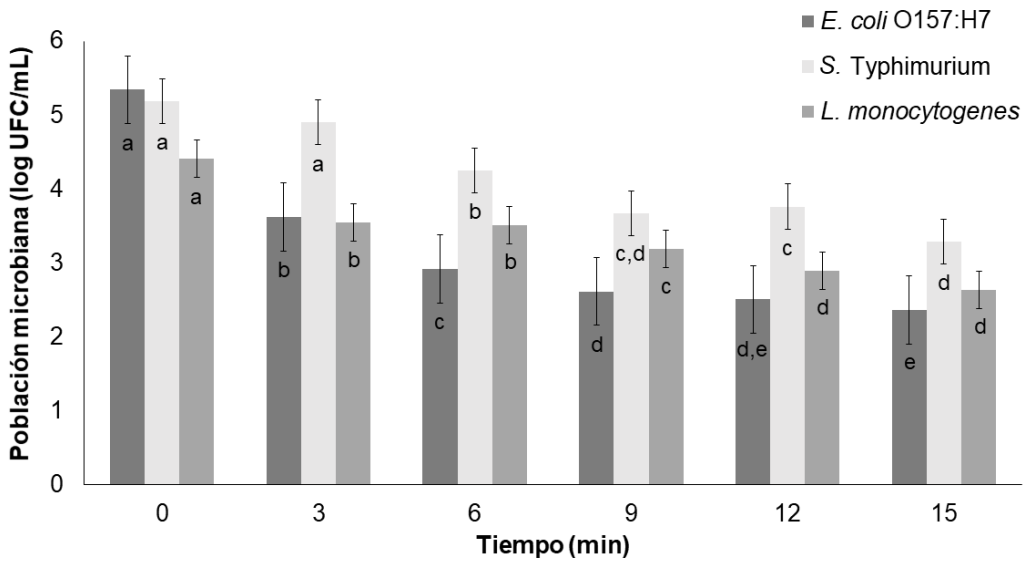
Trivittayasil et al. (2015) validaron de forma teórica el modelo de radiación de ordenadas discretas y lo utilizaron para simular la inactivación de *C. cladosporiodes* y *P. digitatum* en agar a diferentes a diferentes distancias de la lámpara (50, 100, 150 y 200 mm) y tiempos (0, 5, 10, 15, 20, 25 y 30 min). Trivittayasil et al. (2016) emplearon las mediciones del UV metro y ecuaciones matemáticas para calcular la intensidad UV en el centro del equipo para validar el modelo DO y efectuar la simulación con CFD de la distribución de la

intensidad de radiación y la inactivación de mohos en la superficie de fresas dispuestas en una bandeja. Tanaka et al. (2016) desarrollaron un modelo de irradiación tridimensional basado en el método de ordenadas discretas para describir la distribución de la dosis UV-C y la inactivación de mohos en fresas dispuestas en una banda transportadora empleada para tratamientos de desinfección. El modelo DO permitió predecir la distribución de la intensidad de radiación UV-C y la inactivación de *P. digitatum* en fresas, variando los arreglos de las lámparas UV y los reflectores para alcanzar mayor uniformidad durante la irradiación en una banda transportadora (Kingwascharapong et al., 2020). Atilgan et al. (2021) también recomiendan la CFD junto al modelo de radiación de ordenadas discretas (DO) y advierten de la importancia de los estudios citados previamente para el modelamiento matemático del procesamiento con UV-C de alimentos.

3.2. Eficacia de la luz UV-C en la reducción de los patógenos

La población inicial de *E. coli* O157:H7, *S. Typhimurium* y *L. monocytogenes* en las suspensiones bacterianas fue de 5,343, 5,188 y 4,406 log UFC/mL, respectivamente. Después de efectuarse el tratamiento a las suspensiones bacterianas con UV-C, se alcanzó una reducción de 2,978, 1,895 y 1,767 log UFC/mL, respectivamente para los microorganismos previamente mencionados. Tal como lo reportaron Jeon & Ha (2018), la luz UV-C mostró una inactivación microbiana limitada en AP (<3 log UFC/mL) debido al alto nivel de absorción de la radiación UV de la solución de AP. Koutchma et al. (2009) indicaron que la absorbancia a la UV-C de la solución influencia la eficiencia de la dosis aplicada. Por lo tanto, la eficiencia del tratamiento con UV-C disminuyó por la poca penetración de la radiación y la incidencia de la radiación fue prácticamente superficial. Fenoglio et al. (2020) encontraron que la presencia de sólidos en una suspensión microbiana con alta absorción de UV disminuye el impacto de los fotones en los microorganismos. De esta forma, la peptona en las suspensiones pudo proveer un escudo efectivo para los microorganismos durante el tratamiento con UV-C dada su alta porosidad y dispersión de la radiación. La altura de las suspensiones microbianas en las placas también pudo reducir la eficacia de la luz UV-C. Kaya et al. (2020) notaron que al exponer el zumo de uva a una distancia cercana de la fuente de radiación y en una capa más fina obtenían mayor reducción de *Saccharomyces cerevisiae* con la luz pulsada.

Figura 1-6: Comportamiento de la población de *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium y *L. monocytogenes* durante el tratamiento con UV-C. Las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado. Las distintas letras en minúscula en las barras indican diferencias significativas entre las medias en la población microbiana (Tukey, α= 0,05).



En la Figura 1-6, se observa que el tratamiento con UV-C provocó una reducción significativa en la población de los microorganismos de estudio cuando comparadas con las poblaciones iniciales en el tiempo 0 min ($p<0,05$). La irradiación hasta por 9 min de las suspensiones bacterianas provocó la mayor tasa de inactivación, con una reducción de 2,727, 1,517 y 1,217 log UFC/mL de *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium y *L. monocytogenes*, respectivamente. Posteriormente, todos los microorganismos exhibieron tolerancia a la luz UV-C. Los resultados también sugieren que *L. monocytogenes* fue el microorganismo más resistente a la radiación UV-C, ya que es una bacteria Grampositiva y posee una capa externa de peptidoglicano que cumple la función de barrera. Dicha capa gruesa y densa de peptidoglicano y los polímeros como los ácidos teicurónico y teicoico dificultan la penetración de los fotones ultravioleta en la pared celular y fomentan la resistencia a la irradiación (Liu et al., 2021). Además, *L. monocytogenes* tiene la capacidad de formar biopelículas, las cuales consisten en la agregación de microorganismos rodeados por una matriz que está compuesta por una mezcla de sustancias extracelulares poliméricas que permiten la adaptación al estrés o a los tratamientos microbicidas (Law et al., 2015). *S.* Typhimurium fue el segundo microorganismo con mayor resistencia ya que a diferencia *de E. coli* O157:H7 y similar a *L. monocytogenes*, puede formar biopelículas que contribuyen

a la supervivencia del microorganismo en ambientes hostiles (Barreto et al., 2016). Yoon et al. (2019) prepararon soluciones bacterianas de *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium y *L. monocytogenes* con caldo tripticasa soya sin dextrosa y las cargaron en un termoresistometro para un tratamiento de inactivación no isotérmico a diferentes tasas de calentamiento (1,5, 3, 4,5, 6, 7,5, y 9 °C/min). Los microorganismos mostraron una respuesta adaptativa al tratamiento no isotérmico. *L. monocytogenes* fue también la menos sensible al tratamiento y su termotolerancia aumentó lentamente con las tasas de calentamiento. La tolerancia al calentamiento de las bacterias durante el tratamiento térmico pudo estar influenciada por los parámetros extrínsecos (temperatura y tiempo), y los factores ambientales (pH, actividad de agua y composición del disolvente).

3.3. Modelos de cinética de inactivación UV-C

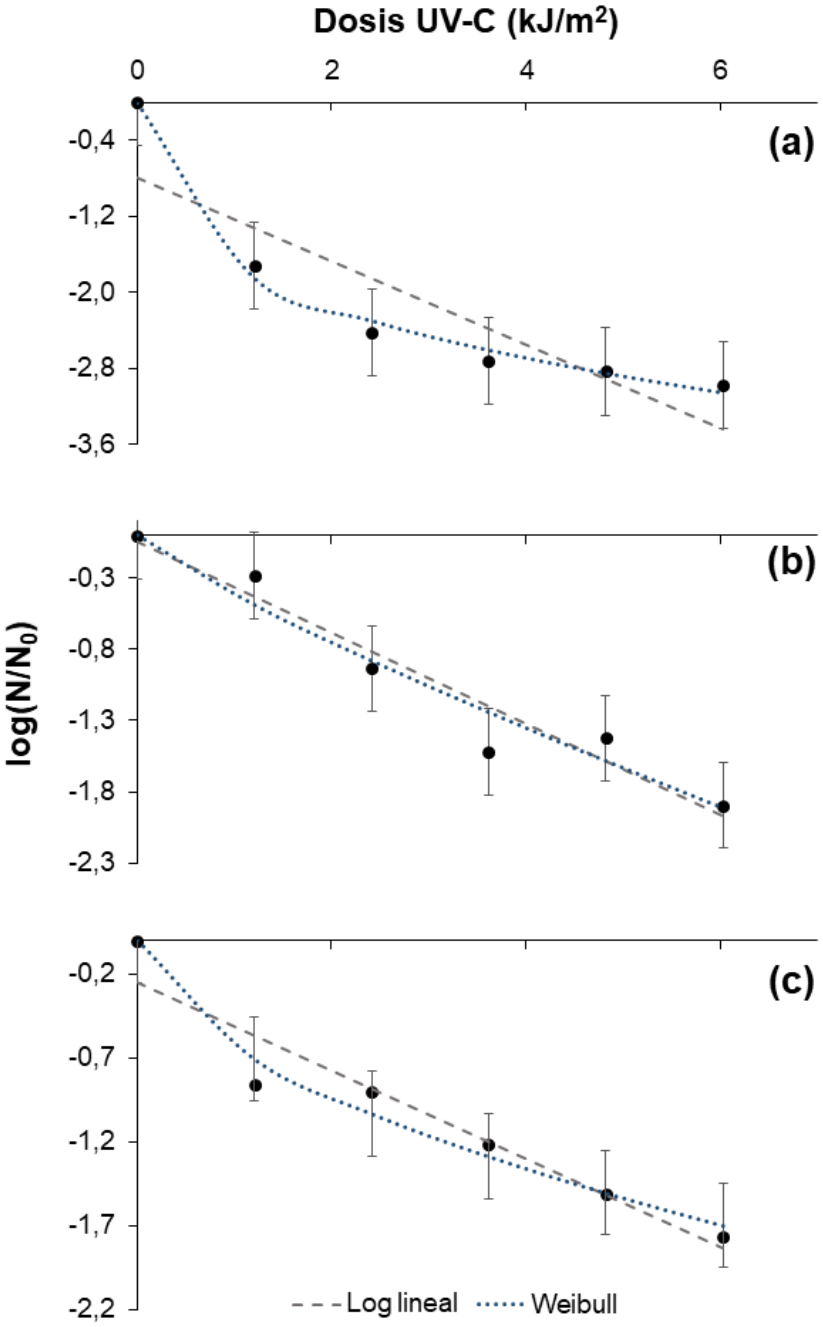
De acuerdo con el postprocesamiento de la simulación con CFD, la intensidad de radiación promedio en la parte superior de las suspensiones bacterianas fue de 6,698 W/m^2. Este valor permitió estimar las dosis de tratamiento de UV-C (0, 1,206, 2,411, 3,617, 4,822 y 6,028 kJ/m^2) y trazar las curvas de supervivencia para *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium y *L. monocytogenes*, las cuales se muestran en la Figura 1-7. Se consideraron la ecuación logarítmica lineal y el modelo de Weibull para analizar la inactivación de los microorganismos y calcular los parámetros cinéticos (Tabla 1-1). Se observó que para ambos modelos los valores de R^2 y $\overline{R}^2$ fueron próximos a 1 y los valores de RMSE se acercaron a 0. No obstante, con los valores más bajos de S y más altos de R^2 y $\overline{R}^2$se determinó que la ecuación logarítmica lineal pudo describir la inactivación de *S.* Typhimurium, y el modelo de Weibull pudo explicar la supervivencia de *E. coli* O157:H7 y *L. monocytogenes*. Chun et al. (2010) expusieron individualmente inóculos *de E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium y *L. monocytogenes* preparados con AP al 0,1 % a diferentes dosis de UV-C (1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 y 18 J/m^2), y determinaron que la inactivación de todos los microorganismos se ajustaba al modelo de Weibull. Jeon & Ha (2018) suspendieron células de *E. coli*, *S*. Typhimurium y *L. monocytogenes* en AP al 0,2 % formando un coctel, el cual fue irradiado con dosis de UV-C de 0, 10, 30 y 40 J/m^2. Al igual que en el presente estudio, la curva de supervivencia de *L. monocytogenes* mostró un patrón de hombro, la inactivación de *S.* Typhimurium se ajustó a un modelo logarítmico lineal y este último microorganismo también se mostró más resistente a la radiación UV en comparación a *E. coli*. Buosi et al. (2022) dispusieron inóculos de diferentes serotipos de

Salmonella enterica (Typhimurium, Enteriditis, Heidelberg y Minnesota) en la superficie de placas con agar tripticasa soya, y las expusieron a pulsos de luz variando diferentes parámetros del tratamiento como el voltaje del equipo (2000 a 3000 V), ancho de pulso (50 a 420 µs), fluencia (58 mJ/cm^2) e irradiancia (W/cm^2). Al final del tratamiento previamente descrito, la curva de supervivencia del serotipo Typhimurium fue la que mayor ajuste presentó a la ecuación logarítmica lineal. Preetha et al. (2021) inocularon *E. coli* en agua de coco y jugos de naranja y piña, y trataron estas bebidas con un sistema de luz pulsada de flujo continuo con una tasa de fluencia de 0,18, 2 y 5,6 W/cm^2 y tiempos de exposición entre 0 y 15 s. Se evidenció en dicha investigación que las cinéticas de inactivación del microorganismo tenían mayor ajuste al modelo de Weibull y que el tratamiento fue más efectivo en las bebidas transparentes. Por lo contrario, Zhou et al. (2017) encontraron que la inactivación de *E. coli* se ajustó al modelo lineal de primer orden al irradiar con LED UV-C (0, 5, 10, 15, 20, 25, and 30 mJ/cm^2) inóculos de dicho microorganismo preparados con agua desionizada, suspensión de caolín y efluentes secundarios de la planta de tratamiento de aguas residuales. John & Ramaswamy (2020) sometieron suspensiones de *E. coli* K-12 a un tratamiento de luz pulsada a distintas distancias entre 1,9 y 14,6 cm de la fuente de luz por hasta 5 s (15 pulsos), y encontraron que las curvas de inactivación para esta bacteria se ajustaban a la ecuación logarítmica lineal debido a su naturaleza vegetativa. Las diferencias en los resultados de las investigaciones citadas podrían deberse a las distintas cepas, a la composición del disolvente, y a la cantidad de radiación que incidió en los inóculos.

Tabla 1-1: Parámetros de ajuste y cinéticos de los modelos de inactivación *in vitro* de *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium y *L*. *monocytogenes* en función de la dosis UV-C (0 kJ/m^2 - 6,028 kJ/m^2).

Microorganismo	Modelo	Parámetros de ajuste				Parámetros cinéticos
		R^2	$\overline{R}^2$	RMSE	S	
E. coli O157:H7	Logarítmico lineal	0,771	0,714	0,493	0,603	k'= 1,011 m^2/kJ
	Weibull	0,987	0,984	0,094	0,133	α'=0,011 kJ/m^2 β = 0,312
S. Typhimurium	Logarítmico lineal	0,939	0,923	0,168	0,206	k'= 0,736 m^2/kJ
	Weibull	0,907	0,884	0,156	0,221	α'=1,044 kJ/m^2 β = 0,846
L. monocytogenes	Logarítmico lineal	0,92	0,900	0,160	0,196	k'= 0,606 m^2/kJ
	Weibull	0,994	0,993	0,091	0,129	α'=0,489 kJ/m^2 β = 0,543

Figura 1-7: Curva de supervivencia en función de la dosis UV-C de *E. coli* O157:H7 (a), *S.* Typhimurium (b) y *L. monocytogenes* (c) ajustada a la ecuación logarítmica lineal y al modelo de Weibull (líneas punteadas). Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado.



Las curvas de supervivencia de *E. coli* O157:H7 y *L. monocytogenes* fueron cóncavas y considerando que el factor de forma (β) fue menor a 1, las células pudieron rápidamente adaptarse al estrés aplicado en forma de radiación (van Boekel, 2002). Virto et al. (2006) trataron suspensiones de *E. coli* y *L. monocytogenes* con ácido láctico (1-60 mL/L), a diferentes temperaturas (4, 20 y 40 °C) y por tiempos que iban desde 5 s a 60 min. Los autores encontraron que la inactivación de los microorganismos se ajustaba al modelo de Weibull con una curva de supervivencia cóncava hacia arriba y hacia abajo respectivamente. Aunque el comportamiento de la curva de *E. coli* fue similar a la que se muestra en el presente estudio, el reporte citado expuso una mayor reducción de unidades logarítmicas debido a que el enriquecimiento de la suspensión bacteriana con peptona fue menor y a la acción eficaz del agente microbicida. Por otra parte, la tolerancia a la UV-C pudo ser adquirida por la acción de la fotoliasa. El daño del ADN inducido por los rayos UV desencadena la formación de dímeros de pirimidina de ciclobutano (CPD) y fotoproductos de 6-4 pirimidina-pirimidona, lo que provoca principalmente la inhibición de la replicación, transcripción y mutación del ADN, y conduce a la muerte celular (Kavakli et al., 2019). Estos efectos se revierten mediante la fotorreactivación y el proceso es catalizado por la fotoliasa, que posee un surco cargado positivamente para unir los grupos de ADN fosfodiéster con CPD o 6-4 fotoproductos (Thompson & Sancar, 2002). La fotorreactivación ocurrió posiblemente por las condiciones de muestreo e incubación. De acuerdo con Quek & Hu (2008a), la fotorreactivación de *E. coli* aumentó después del tratamiento de los inóculos de dos serovares con lámparas de radiación ultravioleta de baja presión (254 nm) y media presión (200-600 nm) debido al incremento de la intensidad de la luz fluorescente y la exposición a temperaturas óptimas de crecimiento (23-37 °C). Xu et al. (2015) confirmaron que la fotorreactivación de *E. coli* fue afectada por temperaturas mayores o iguales a 37 °C, ya que la desnaturalización de la fotoliasa activa ocurre a dichas temperaturas. Quek & Hu (2008b) encontraron que la fotorreactivación de *E. coli* dependió de la cepa y que la reparación logarítmica fluctuó entre 10 a 85% y 13 a 28% después de la irradiación de los inóculos con lámparas UV de media y baja presión, respectivamente. Al evaluar la reparación de los dímeros del ADN microbiano mediante un ensayo de sitio sensible a endonucleasa, estos autores notaron que el serovar enterohemorrágico presentó los niveles más bajos de reparación en comparación con otros serovares y que las longitudes moleculares del ADN no se repararon totalmente. Lasagabaster & Martínez de Marañón (2017) reportaron que *L. monocytogenes* y *Listeria innocua* tenían la capacidad de fotoreparar parcialmente su ADN después de tratar células suspendidas en

un buffer salino de fosfato de potasio con luz pulsada (0- 0.316 J/cm^2). Se observó que los niveles de fotorreactivación aumentaron de 0,2 a 2,1 log CFU/cm^2 con el incremento de la intensidad del tratamiento, las diferentes cepas y las condiciones de iluminación.

Como resultado más importante y nuevo aporte al conocimiento científico derivado en este capítulo, se establecen los modelos de inactivación recomendados en función de la dosis UV-C para la estimación de de la reducción logarítmica de *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium y *L. monocytogenes*,, con las variables t es el tiempo de tratamiento en s, I es la intensidad de radiación promedio en la superficie de suspensión bacteriana (kW/m^2), k' la tasa de inactivación modificada (m^2/kJ) para la ecuación logarítmica lineal, y los parámetros de escala (α, kJ/m^2) y de forma (β) para el modelo de Weibull. Para la inactivación de *S.* Typhimurium se recomienda el uso de la ecuación logarítmica lineal (Ecuación 8) y para *E. coli* O157:H7 y *L. monocytogenes* sería la Ecuación 10. De esta forma, los respectivos modelos cinéticos reordenados son los siguientes.

Tabla 1-2: Modelos de inactivación *in vitro* de *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium y *L. monocytogenes* en función de la dosis UV-C (0 kJ/m^2 - 6,028 kJ/m^2).

Microorganismo	Modelo cinético
E. coli O157:H7	$\log_{10}\left(\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{N}_0}\right) = -\frac{1}{2{,}303}\left(\frac{\mathrm{It}}{0{,}011}\right)^{0{,}312}$
S. Typhimurium	$\log_{10}\left(\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{N}_0}\right) = -\frac{0{,}736\ \mathrm{It}}{2{,}303}$
L. monocytogenes	$\log_{10}\left(\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{N}_0}\right) = -\frac{1}{2{,}303}\left(\frac{\mathrm{It}}{0{,}489}\right)^{0{,}543}$

4. Conclusiones

El modelo de radiación de ordenadas discretas (DO) utilizado en la simulación con CFD fue validado experimentalmente para poder estimar de forma confiable la supervivencia de *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium y *L. monocytogenes in vitro* al aplicar la luz UV-C como técnica de desinfección. El modelo cinético de inactivación en función de la dosis de UV-*C de S. Typhimurium* fue explicado por la siguiente ecuación logarítmica lineal $log_{10}\left(\frac{N}{N_0}\right) = -\frac{0{,}736\ It}{2{,}303}$, ya para las poblaciones de *E. coli* O157:H7 y *L. monocytogenes*

fueron descritos por el modelo de Weibull con las ecuaciones $\log_{10}\left(\frac{N}{N_0}\right) = -\frac{1}{2.303}\left(\frac{It}{0{,}011}\right)^{0{,}312}$ y $\log_{10}\left(\frac{N}{N_0}\right) = -\frac{1}{2.303}\left(\frac{It}{0{,}489}\right)^{0{,}543}$, respectivamente. Las poblaciones de *E. coli* O157:H7 y *L. monocytogenes* presentaron una importante adaptación al estrés generado por la radiación UV-C. Los parámetros cinéticos estimados son útiles para predecir futuros tratamientos con radiación de luz UV-C, aunque son necesarias más investigaciones para determinar si la inactivación de los microrganismos varía significativamente en equipos de mayor escala y en superficies de los alimentos de origen vegetal.

Referencias

Anandharamakrishnan, C. (2013). Computational fluid dynamics applications in food processing. In *Computational fluid dynamics applications in food processing*. Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7990-1_1

Atilgan, M. R., Yildiz, S., Kaya, Z., & Unluturk, S. (2021). kinetic and process modeling of uv-c irradiation of foods. In K. Knoerzer & K. Muthukumarappan (Eds.), *Innovative food processing technologies: A comprehensive review* (Vol. 2, pp. 227–255). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.22972-7

Barreto, M., Castillo-Ruiz, M., & Retamal, P. (2016). *Salmonella enterica*: una revisión de la trilogía agente, hospedero y ambiente, y su trascendencia en Chile. *Revista Chilena de Infectología*, 33(5), 547–557. https://doi.org/10.4067/S0716-10182016000500010

Bevilacqua, A., Speranza, B., Sinigaglia, M., & Corbo, M. R. (2015). A focus on the death kinetics in predictive microbiology: benefits and limits of the most important models and some tools dealing with their application in foods. *Foods*, *4*(4), 565–580. https://doi.org/10.3390/foods4040565

Buosi, D. T. M., de Moraes, J. O., Cheng, Y., Cheng, R. A., Moraru, C. I., & Carciofi, B. A. M. (2022). Effective pulsed light treatments for inactivating *Salmonella enterica* serotypes. *Food Control*, *135*, 108776. https://doi.org/10.1016/J.FOODCONT.2021.108776

Chang, J. C. H., Ossoff, S. F., Lobe, D. C., Dorfman, M. H., Dumais, C. M., Qualls, R. G., & Johnson, J. D. (1985). UV inactivation of pathogenic and indicator microorganisms. *Applied and Environmental Microbiology*, 49(6), 1361–1365.

Chlebicz, A., & Śliżewska, K. (2018). Campylobacteriosis, salmonellosis, yersiniosis, and

listeriosis as zoonotic foodborne diseases: A review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *15*(5), 863. https://doi.org/10.3390/ijerph15050863

Chun, H. H., Kim, H. J., Won, M., Chung, K. S., & Song, K. Bin. (2010). A comparison of kinetic models of foodborne pathogen inactivation by aqueous chlorine dioxide, fumaric acid, and ultraviolet-C. *Journal of Applied Biological Chemistry*, *53*(2), 243–248. https://doi.org/10.3839/jksabc.2010.038

Fenoglio, D., Ferrario, M., Schenk, M., & Guerrero, S. (2020). Effect of pilot-scale UV-C light treatment assisted by mild heat on *E. coli*, *L. plantarum* and *S. cerevisiae* inactivation in clear and turbid fruit juices. Storage study of surviving populations. *International Journal of Food Microbiology*, *332*, 108767. https://doi.org/10.1016/J.IJFOODMICRO.2020.108767

Geeraerd, A. H., Valdramidis, V. P., & Van Impe, J. F. (2005). GInaFiT, a freeware tool to assess non-log-linear microbial survivor curves. *International Journal of Food Microbiology*, *102*(1), 95–105. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2004.11.038

He, X., Wang, J., Guo, S., Zhang, J., Wei, B., Sun, J., & Shu, S. (2018). Ventilation optimization of solar greenhouse with removable back walls based on CFD. *Computers and Electronics in Agriculture*, *149*, 16–25. https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.10.001

Hinojosa, A., Silveira, A. C., Ospina, M., Char, C., Sáenz, C., & Escalona, V. H. (2013). Safety of ready-to-eat watercress using environmentally friendly sanitization methods. *Journal of Food Quality*, *36*(1), 66–76. https://doi.org/10.1111/jfq.12016

Jeon, M.-J., & Ha, J.-W. (2018). Efficacy of UV-A, UV-B, and UV-C irradiation on inactivation of foodborne pathogens in different neutralizing buffer solutions. *LWT*, *98*(14), 591–597. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.09.030

John, D., & Ramaswamy, H. S. (2020). Comparison of pulsed light inactivation kinetics and modeling of *Escherichia coli* (ATCC-29055), *Clostridium sporogenes* (ATCC-7955) and *Geobacillus stearothermophilus* (ATCC-10149). *Current Research in Food Science*, *3*, 82–91. https://doi.org/10.1016/J.CRFS.2020.03.005

Karpiński, T. M., & Adamczak, A. (2019). Fucoxanthin-an antibacterial carotenoid. *antioxidants*, *8*, 239. https://doi.org/10.3390/ANTIOX8080239

Kavakli, I. H., Ozturk, N., & Gul, S. (2019). DNA repair by photolyases. *Advances in Protein Chemistry and Structural Biology*, *115*, 1–19.

https://doi.org/10.1016/BS.APCSB.2018.10.003

Kaya, Z., Unluturk, S., Martin-Belloso, O., & Soliva-Fortuny, R. (2020). Effectiveness of pulsed light treatments assisted by mild heat on *Saccharomyces cerevisiae* inactivation in verjuice and evaluation of its quality during storage. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *66*, 102517. https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2020.102517

Kingwascharapong, P., Iida, Y., Tanaka, F., & Tanaka, F. (2020). Simulation of a UV-C conveyor system using computational fluid dynamics techniques on the uniformity of the incident UV-C dose distribution to strawberry. *Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University*, *65*(2), 371–378. https://doi.org/10.5109/4103903

Koutchma, T., Forney, L., & Moraru, C. (2009). *Ultraviolet light in food technology: principles and applications* (T. Koutchma (Ed.)). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781420059519.ch4

Lasagabaster, A., & Martínez de Marañón, I. (2017). comparative study on the inactivation and photoreactivation response of *Listeria monocytogenes* seafood isolates and a listeria innocua surrogate after pulsed light treatment. *Food and Bioprocess Technology*, *10*, 1931–1935. https://doi.org/10.1007/S11947-017-1972-6

Law, J. W.-F., Ab Mutalib, N.-S., Chan, K.-G., & Lee, L.-H. (2015). An insight into the isolation, enumeration, and molecular detection of *Listeria monocytogenes* in food. *Frontiers in Microbiology*, *6*, 1227. https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01227

Liu, Z., Hu, S., Soteyome, T., Bai, C., Liu, J., Wang, Z., Kjellerup, B. V., & Xu, Z. (2021). Intense pulsed light for inactivation of foodborne gram-positive bacteria in planktonic cultures and bacterial biofilms. *LWT*, *152*, 112374. https://doi.org/10.1016/J.LWT.2021.112374

Luna-Guevara, J. J., Arenas-Hernandez, M. M. P., Martínez De La Peña, C., Silva, J. L., & Luna-Guevara, M. L. (2019). The role of pathogenic *E. coli* in fresh vegetables: Behavior, contamination factors, and preventive measures. *International Journal of Microbiology*, *2019*, 1–10. https://doi.org/10.1155/2019/2894328

Norton, T., & Sun, D.-W. (2007). An overview of CFD applications in the food industry. In D.-W. Sun (Ed.), *Computational fluids dynamics in food processing* (pp. 1–41). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781420009217.ch1

Preetha, P., Pandiselvam, R., Varadharaju, N., Kennedy, Z. J., Balakrishnan, M., & Kothakota, A. (2021). Effect of pulsed light treatment on inactivation kinetics of *Escherichia coli* (MTCC 433) in fruit juices. *Food Control*, *121*, 107547.

https://doi.org/10.1016/J.FOODCONT.2020.107547

Quek, P. H., & Hu, J. (2008a). Influence of photoreactivating light intensity and incubation temperature on photoreactivation of *Escherichia coli* following LP and MP UV disinfection. *Journal of Applied Microbiology*, *105*(1), 124–133. https://doi.org/10.1111/J.1365-2672.2008.03723.X

Quek, P. H., & Hu, J. (2008b). Indicators for photoreactivation and dark repair studies following ultraviolet disinfection. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, *35*(6), 533–533. https://doi.org/10.1007/S10295-008-0314-0

Rodríguez-Mijangos, R., Gonzalez-Boué, G., Barffuson-Dominguez, F., López-Vargas, J. M., & Gómez-Yépiz, M. S. (2014). Cámara de irradiación UV-C económica y sus potenciales aplicaciones en la desinfección de alimentos. *EPISTEMUS*, *16*, 72–78. https://biblat.unam.mx/hevila/EpistemusCienciatecnologiaysalud/2014/no16/10.pdf

Ruiz-Cruz, S., Acedo-Félix, E., Díaz-Cinco, M., Islas-Osuna, M. A., & González-Aguilar, G. A. (2007). Efficacy of sanitizers in reducing *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella* spp. and *Listeria monocytogenes* populations on fresh-cut carrots. *Food Control*, *18*(11), 1383–1390. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2006.09.008

Shama, G. (2007). Process challenges in applying low doses of ultraviolet light to fresh produce for eliciting beneficial hormetic responses. *Postharvest Biology and Technology*, *44*(1), 1–8. https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2006.11.004

Thompson, C. L., & Sancar, A. (2002). Photolyase/cryptochrome blue-light photoreceptors use photon energy to repair DNA and reset the circadian clock. *Oncogene*, *21*(58), 9043–9056. https://doi.org/10.1038/sj.onc.1205958

Tanaka, F., Nashiro, K., Trivittayasil, V., & Uchino, T. (2016). Simulation of UV-C dose distribution and inactivation of mold spore on strawberries in a conveyor system. *Food Science and Technology Research*, *22*(4), 461–466. https://doi.org/10.3136/fstr.22.461

Trivittayasil, V., Nashiro, K., Tanaka, F., Hamanaka, D., & Uchino, T. (2015). inactivation characteristics and modeling of mold spores by UV-C radiation based on irradiation dose. *Food Science and Technology Research*, *21*(3), 365–370. https://doi.org/10.3136/fstr.21.365

Trivittayasil, V., Tanaka, F., & Uchino, T. (2016). Simulation of UV-C intensity distribution and inactivation of mold spores on strawberries. *Food Science and Technology Research*, *22*(2), 185–192. https://doi.org/10.3136/fstr.22.185

U.S. Food and Drugs Administration. (2020, October 3). *country fresh expands voluntary recall*. https://www.fda.gov/safety/recalls-market-withdrawals-safety-alerts/country-fresh-expands-voluntary-recall

van Boekel, M. A. J. S. (2002). On the use of the Weibull model to describe thermal inactivation of microbial vegetative cells. *International Journal of Food Microbiology*, *74*(1–2), 139–159. https://doi.org/10.1016/S0168-1605(01)00742-5

van Boekel, M. A. J. S. (2008). Kinetic modeling of food quality: A critical review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *7*(1), 144–158. https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2007.00036.x

Virto, R., Sanz, D., Álvarez, I., Condón, S., & Raso, J. (2006). Application of the Weibull model to describe inactivation of *Listeria monocytogenes* and *Escherichia coli* by citric and lactic acid at different temperatures. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *86*(6), 865–870. https://doi.org/10.1002/jsfa.2424

WHO. (2018). *Inocuidad de los alimentos*. http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/food-safety

WHO. (2020). *Foodborne diseases*. https://www.who.int/health-topics/foodborne-diseases#tab=tab_1

Xu, L., Tian, C., Lu, X., Ling, L., Lv, J., Wu, M., & Zhu, G. (2015). Photoreactivation of *Escherichia coli* is impaired at high growth temperatures. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, *147*, 37–46. https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2015.03.012

Yang, X., Wu, Q., Huang, J., Wu, S., Zhang, J., Chen, L., Wei, X., Ye, Y., Li, Y., Wang, J., Lei, T., Xue, L., Pang, R., & Zhang, Y. (2020). Prevalence and characterization of *Salmonella* isolated from raw vegetables in China. *Food Control*, *109*, 106915. https://doi.org/10.1016/J.FOODCONT.2019.106915

Yoon, J. H., Han, A., Paek, J., & Lee, S. Y. (2019). Evaluation of non-isothermal inactivation on survivals of pathogenic bacteria by predictive models. *LWT*, *101*, 366–373. https://doi.org/10.1016/J.LWT.2018.11.023

Zhou, X., Li, Z., Lan, J., Yan, Y., & Zhu, N. (2017). Kinetics of inactivation and photoreactivation of *Escherichia coli* using ultrasound-enhanced UV-C light-emitting diodes disinfection. *Ultrasonics Sonochemistry*, *35*, 471–477. https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2016.10.028

Capítulo 2: Determinación de la dosis óptima de luz UV-C mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) y su efecto sobre la carga microbiana *in vivo*

Resumen

La dinámica de fluidos computacional (CFD) permite simular la desinfección con radiación ultravioleta de onda corta (UV-C) de alimentos. En esta investigación, se estimaron los tiempos y las dosis para el tratamiento con UV-C del mango 'Tommy Atkins' mínimamente procesado mediante la integración de las cinéticas de inactivación UV-C de *E. coli* O157:H7, *Salmonella* Typhimurium y *Listeria monocytogenes* obtenidas *in vitro*, la intensidad de radiación promedio en los trozos de mango hallada con CFD y estableciendo como reducciones teóricas a las logradas *in vitro* (2,978, 1,895 y 1,767 log UFC/g, respectivamente). Los trozos de mango inoculados con los patógenos mencionados fueron irradiados con tiempos de 1480, 1592 y 1746 s y dosis de 5,5, 5,9 y 6,5 kJ/m^2, respectivamente. Se empleó una prueba t de una muestra para evaluar si existían diferencias significativas entre los valores de la reducción teórica y experimental para cada microorganismo en la superficie de los trozos de mango ($p<0,05$), y se estimó el error porcentual medio absoluto (MAPE) para la predicción de las reducciones. Los resultados indicaron que la reducción lograda en los trozos de mango fue de 1,774±0,108, 1,602±0,175 y 1,348±0,077 log UFC/g para *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium y *L. monocytogenes*, respectivamente. Aunque existieron diferencias significativas entre los valores de las reducciones teórica y experimental de todos los microorganismos, la integración efectuada pudo pronosticar en promedio más del 60 % de la reducción logarítmica de los patógenos. Por lo tanto, la integración propuesta es promisoria para el estudio de la desinfección de productos hortofrutícolas.

Palabras clave:

Mangifera indica L., Procesamiento mínimo, Dinámica de fluidos computacional, Parámetros cinéticos, Microbiología predictiva.

Abstract

Computational fluid dynamics (CFD) simulates short-wave ultraviolet radiation (UV-C) disinfection of food. In this research, the times, and doses for the UV-C treatment of fresh-cut 'Tommy Atkins' mango were estimated by integrating the UV-C inactivation kinetics of *E. coli* O157:H7, *Salmonella* Typhimurium and *Listeria monocytogenes* obtained *in vitro*, the average radiation intensity in mango pieces found with CFD and establishing as theoretical reductions those achieved *in vitro* (2.978, 1.895 and 1.767 log CFU/g, respectively). The mango pieces inoculated with the mentioned pathogens were irradiated for times of 1480, 1592 and 1746 s and with doses of 5.5, 5.9 and 6.5 kJ/m^2, respectively. A one-sample t-test was used to assess whether there were significant differences between the theoretical and experimental reduction values for each microorganism on the surface of the mango pieces ($p<0.05$), and the mean absolute percentage error (MAPE) was estimated for the prediction of the reductions. The results indicated that the reduction achieved in the mango pieces was 1.774±0.108, 1.602±0.175, and 1.348±0.077 log CFU/g for *E. col*i O157:H7, *S.* Typhimurium and *L. monocytogenes*, respectively. Although there were significant differences between the values of the theoretical and experimental reductions of all the microorganisms, the integration accomplished could predict on average more than 60% of the logarithmic reduction of the pathogens. Therefore, the proposed integration is promising for the study of the disinfection of fruit and vegetable products.

Keywords:

Mangifera indica L., Fresh-cut, Computational fluid dynamics, Kinetic parameters, Predictive microbiology

1. Introducción

El mango (*Mangifera indica* L.) es una fruta de importante valor nutricional y una fuente de vitaminas, minerales, azúcares, fibra y antioxidantes dietéticos (Dussán-Sarria et al., 2017; Ribeiro et al., 2007). Debido a su fácil manipulación, agradable sabor y a los tonos amarillos

y naranjas representativos de su pulpa, el mango posee gran potencial en la industria de productos mínimamente procesados (MP) (Dussán-Sarria et al., 2014). Estos productos se caracterizan por tener tejidos vivos y la calidad del carácter de su estado fresco, brindando comodidad a los compradores porque están listos para el consumo (Wiley & Yildiz, 2017). Normalmente, se obtienen mediante las operaciones de selección, lavado, pelado, corte y desinfección, y requieren conservación, distribución y comercialización en refrigeración (Ali et al., 2018). No obstante, el deterioro de las frutas y hortalizas MP se genera por el crecimiento microbiano, envejecimiento fisiológico (aumento de la tasa de respiración y producción de etileno), cambios bioquímicos (pardeamiento y pérdida de textura) y daño mecánico (Artés & Allende, 2015). Asimismo, las operaciones de corte y pelado inducen la liberación de contenido celular en el sitio de la herida, lo que favorece el crecimiento de patógenos (Pinela & Ferreira, 2017).

La principal causa de la contaminación microbiana de frutas y hortalizas radica en la aplicación inadecuada de las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) y en la falta de higiene durante la poscosecha y el procesamiento (González-Mendoza et al., 2017). Diferentes síntomas de intoxicación y brotes se han presentado por la ingesta de alimentos de origen vegetal contaminados de microorganismos que pertenecen principalmente a las familias *Enterobacteriaceae* y *Listeriaceae* (Chlebicz & Śliżewska, 2018). Según Brandl (2006), el microorganismo *E. coli* es el segundo agente etiológico más importante de brotes de productos frescos, ya que el serotipo enterohemorrágico provocó uno de los brotes más grandes reportados, con aproximadamente 600.000 casos relacionados epidemiológicamente por la ingesta de brotes de rábano en Japón en 1996. También se han encontrado diferentes serovares de *Salmonella enterica* como Typhimurium, Newport y Enteriditis en diversas frutas y hortalizas para exportación, incluyendo el mango (Barreto et al., 2016; Sivapalasingam et al., 2003). En cuanto a *Listeria monocytogenes*, este microorganismo puede usar los azúcares de los vegetales como fuente de nutrientes y no se ve afectado por el pH bajo (Rees et al., 2017). Penteado et al. (2014) detectaron los patógenos *S. enterica* serovar Enteriditis y *L. monocytogenes* en la pulpa de mango almacenada a baja temperatura (10 °C).

La desinfección de frutas y hortalizas es una operación importante en el manejo poscosecha para mejorar la seguridad alimentaria (Chlebicz & Śliżewska, 2018). Comúnmente la desinfección de los frutos de mango destinado al procesamiento mínimo es realizada a través del lavado, higienización y sanitización. En el lavado de los frutos

enteros se utiliza agua potable o detergente neutro, en la higienización los frutos enteros estos son inmersos durante 5 minutos en solución de agua clorada a 100 ppm y en la sanitización de los trozos de fruta, estos son inmersos en solución de agua clorada a 10 ppm durante 1 minuto y se dejan escurrir durante 2 minutos (Kader, 2008). Entre las alternativas al uso de cloro en la higienización de vegetales se ha propuesto la aplicación de luz ultravioleta de onda corta (UV-C), la cual consiste en un tipo de radiación emitida a una longitud de onda que oscila entre 200 y 280 nm, que es letal para la mayoría de los microorganismos, induce al aumento de fitoalexinas y retrasa la senescencia en los productos hortofrutícolas. El tratamiento con UV-C depende de la forma y composición del material vegetal, y de la dosis de irradiación (Millán-Villarroel et al., 2015). La dosis se considera como el producto entre la cantidad de radiación que incide en la superficie del material vegetal y el tiempo de tratamiento (Shama, 2007). Investigaciones previas han reportado que dosis de UV-C menores a 10 kJ/m^2 generaron la reducción de menos de 2 log UFC/g de la población de microorganismos como *E. coli* y *L. innocua* inoculados en mango mínimamente procesado de la variedad ‘Tommy Atkins’ (Romero et al., 2017; Santo et al., 2018).

Por otra parte, la dinámica de fluidos computacional (CFD) es una herramienta que se ha empleado ampliamente para el análisis de diferentes operaciones en la industria alimentaria, ya que permite la fácil resolución de ecuaciones relacionadas a balances de energía, masa y momento mediante computadoras. El éxito de esta herramienta depende de la coincidencia de los resultados de la simulación con los experimentos, así como de la capacidad de las simulaciones para predecir fenómenos complejos que no siempre pueden llevarse a cabo a pequeña escala (Norton & Sun, 2010). Algunos autores han reportado el uso de CFD con el modelo de radiación de ordenadas discretas (DO) para resolver la ecuación de transferencia radiativa (RTE) y estudiar la distribución de la intensidad de la radiación UV-C y la inactivación de los mohos *Cladosporium cladosporiodes* y *Penicillium digitatum* en fresas (Trivittayasil et al., 2016). Sin embargo, estas investigaciones han excluido el estudio de la reducción de patógenos transmitidos por los alimentos en frutas potenciales, así como el contraste de los resultados estimados con los experimentales. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue validar la eficacia de las dosis óptimas de luz UV-C estimadas mediante el uso de CFD para la inactivación de los microorganismos

patógenos como la *E. coli*, *S.* Typhimurium y *L. monocytogenes* en el mango 'Tommy Atkins' mínimamente procesado.

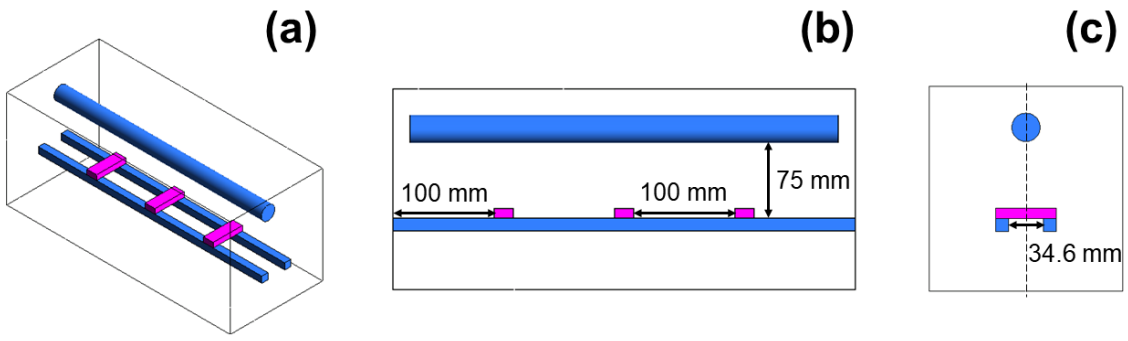
2. Materiales y métodos

Para determinar la dosis óptima, se realizaron simulaciones con dinámica de fluidos computacional (CFD) para evaluar la distribución de la intensidad de radiación de la luz UV-C en el mango mínimamente procesado. Estos resultados se integraron con los parámetros cinéticos de inactivación microbiana *in vitro* encontrados en el Capítulo 1.

2.1. Simulación con CFD

En DesignModeler se creó una geometría que incluyó tres trozos de mango, cada uno de 10 mm de altura, 60 mm de longitud y 20 mm de ancho. Los trozos se ubicaron en la mitad de la cámara de desinfección reportada en el Capítulo 1, separados 100 mm entre sí y de los extremos de las paredes laterales más pequeñas del equipo. Estos se orientaron de forma normal a la lámpara encima de dos barras cuadradas de aluminio de 12,7 mm de radio, cuya separación era de 34,6 mm. La distancia entre las barras y la fuente de radiación fue de 75 mm (Figura 2-1).

Figura 2-1: Geometría de la cámara de desinfección con los trozos de mango. Vista isométrica (a), frontal (b) y lateral (c).



Los detalles del mallado (Figura 2-2), del dominio computacional, de las condiciones de frontera y de la configuración de la solución se consideraron similares a lo reportado en el Capítulo 1. El número de elementos de malla fue de 138.433. Se tuvieron en cuenta algunos parámetros adicionales presentados en la Tabla 2-1. Los volúmenes dentro de los

trozos de mango se dejaron en blanco. El tiempo promedio para alcanzar la convergencia fue de 362,986 s en un Intel Core TM i5-1035G1 CPU (1.19 GHz) con 8 GB de RAM.

Figura 2-2: Mallado de la cámara de desinfección con los trozos de mango. Vista externa (a) e interna (b).

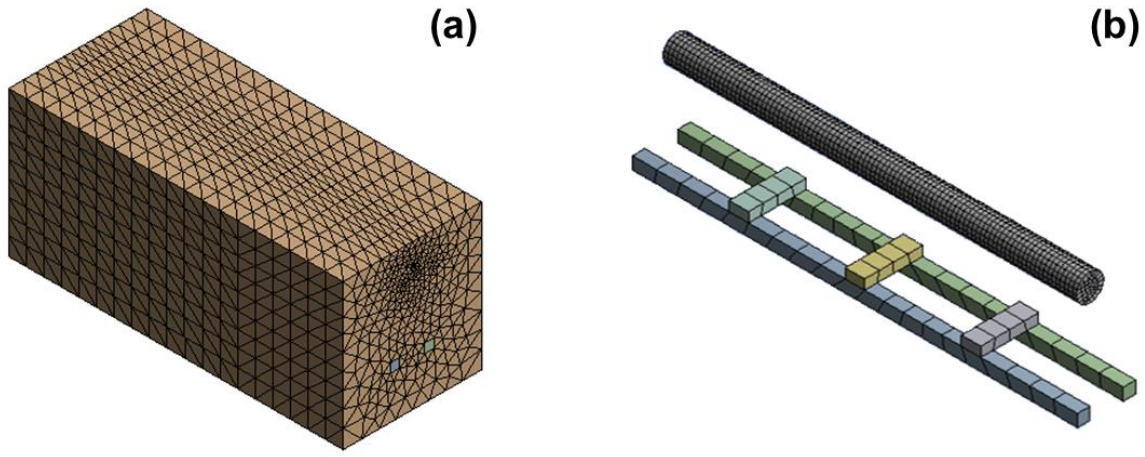


Tabla 2-1: Parámetros de las condiciones de frontera y del dominio computacional para la simulación.

Parámetro	Valor
Densidad del aire (kg/m^3)[a]	1,225
Densidad del aluminio (kg/m^3)[a]	1190
Emisividad de las paredes de barras, equipo y mango[b]	0,95
Emisividad de la pared de la lámpara[c]	0,89
Intensidad de radiación promedio en la lámpara (W/m^2)[d]	30,5

Nota: [a]Fluent, [b]Trivittayasil et al. (2016), [c]Trivittayasil et al. (2015), [d]Medición.

2.2. Cálculo de la dosis óptima

Inicialmente, para estimar los tiempos tratamiento con UV-C de los trozos de mango, se consideraron como reducciones teóricas a las logradas *in vitro* para *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium y *L. monocytogenes* después del tratamiento de UV-C descrito en el Capítulo 1. Asimismo, fueron empleados los modelos cinéticos *in vitro* en función de la dosis UV-C

para cada microorganismo y la intensidad de radiación promedio en la superficie de los trozos de mango hallada con CFD (Tabla 2-2).

Tabla 2-2: Parámetros para el cálculo de los tiempos de tratamiento con UV-C de los trozos de mango y la inactivación de *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium y *L. monocytogenes.*

Microorganismo	Reducción teórica ($\log_{10}(N/N_0)$)	Modelo	Ecuación	Error estándar de la regresión (S)
E. coli O157:H7	-2,978	Weibull	$t = \frac{1}{60\ s} \times \frac{0{,}011\ kJ/m^2 \times \sqrt[0{,}312]{\log_{10}(N/N_0) \times -2{,}303}}{I}$	0,133
S. Typhimurium	-1,895	Logarítmico lineal	$t = \frac{1}{60\ s} \times \frac{\log_{10}(N/N_0) \times -2{,}303}{I \times 0{,}736\ m^2/kJ}$	0,206
L. monocytogenes	-1,767	Weibull	$t = \frac{1}{60\ s} \times \frac{0{,}489\ kJ/m^2 \times \sqrt[0{,}543]{\log_{10}(N/N_0) \times -2{,}303}}{I}$	0,196

Nota: t es el tiempo de tratamiento con UV-C de los trozos de mango en min e I es la intensidad de radiación promedio en la superficie de los trozos de mango (kW/m^2).

Para cada microorganismo, la dosis de tratamiento con UV-C de los trozos de mango se determinó a través de la Ecuación 12.

$$D = It \times \frac{1}{1000} \quad (12)$$

donde D es la dosis UV-C aplicada a los trozos de mango (kJ/m^2), I es la intensidad de radiación promedio en la superficie de los trozos de mango (kW/m^2) y t el tiempo de tratamiento con UV-C de los trozos de mango (s) estimado con los modelos presentados en la Tabla 2-2. La dosis óptima de luz UV-C para el tratamiento del mango mínimamente procesado en el Capítulo 3 se calculó como el promedio de las dosis estimadas para inactivar *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium y *L. monocytogenes*.

2.3. Inoculación y tratamiento con luz UV-C del mango mínimamente procesado

El mango (*Mangifera indica* L.) variedad 'Tommy Atkins' fue adquirido en un mercado local de Hermosillo, Sonora, México, en estado de maduración 3, según Kader (2008) y Mahecha et al. (1991), en este estado, el mango presenta el 75% de su superficie de color rojizo y pulpa totalmente amarilla. Los frutos fueron refrigerados un día antes del

procesamiento. El día del procesamiento, tanto los mangos enteros como el equipamiento empleado para el procesamiento mínimo y el tratamiento con UV-C fueron desinfectados con una solución acuosa de cloro de 200 ppm. La cáscara de la fruta fue retirada y se obtuvieron seis trozos de aproximadamente 10 mm de altura, 60 mm de longitud y 20 mm de ancho por cada patógeno de estudio. Los trozos fueron sumergidos en inóculos de aproximadamente 10^6 células/mL preparados individualmente añadiendo alrededor de 3 mL de las suspensiones iniciales de *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium y *L. monocytogenes* reportadas en el Capítulo 1 en 300 mL de AP (Difco, Sparks, MD, USA) al 2,3 %. Las células de los microorganismos estaban en la fase exponencial de crecimiento. Siguiendo la metodología propuesta por Ruiz-Cruz et al. (2007), los trozos de mango se mantuvieron en los inóculos durante 30 min bajo agitación manual. Después de la inoculación, los trozos de fruta se escurrieron uno por uno durante 10 s y se dejaron por 30 min dentro de una cabina de flujo laminar (Horizontal Clean Bench, Labconco Corporation, Kansas City, MO, USA). Para cada microorganismo, se llevaron tres trozos de mango inoculados al interior del prototipo portátil descrito en el Capítulo 1 y se les aplicó el tratamiento de luz UV-C con la dosis estimada. El nivel de inóculo retenido en la superficie de los trozos de mango sin tratamiento con UV-C se consideró como una referencia de control de la población microbiana inicial.

2.4. Procedimientos para la enumeración microbiana

Las muestras control e irradiadas con las dosis estimadas se dispusieron de forma independiente en bolsas estériles para homogeneizador (Nasco, Whirl-Pak, WI, USA) con un contenido de AP al 2,3% en una proporción 1:10 (p/v) y se agitaron manualmente por 1 min. Se hicieron diluciones decimales con AP al 2,3% con el fin de realizar la enumeración microbiana. Para cada dilución, se sembraron por triplicado alícuotas de 1 mL en placas con los medios MacConkey Sorbitol, Bismuto Sulfito y Oxford para *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium y *L. monocytogenes*, respectivamente, y se incubaron a 37 °C por 24 a 48 h (Incubadora analógica 132000, Boekel Scientific, Feasterville, PA, USA).

2.5. Análisis estadístico

La reducción logarítmica alcanzada para cada microorganismo en la superficie de los trozos de mango después del tratamiento con UV-C se calculó como la media de la

diferencia entre las réplicas del recuento de la población de las muestras tratadas con UV-C y la población microbiana promedio de las muestras control, utilizando la Ecuación 13.

$$\left|\overline{\log_{10}\left(\frac{N}{N_0}\right)}\right| = \left|\frac{1}{9}\sum_{i=1}^{9}\left[\log_{10}(N_i) - \overline{\log_{10}(N_0)}\right]\right| \quad (13)$$

donde N_0 y N son el recuento de población adherida en la muestra control (sin tratamiento con UV-C) y el recuento de la población restante después del tratamiento con UV-C, respectivamente. $\overline{\log_{10}(N_0)}$ equivale a $\frac{1}{9}\sum_{i=1}^{9}\log_{10}(N_{0i})$. Las medias se calcularon con nueve determinaciones debido a que el conteo de la población microbiana fue efectuado por triplicado para cada muestra control y para cada muestra tratada con luz UV-C.

Se empleó una prueba t de una muestra para evaluar si existían diferencias significativas entre los valores de la reducción teórica y la reducción experimental de cada microorganismo en la superficie de los trozos de mango ($p<0,05$). También se estimó el error porcentual medio absoluto (MAPE) con respecto al valor de las reducciones teóricas, según la Ecuación 14. Todos los análisis estadísticos se efectuaron con Minitab 17 (Minitab Inc., State College, PA, USA).

$$\mathrm{MAPE}(\%) = \frac{100}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{x_i - \hat{x}_i}{x_i}\right| \quad (14)$$

donde n es el número de determinaciones efectuadas experimentalmente, x_i es el valor de la reducción logarítmica experimental y $\hat{x}_i$es el valor de la reducción logarítmica teórica.

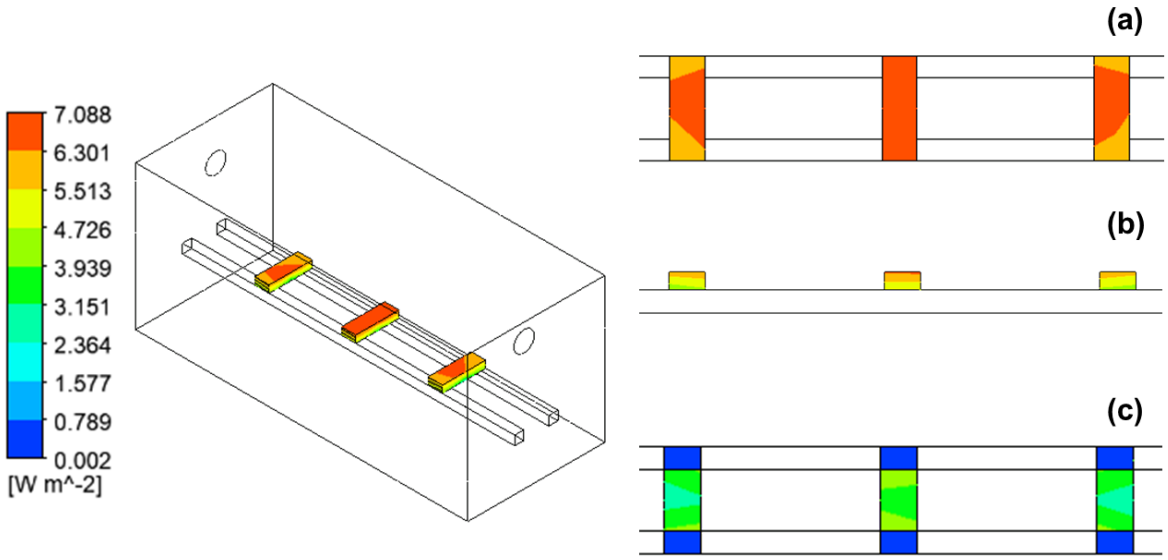
3. Resultados y discusión

3.1. Simulación con CFD

La intensidad de radiación promedio en la superficie de los trozos de mango obtenida mediante la simulación con CFD fue de 3,713 W/m^2. Una mayor cantidad de radiación UV-C incidió en la superficie de los trozos adyacente a la lámpara y la disposición con las barras favoreció la propagación de la radiación a la superficie subexpuesta o inferior de los mismos (Figura 2-3). Se encontró que aproximadamente el 29% de la superficie subexpuesta de los trozos de mango fue irradiada con menos de 0,508 W/m^2. Por el contrario, Trivittayasil et al. (2016) reportaron que en aproximadamente el 43,9% de la superficie subexpuesta de nueve fresas dispuestas con el cáliz de forma lateral en una

bandeja lineal de polietileno de baja densidad y tratadas con fuentes de radiación en la parte superior e inferior, incidió una intensidad de radiación UV-C inferior a 0,5 W/m^2. Esto significa que los arreglos realizados en la cámara de desinfección empleando las barras cuadradas de aluminio, permitieron mayor exposición de la parte inferior de la muestra sin necesidad de rotar el producto ni utilizar una fuente de radiación UV-C adicional. Además, con los resultados se infiere que agregar una bandeja o recipiente de gran superficie en una cámara de desinfección no favorece la propagación de la radiación a todas las muestras de forma eficaz, ya que se debe tener en cuenta las propiedades del objeto, especialmente la transmisión de la radiación UV-C.

Figura 2-3: Isocontorno de la intensidad de radiación incidente en los trozos de mango ubicados en la cámara de desinfección. Vista superior (a), frontal (b) e inferior (c).



El uso de la herramienta informática CFD con los parámetros cinéticos de inactivación UV-C de los patógenos logró hacer un pronóstico estimado de la reducción logarítmica en la superficie de trozos de mango inoculados con *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium y *L. monocytogenes*. La integración de CFD propuesta podría ser útil para estimar el tratamiento con UV-C de diferentes productos hortofrutícolas considerando los parámetros de inactivación de los microorganismos objetivo en función de la UV-C.

3.2. Eficacia de la luz UV-C en la reducción de los patógenos

Las dosis y los tiempos estimados usando CFD y los parámetros cinéticos de inactivación para el tratamiento con luz UV-C de los trozos de mango inoculados individualmente con los microorganismos *E. coli* O157:H7, *Salmonella enterica* serovar Typhimurium y *Listeria monocytogenes* fueron 5,5, 5,9 y 6,5 kJ/m^2, y 1480, 1592 y 1746 s, respectivamente. Trivittayasil et al. (2016) calcularon dosis y tiempos que variaron de 0,45 a 5 kJ/m^2 y 1,6 a 4,8 min, respectivamente, para inactivar de 1 a 3 log UFC/g de *Penicillium digitatum* y *Cladosporium cladosporioides* en la superficie de nueve fresas (Trivittayasil et al., 2015). Las diferencias entre los resultados reportados y la investigación citada radican fundamentalmente en los parámetros cinéticos de inactivación empleados en las estimaciones, pues los mohos presentaron menor resistencia a la radiación UV-C que los patógenos *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium y *L. monocytogenes.*

El nivel de los inóculos usados para sumergir los trozos de mango fue de aproximadamente 6 log UFC/mL de *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium y *L. monocytogenes*, pero la cantidad de patógenos adheridos en la superficie de la fruta cortada fue de 4,382, 5,060 y 3,841 log UFC/g, respectivamente. De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 2-3, se logró mayor reducción en las bacterias Gramnegativas *E. coli* O157:H7 y *S.* Typhimurium después de irradiar los mangos con los tratamientos estimados. Esto sugiere que la gruesa capa externa de peptidoglicano protege efectivamente contra patógenos como *L. monocytogenes* de dosis UV-C cercanas a 6 kJ/m^2 (Sharifi-Yazdi & Darghahi, 2006). Resultados similares fueron encontrados por Romero et al. (2017), quienes analizaron el efecto de dosis de UV-C de 1,479 y 2,069 kJ/m^2 en trozos de mango 'Tommy Atkins' de 1,5 cm por 2,8 cm de ancho inoculados con *E. coli* y *Listeria innocua*. Estos autores demostraron que *L. innocua* era más resistente a UV-C que *E. coli* por ser una bacteria Grampositiva. Adhikari et al. (2015) inocularon con *L. monocytogenes* y *E. coli* O157:H7 discos de manzana y melón (4 cm de diámetro y aproximadamente 0,8 cm de grosor), y bayas (frambuesa y fresa) cortadas longitudinalmente. Las frutas mínimamente procesadas fueron irradiadas con dosis de UV-C que iban de 0 a 10,5 kJ/m^2 para *E. coli* O157:H7 y de 0 a 11,9 kJ/m^2 para *L. monocytogenes*. De esta forma, tuvieron una mayor inactivación de *E. coli* O157:H7 (hasta 2,9 log UFC/g en los discos y 2 log UFC/g en las bayas), que en *L. monocytogenes* (hasta 1,7 log UFC/g en los discos y 1 log UFC/g en las bayas). Raybaudi-Massilia et al. (2013) expusieron rebanadas de papaya roja 'Maradol' de 0,7 x 3,5 x 2,5 cm inoculadas con *L. monocytogenes* y *Salmonella enterica* ser. Poona a

dosis de UV-C de 0, 0,96, 2,88, 5,76 y 8,64 kJ/m^2. Los autores también reportaron mayor resistencia de L*. monocytogenes* a la radiación UV-C. Kim & Song (2017) lograron adherir aproximadamente 5 log UFC/g de *L. monocytogenes* y *E. coli* O157:H7 en ciruelas, y las expusieron a dosis UV-C de 3, 5 y 10 kJ/m^2. La reducción logarítmica hallada para *E. coli* O157:H7 (1,19 a 2,07 log UFC/g) fue mayor a la obtenida para *L. monocytogenes* (0,59 a 1,62 log UFC/g).

Tabla 2-3: Comparación de la reducción experimental y teórica de los patógenos en los trozos de mango y error porcentual medio absoluto (MAPE) en el pronóstico de las reducciones cuando aplicada luz UV-C como mecanismo de desinfección.

Microorganismo	Intensidad de radiación promedio en los trozos de mango (W/m^2)	Tiempo de tratamiento con UV-C (s)	Dosis aplicada (kJ/m^2)	Reducción logarítmica teórica (log UFC/g)	Reducción logarítmica experimental (log UFC/g)	MAPE (%)
E. coli O157:H7	3,713	1480	5,5	2,978^a	1,774±0,108^b	68,529
S. Typhimurium		1592	5,9	1,895^a	1,602±0,175^b	21,089
L. monocytogenes		1746	6,5	1,767^a	1,348±0,077^b	31,454

Las medias que no comparten una letra dentro de la misma fila son significativamente diferentes (p<0,05).
MAPE: Error porcentual medio absoluto.

Entre las bacterias Gramnegativas, el patógeno *S.* Typhimurium adherido a los trozos de mango mostró mayor tolerancia al tratamiento con UV-C en comparación con *E. coli* O157:H7 (Tabla 2-3), teniendo en cuenta que la dosis aplicada fue levemente mayor para tratar a los trozos de fruta inoculados con *S.* Typhimurium. Resultados similares fueron obtenidos por Jaimez-Suarez & Gómez-Álvarez (2013), quienes inocularon trozos de 5 x 5 cm de hojas de lechuga 'Batavia' con un cóctel de dos cepas de *E. coli* y dos cepas de *Salmonella* spp., incluyendo *S.* Typhimurium. Dichas muestras fueron posteriormente tratadas con una mezcla de ácidos orgánicos a 2000 ppm por 5 minutos, lo que generó una reducción logarítmica de 2,09 log UFC/g para *E. coli* y 0,98 log UFC/g para *Salmonella* spp.

En compendio, con las dosis de luz UV-C estimadas mediante la integración de CFD y los parámetros cinéticos se logró una reducción menor a 2 log UFC/g de *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium y *L. monocytogenes* en los trozos de mango inoculados con estos microorganismos. Por el contrario, Graça et al. (2017) inocularon trozos de pera 'Rocha' de 10 g cada una (1 cm de largo y 0,6 cm de radio) con *E. coli*, *S. enterica* y *Listeria* spp. e irradiaron las muestras a diferentes dosis de UV-C (2,5, 5, 7,5 y 10 kJ/m^2). Todos los tratamientos generaron una reducción superior a 2 log UFC/g, logrando una máxima reducción de 3,4 log UFC/g con 7,5 kJ/m^2 para *E. coli*, 2,4 log CFU/g con 10 y 7,5 kJ/m^2 para *S. enterica*, y 3,3 log UFC/g con 10 kJ/m^2 para *Listeria* spp. En otra investigación, Santo et al. (2018) lograron adherir una población de *E. coli* de 5,4 UFC/g a porciones de mango de 1 g, las cuales sometieron a tratamientos con UV-C de 2,5, 5, 7,5 y 10 kJ/m^2. La inactivación de *E. coli* varió de 1,49 a 1,96 log UFC/g de acuerdo con la intensidad del tratamiento.

3.3. Validación de la dosis óptima

En la Tabla 2-3, se resumen los resultados de los análisis estadísticos. En general, los valores de las reducciones logarítmicas experimentales en la superficie de los trozos de mango fueron menores que las reducciones teóricas. Se encontraron diferencias significativas entre la reducción experimental y teórica de los patógenos *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium y *L. monocytogenes* en la superficie de la fruta mínimamente procesada ($p<0,05$), debido a que la eficiencia de la UV-C pudo verse afectada por las características de la superficie del material, sobre todo de su rugosidad (Adhikari et al., 2015). Syamaladevi et al. (2013) determinaron que las características físicas y morfológicas de la pera y el melocotón afectaron la inactivación de *E. coli* con UV-C. La presencia de heridas en la pera y de tricomas en la superficie del melocotón resguardaron al patógeno de la radiación.

Por otra parte, se determinó que la reducción de *S.* Typhimurium en los trozos de mango pudo ser pronosticada con mayor precisión, lo que pudo suceder debido a que una mayor cantidad del inóculo de este patógeno fue adherido a la superficie de los trozos de mango y a que el parámetro cinético de inactivación empleado para la estimación del tratamiento con UV-C de los trozos de mango fue obtenido directamente con el modelo lineal. Por el contrario, el valor del MAPE para *E. coli* O157:H7 fue notablemente mayor debido a que la reducción logarítmica lograda de forma *in vitro* y considerada como teórica fue superior a

la reducción obtenida experimentalmente en los trozos fruta. No obstante, se encontró que la integración de CFD con los parámetros de inactivación UV-C encontrados de manera *in vitro* logró pronosticar en promedio más del 60% de la reducción logarítmica en la superficie de trozos de mango inoculados con *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium y *L. monocytogenes*. Autores como Obande & Shama (2011) también han reportado que el uso de técnicas como la biodosimetría junto a curvas de inactivación microbiana pueden proveer una aproximación valiosa en la determinación de las dosis UV-C más adecuadas para el tratamiento de productos hortofrutícolas.

4. Conclusiones

La integración de CFD con las cinéticas de inactivación UV-C *in vitro* de los patógenos permitió estimar las dosis de tratamiento de los trozos de mango inoculados individualmente con *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium y *L. monocytogenes*. La aplicación de la luz UV-C con longitud de onda de 254 nm en dosis aproximadas a 6 kJ/m^2 resultó eficaz en la reducción de los patógenos en la superficie de los trozos de mango, lográndose reducciones experimentales menores de 2 log UFC/g (1,774, 1,602 y 1,348 log UFC/g, respectivamente). *L. monocytogenes* fue el microorganismo más resistente a la radiación UV-C debido a que es una bacteria Grampositiva. Los resultados indicaron que existieron diferencias significativas entre los datos teóricos y experimentales de todos los microorganismos ($p<0,05$), pero la integración pudo pronosticar en promedio más del 60% de la reducción logarítmica en la superficie de trozos de mango inoculados con *E. coli* O157:H7, *S.* Typhimurium y *L. monocytogenes*. La integración propuesta podría ser útil para estimar el tratamiento con UV-C de diferentes productos hortofrutícolas considerando los parámetros de inactivación de los microorganismos objetivo en función de la dosis UV-C. No obstante, se necesitan otras investigaciones para determinar la inactivación mínima y máxima de los microorganismos en la superficie de los distintos productos de origen vegetal.

Referencias

Adhikari, A., Syamaladevi, R. M., Killinger, K., & Sablani, S. S. (2015). Ultraviolet-C light inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes* on organic fruit surfaces. *International Journal of Food Microbiology*, 210, 136–142.

https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2015.06.018

Ali, A., Yeoh, W. K., Forney, C., & Siddiqui, M. W. (2018). Advances in postharvest technologies to extend the storage life of minimally processed fruits and vegetables. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(15), 2632–2649. https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1339180

Artés, F., & Allende, A. (2015). Minimal processing of fresh fruit, vegetables, and juices. In D. W. Sun (Ed.), *Emerging technologies for food processing* (pp. 583–597). Academic Press.

Barreto, M., Castillo-Ruiz, M., & Retamal, P. (2016). *Salmonella enterica*: una revisión de la trilogía agente, hospedero y ambiente, y su trascendencia en Chile. *Revista Chilena de Infectología*, 33(5), 547–557. https://doi.org/10.4067/S0716-10182016000500010

Brandl, M. T. (2006). Fitness of human enteric pathogens on plants and implications for food safety. *Annual Review of Phytopathology*, 44, 367–392. https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.44.070505.143359

Chlebicz, A., & Śliżewska, K. (2018). Campylobacteriosis, salmonellosis, yersiniosis, and listeriosis as zoonotic foodborne diseases: A review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(5), 863. https://doi.org/10.3390/ijerph15050863

Dussán-Sarria, S., Ramírez-Yela, J. I., & Hleap-Zapata, J. I. (2017). conservación de mango mínimamente procesado usando un recubrimiento comestible a base de aceite de aguacate. *Información Tecnológica*, 28(3), 67–74. https://doi.org/10.4067/S0718-07642017000300008

Dussán-Sarria, S., Torres-León, C., & Hleap-Zapata, J. I. (2014). Efecto de un recubrimiento comestible y de diferentes empaques durante el almacenamiento refrigerado de mango tommy atkins mínimamente procesado. *Información Tecnológica*, 25(4), 123–130. https://doi.org/10.4067/S0718-07642014000400014

González-Mendoza, D., Torrentera-Olivera, N. G., Ceceña Duran, C., & Grimaldo-Juarez, O. (2017). Water as contamination source of *Salmonella* and *Escherichia coli* in vegetable production in Mexico: A review. *Revista Bio Ciencias*, 3(3), 156–162. https://doi.org/10.15741/revbio.edit.04.06

Graça, A., Santo, D., Quintas, C., & Nunes, C. (2017). Growth of *Escherichia coli*, *Salmonella enterica* and *Listeria* spp., and their inactivation using ultraviolet energy and electrolyzed water, on 'Rocha' fresh-cut pears. *Food Control*, 77, 41–49. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.01.017

Jaimez-Suarez, S., & Gómez-Álvarez, L. M. (2013). Evaluación de un producto a base de ácidos orgánicos frente a *E. coli* y *Salmonella* spp. en la desinfección de lechuga fresca. *Alimentos Hoy*, *22*(29), 20–32. https://alimentoshoy.acta.org.co/index.php/hoy/article/view/229/222

Kader, A. A. (2008). Parámetros de calidad y estándares de clasificación en mango. Revisión de información disponible y futuras necesidades de investigación. https://www.mango.org/wp-content/uploads/2018/03/Mango_Grade_Standards_Final_Report_Spn.pdf

Kim, H. G., & Song, K. Bin. (2017). Combined treatment with chlorine dioxide gas, fumaric acid, and ultraviolet-C light for inactivating *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes* inoculated on plums. *Food Control*, 71, 371–375. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.07.022

Mahecha, G., De Civetta, L. A., & Rodríguez, C. (1991). Normas de calidad para las variedades de mango “Tommy Atkins” y “común” (hilacha). *Revista Colombiana de Química*, *20*(2), 10–17. https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim

Millán-Villarroel, D., Romero-González, L., Brito, M., & Ramos-Villarroel, A. Y. (2015). Luz ultravioleta: inactivación microbiana en frutas. *Saber*, 27(3), 454–469. http://www.ojs.udo.edu.ve/index.php/saber/article/view/1897

Norton, T., & Sun, D.-W. (2010). CFD: an innovative and effective design tool for the food industry. In J. Aguilera, R. Simpson, J. Welti-Chanes, D. Bermudez-Aguirre, & G. Barbosa-Canovas (Eds.), *Food engineering interfaces* (pp. 45–68). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7475-4_3

Obande, M. A., & Shama, G. (2011). The use of biodosimetry to measure the UV-C dose delivered to a sphere, and implications for the commercial treatment of fruit. *Journal of Food Engineering*, 104(1), 1–5. https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2010.11.017

Penteado, A. L., de Castro, M. F. P. M., & Rezende, A. C. B. (2014). *Salmonella enterica* serovar Enteritidis and *Listeria monocytogenes* in mango (*Mangifera indica* L.) pulp: growth, survival and cross-contamination. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *94*(13), 2746–2751. https://doi.org/10.1002/jsfa.6619

Pinela, J., & Ferreira, I. C. F. R. (2017). Nonthermal physical technologies to decontaminate and extend the shelf-life of fruits and vegetables: Trends aiming at quality and safety. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(10), 2095–2111. https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1046547

Raybaudi-Massilia, R., Calderón-Gabaldón, M. I., Mosqueda-Melgar, J., & Tapia, M. S. (2013). Inactivation of *Salmonella enterica* ser. Poona and *Listeria monocytogenes* on fresh-cut “Maradol” red papaya (*Carica papaya* L) treated with UV-C light and malic acid. *Journal Fur Verbraucherschutz Und Lebensmittelsicherheit*, 8(1–2), 37–44. https://doi.org/10.1007/s00003-013-0808-1

Rees, C. E. D., Doyle, L., & Taylor, C. M. (2017). *Listeria monocytogenes*. In C. E. R. Dodd, T. Aldsworth, R. A. Stein, D. O. Cliver, & H. P. Riemann (Eds.), *Foodborne diseases* (pp. 253–276). Academic Press. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385007-2.00012-7

Ribeiro, S. M. R., Queiroz, J. H., Lopes de Queiroz, M. E., Campos, F. M., & Sant’Ana, H. M. P. (2007). Antioxidant in mango (*Mangifera indica* L.) pulp. *Plant Foods for Human Nutrition*, 62(1), 13–17. https://doi.org/10.1007/s11130-006-0035-3

Romero, L., Colivet, J., Aron, N. M., & Ramos-Villarroel, A. (2017). Impact of ultraviolet light on quality attributes of stored fresh-cut mango. *The Annals of the University Dunarea de Jos of Galati Fascicle VI – Food Technology*, *41*(1), 62–80. http://eds.a.ebscohost.com/eds/detail/detail?vid=0&sid=7221daa0-c4ff-44c6-aa97-f4f0446caa61%40sessionmgr4008&bdata=Jmxhbmc9ZXMmc2l0ZT1lZHMtbGl2ZQ%3D%3D#AN=125098472&db=fsr

Ruiz-Cruz, S., Acedo-Félix, E., Díaz-Cinco, M., Islas-Osuna, M. A., & González-Aguilar, G. A. (2007). Efficacy of sanitizers in reducing *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella* spp. and *Listeria monocytogenes* populations on fresh-cut carrots. *Food Control*, 18(11), 1383–1390. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2006.09.008

Santo, D., Graça, A., Nunes, C., & Quintas, C. (2018). *Escherichia coli* and *Cronobacter sakazakii* in ‘Tommy Atkins’ minimally processed mangos: Survival, growth and effect of UV-C and electrolyzed water. Food Microbiology, 70, 49–54. https://doi.org/10.1016/j.fm.2017.09.008

Shama, G. (2007). Process challenges in applying low doses of ultraviolet light to fresh produce for eliciting beneficial hormetic responses. *Postharvest Biology and Technology*, 44(1), 1–8. https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2006.11.004

Sharifi-Yazdi, M. K., & Darghahi, H. (2006). Inactivation of pathogenic bacteria using pulsed UV-light and its application in water disinfection and quality control. *Acta Medica Iranica*, *44*(5), 305–308. https://acta.tums.ac.ir/index.php/acta/article/view/3205

Sivapalasingam, S., Barrett, E., Kimura, A., Van Duyne, S., De Witt, W., Ying, M., Frisch, A., Phan, Q., Gould, E., Shillam, P., Reddy, V., Cooper, T., Hoekstra, M., Higgins, C.,

Sanders, J. P., Tauxe, R. V., & Slutsker, L. (2003). A multistate outbreak of *salmonella enterica* serotype newport infection linked to mango consumption: impact of water-dip disinfestation technology. *Clinical Infectious Diseases*, 37(12), 1585–1590. https://doi.org/10.1086/379710

Syamaladevi, R. M., Lu, X., Sablani, S. S., Insan, S. K., Adhikari, A., Killinger, K., Rasco, B., Dhingra, A., Bandyopadhyay, A., & Annapure, U. (2013). Inactivation of *Escherichia coli* population on fruit surfaces using ultraviolet-C light: Influence of fruit surface characteristics. *Food and Bioprocess Technology*, 6(11), 2959–2973. https://doi.org/10.1007/s11947-012-0989-0

Trivittayasil, V., Nashiro, K., Tanaka, F., Hamanaka, D., & Uchino, T. (2015). Inactivation characteristics and modeling of mold spores by UV-C radiation based on irradiation dose. *Food Science and Technology Research*, 21(3), 365-370. https://doi.org/10.3136/fstr.21.365

Trivittayasil, V., Tanaka, F., & Uchino, T. (2016). Simulation of UV-C intensity distribution and inactivation of mold spores on strawberries. *Food Science and Technology Research*, 22(2), 185–192. https://doi.org/10.3136/fstr.22.185

Wiley, R. C., & Yildiz, F. (2017). Introduction to minimally processed refrigerated (MPR) fruits and vegetables. In R. C. Wiley & F. Yildiz (Eds.), *Minimally processed refrigerated fruits and vegetables* (pp. 3–15). Springer Science+Business Media LLC. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7018-6

Capítulo 3: Estudio del efecto de la dosis óptima de luz UV-C en la calidad del mango

Resumen

La aplicación de luz UV-C es una tecnología alternativa para la desinfección de los productos hortofrutícolas, la cual simultáneamente genera la inactivación microbiana y puede producir alteraciones positivas o negativas en los atributos de calidad del alimento. En este estudio, se evaluó el efecto de la dosis óptima calculada para la inactivación de patógenos correspondiente a 6 kJ/m^2 en los atributos de calidad del mango 'Tommy Atkins' mínimamente procesado durante un período de almacenamiento de 12 días a 5 °C y 85-90 % HR, y se comparó con una tecnología de desinfección convencional (inmersión en una solución de hipoclorito de sodio al 10 mg/L) y un tratamiento control (sin agente desinfectante). Se realizaron los siguientes análisis de atributos de calidad: color, recuentos microbianos, carotenoides totales, fenoles totales, flavonoides, capacidad antioxidante, y análisis sensorial de vida útil. Los resultaron mostraron que la irradiación con UV-C permitió preservar los atributos de calidad y el contenido de la mayoría de los compuestos bioactivos, y cumplir con los requisitos microbiológicos durante todo el período de almacenamiento. No obstante, este tratamiento provocó la pérdida de firmeza y de algunos compuestos antioxidantes lipofílicos en los tejidos del mango. También se encontró que los microorganismos nativos del mango mínimamente procesado se adaptaron al estrés causado por los tratamientos y el almacenamiento. Se concluyó que la dosis óptima de UV-C es ideal para el tratamiento del mango mínimamente procesado desde un enfoque microbiológico como bioquímico.

Palabras clave:

Procesamiento mínimo, Desinfección, Microorganismos nativos, Microbiología predictiva, Atributos de calidad

Abstract

The application of UV-C light is an alternative technology for the disinfection of fruit and vegetable products, which simultaneously generates microbial inactivation and can produce positive or negative alterations in the quality attributes of food. In this study, the effect of the optimal dose calculated for the inactivation of pathogens corresponding to 6 kJ/m^2 was evaluated on the quality attributes of fresh-cut 'Tommy Atkins' mango during a storage period of 12 days at 5 ° C and 85-90% RH, and it was compared with a conventional disinfection technology (immersion in a 10 mg/L sodium hypochlorite solution) and a control treatment (without a disinfectant agent). The following quality attribute analyzes were performed: color, microbial counts, total carotenoids, total phenols, flavonoids, antioxidant capacity, and sensory shelf-life analysis. The results showed that UV-C irradiation allowed to preserve the quality attributes and content of most of the bioactive compounds, and to accomplish the microbiological requirements during the entire storage period. However, this treatment caused the loss of firmness and of some lipophilic antioxidant compounds in the mango tissues. It was also found that the native microorganisms of fresh-cut mango adapted to the stress caused by the treatments and the storage. It was concluded that the optimal dose of UV-C is ideal for the treatment of minimally processed mango from a microbiological and biochemical approach.

Keywords:

Fresh-cut, Sanitation, Native microorganisms, Predictive microbiology, Quality attributes

1. Introducción

El mango (*Mangifera indica* L.) es una fruta tropical de alta producción y consumo en el mundo debido a su atractivo aroma, sabor y su valor nutricional (Ntsoane et al., 2019). Además, es una rica fuente de fibra y su actividad biológica se presenta por su alto contenido de vitaminas, polifenoles, terpenoides, carbohidratos, esteroles, carotenoides, ácidos grasos y aminoácidos (Ediriweera et al., 2017; Kumar et al., 2021). Las principales regiones productoras de mango en el mundo son Asia (60%), América Latina (25%) y África (14%) (Santo et al., 2018). La variedad 'Tommy Atkins' es una de las más apreciadas ya que se caracteriza por su gran tamaño y color, su resistencia a la manipulación y su potencial para el procesamiento mínimo (Dussán-Sarria et al. 2014b).

De acuerdo con Artés-Hernández et al. (2017), las frutas mínimamente procesadas poseen propiedades similares a las frutas frescas, y su consumo está ligado con múltiples beneficios para la salud humana, incluyendo la prevención de diferentes enfermedades crónicas, degenerativas y cardiovasculares. Sin embargo, estos productos son altamente susceptibles al crecimiento microbiano porque se les retira su tejido protector y en la operación de cortado se liberan contenidos celulares que pueden servir como sustrato para los microorganismos causantes del decaimiento y patógenos humanos (Ruiz-Cruz et al., 2010). Por esta razón, es tan importante llevar a cabo estrictas prácticas de higiene y manufactura, así como el reconocimiento de los puntos críticos de control durante su procesamiento (De Corato, 2020).

Con el aumento del consumo de frutas mínimamente procesadas, ha surgido una preocupación entorno a la eficacia de los métodos de desinfección en la reducción de microorganismos causantes de enfermedades transmitidas por los alimentos (ETA) (Pinela & Ferreira, 2017). Se han estudiado distintos métodos químicos y físicos para la desinfección de frutas mínimamente procesadas. La aplicación de UV-C es una tecnología física emergente que permite inactivar microorganismos y simultáneamente, induce mecanismos de defensa en el tejido vegetal. Esto conlleva a la producción de fitoalexinas después del tratamiento, y permite mejorar la conservación y atributos de las frutas mínimamente procesadas (Millán-Villarroel et al., 2015). Dichos efectos dependen de la dosis de UV-C, es decir de la intensidad de radiación por el tiempo del tratamiento. Aunque los efectos benéficos se le atribuyen a las dosis cortas (baja cantidad de radiación o tiempos cortos de exposición) (Garzón-García et al., 2020).

Diferentes estudios precisan que el tratamiento con UV-C preserva los atributos de calidad del mango mínimamente procesado durante el almacenamiento. González-Aguilar et al. (2007a) encontraron que la irradiación del mango ‘Tommy Atkins’ fresco cortado por 1, 3, 5 y 10 min indujo a la acumulación de fenoles y flavonoides, y al aumento de la capacidad antioxidante durante su almacenamiento por 15 días a 5 °C. El tratamiento por 30 s de las rebanadas de mango 'Kent' tuvo un efecto positivo en las características fisicoquímicas, produjo menores recuentos de mesófilos, psicrófilos y mohos y levaduras, y presentó mayor aceptación a nivel sensorial durante el almacenamiento, en comparación con las muestras control (Márquez-Villacorta et al., 2011). La exposición del mango ‘Kent’ mínimamente procesado a 14 kJ/m^2 ocasionó un menor recuento de mesófilos y mohos y levaduras, y el aumento de fenoles totales y flavonoides durante los 15 días de

almacenamiento a 5 °C, en contraste con las muestras irradiadas con una dosis UV-C menor (Márquez-Villacorta & Pretell-Vásquez, 2013). No obstante, en las investigaciones reportadas se han determinado las dosis de tratamiento de forma empírica o desde el ensayo y error. Previamente, se ha calculado mediante el uso de dinámica de fluidos computacional (CFD) una dosis óptima de 6 kJ/m^2 para la inactivación de menos de 2 log UFC/g de los patógenos *E. coli* O157:H7, *Salmonella enterica* serovar Typhimurium y *Listeria monocytogenes* en el mango ‘Tommy Atkins’ mínimamente procesado. De esta forma, el objetivo de esta investigación fue evaluar los efectos de la dosis óptima de UV-C en los atributos de calidad del mango ‘Tommy Atkins’ mínimamente procesado durante el almacenamiento refrigerado, comparando con un control negativo (sin agente desinfectante) y un control positivo (inmersión en una solución de NaClO de 10 mg/L).

2. Materiales y métodos

2.1. Recepción de materia prima

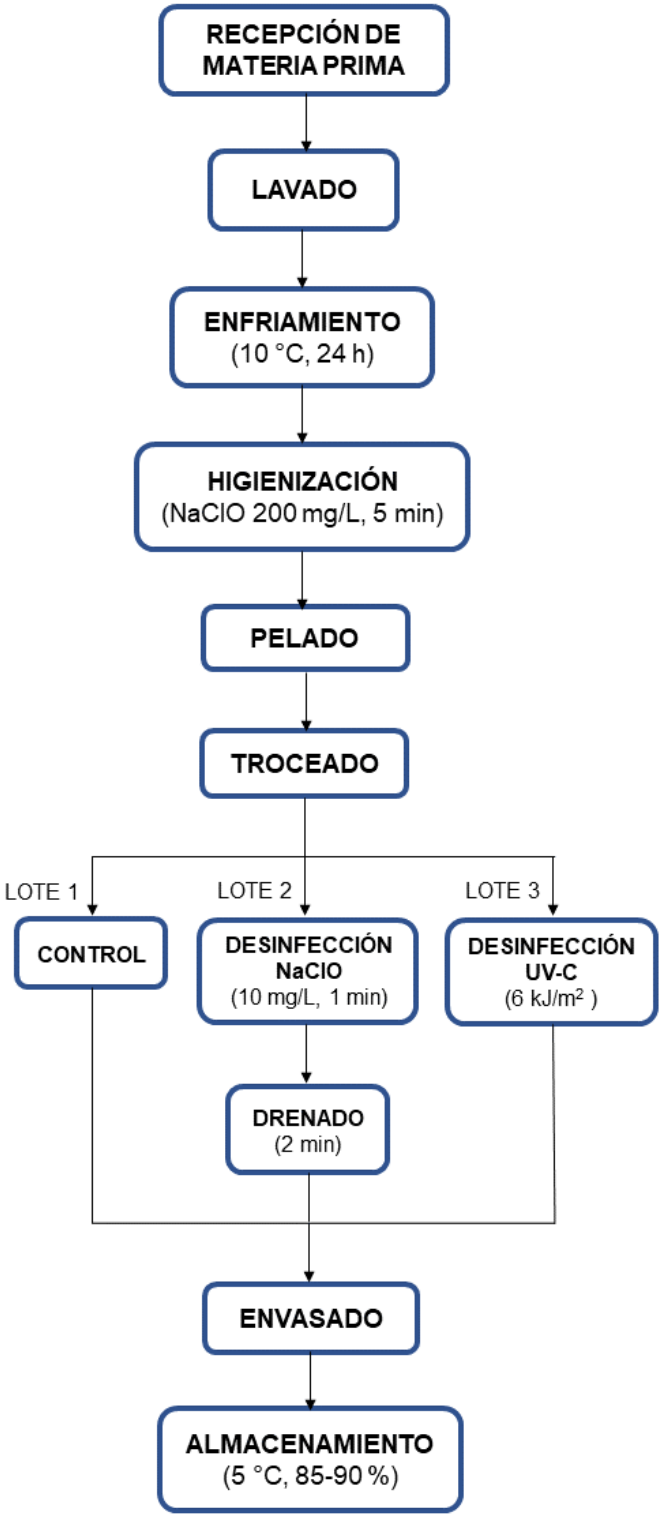
Se utilizaron mangos de variedad ‘Tommy Atkins’, los cuales fueron adquiridos en el mercado local con un tamaño uniforme y un estado de madurez 3 de acuerdo con lo reportado por Kader (2008) y Mahecha et al. (1991). Los frutos fueron lavados con agua potable e higienizados por inmersión durante 5 min en una solución de hipoclorito de sodio a 200 mg/L, y se dejaron secar al aire. Durante la recepción de la materia prima se determinó la longitud, el ancho, el grosor, la densidad aparente, el contenido de sólidos solubles, el pH, la acidez titulable y el índice de maduración de los mangos siguiendo las metodologías planteadas por Ostos et al. (2012) y Dussán-Sarria et al. (2017) con algunas modificaciones.

2.2. Procesamiento mínimo de mango

Para obtener las muestras de mango mínimamente procesado, se siguió la metodología planteada por Dussán-Sarria et al. (2017). Por lo tanto, los mangos fueron mantenidos bajo refrigeración (10 °C) un día antes del procesamiento. Durante el procesamiento, se retiró la cáscara y la semilla, y se sometió la pulpa al corte en forma de trozos con medidas aproximadas de 10 mm de altura, 60 mm de longitud y 20 mm de ancho. El material vegetal se dividió en tres lotes de acuerdo con el tratamiento de desinfección. El primer lote

consistió en el mango mínimamente procesado sin tratamiento (control). El segundo lote se sometió a un tratamiento de desinfección tradicional, por lo que los trozos de mango se sumergieron en una solución de 10 mg/L de hipoclorito de sodio por 1 minuto y se escurrieron por 2 minutos, de acuerdo con lo reportado por Dussán-Sarria et al. (2014a). Al tercer lote se le aplicó una dosis de 6 kJ/m^2 en la cámara de desinfección portátil diseñada por Rodríguez-Mijangos et al. (2014), disponiendo grupos de tres trozos en el centro del equipo a 75 mm de la fuente de radiación por 26 min y 48 s para seguir las disposiciones del Capítulo 2. Dicha dosis también fue aplicada a unos trozos de mango dispuestos de forma normal a la fuente de radiación en 5 filas con una separación equidistante dentro del módulo de esterilización ULTRAVIOLET de 1,30 m de longitud, 0,60 m de altura y de ancho, con 10 lámparas de 30 W (Ultraviolet AAA s.a.s., MDL, ANT). Con este último equipo se aplicó la misma dosis, pero con una intensidad 8,5 veces mayor a la presentada en la cámara de desinfección portátil, de esta forma resultó un tiempo menor correspondiente a 3 min y 6 s. Una vez aplicados los tratamientos de desinfección sobre los trozos de mango, se distribuyeron aproximadamente 90 g de la fruta mínimamente procesada en cada envase de polietileno tereftalato (PET) con las siguientes dimensiones 12 cm de largo, 10 cm de ancho y 6 cm de alto, y permeabilidad a 5 ºC al O_2 de 85,96 $cm^3\ m^{-2}\ día^{-1}$, al CO_2 de 220 $cm^3\ m^{-2}\ día^{-1}$ y al vapor de agua de 28,7 $g\ m^{-2}\ día^{-1}$ (Dussán-Sarria et al., 2019). El mango mínimamente procesado fue mantenido bajo refrigeración a 5 °C y 85-90 % HR por 12 días. En la Figura 3-1 se observa el flujograma del proceso aplicado. Cada 3 días fueron realizadas las determinaciones de los atributos de calidad.

Figura 3-1: Flujograma del procesamiento mínimo de mango con la aplicación de tratamientos de desinfección.



2.3. Análisis fisicoquímicos

La medición de pH se efectuó con un potenciómetro STARTER 2100 (OHAUS, Nänikon, ZH, CH), siguiendo la metodología de AOAC 981.12. El porcentaje de acidez (AT) se valoró por titulación con NaOH al 0,1 N (Fisher Scientific, Waltham, MA, USA) según AOAC 942.15, considerando que el ácido orgánico predominante en el mango es el ácido cítrico. El contenido de sólidos solubles (SS), expresado a través de °Brix se determinó con la metodología definida por la AOAC 932.12, empleando un refractómetro manual (AOAC International, 2012). El índice de madurez (IM) se calculó como la relación entre los sólidos solubles (SS) y la acidez titulable (AT), de acuerdo con Moreno & Deaquiz-Oyola (2015). La firmeza se midió con un texturómetro EZ-S (Shimadzu, Kyoto, KYOTO, JPN) mediante una prueba de fuerza de corte de Warner-Bratzler, siguiendo la metodología planteada por Lázaro & Lorenzo (2015) con algunas modificaciones. Los trozos de mango fueron cortados de forma transversal con una cuchilla Warner-Bratzler de acero y de 2 mm de espesor, a una velocidad de prueba de 100 mm/s. La firmeza se consideró como la fuerza máxima aplicada para romper un trozo de mango y se expresó en N.

2.4. Pérdida de peso

La pérdida de peso se calculó con la Ecuación 15, siendo $\%\mathrm{PP}$ el porcentaje de pérdida de peso, Pi el peso inicial de la muestra (g) y Pf el peso de la muestra durante los días de análisis (g) (Zambrano et al., 2017). Para medir el peso de la muestra se empleó una balanza gramera digital. Los resultados fueron presentados gráficamente como porcentaje de pérdida de peso acumulado (%).

$$\%\mathrm{PP} = \frac{\mathrm{Pi}-\mathrm{Pf}}{\mathrm{Pi}} \times 100 \qquad (15)$$

2.5. Medición de color

Se evaluó la pulpa de mango con un espectrocolorímetro portátil MiniScan XE plus (Hunter LAB, Reston, VA, USA) en las coordenadas CIELAB. L* o luminosidad toma valores cercanos a 100 para el color blanco y de 0 para el color negro, el parámetro a* toma valores positivos para colores rojos y los negativos corresponden a colores verdes, y el parámetro b* toma valores positivos para colores amarillos y valores negativos para colores azules. El equipo fue calibrado con una placa reflectora (X=80,1, Y=85, Z=90,6), considerando un iluminante estándar D65 y un observador de 10°. El atributo cuantitativo del color o croma

(C*), el atributo cualitativo del color o tono (h*) y la diferencia total de color (ΔE*) se calcularon de acuerdo con Pathare et al. (2013).

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (16)$$

$$h^* = \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (17)$$

$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta a^{*2} + \Delta b^{*2} + \Delta L^{*2}} = \sqrt{(a^*_2 - a^*_1)^2 + (b^*_2 - b^*_1)^2 + (L^*_2 - L^*_1)^2} \quad (18)$$

donde el subíndice 1 es para la muestra de día 0 y el subíndice 2 corresponde a los demás días contemplados para el almacenamiento de los trozos de mango.

2.6. Análisis microbiológicos

Siguiendo las metodologías de Ruiz-Cruz et al. (2010) e Hinojosa et al. (2013), se tomaron tres muestras al azar de 15 g y se homogenizaron individualmente en 135 mL de AP al 0,1 % (Difco, Sparks, MD, USA) dentro de una bolsa estéril (Nasco, Whirl-Pak, WI, USA) por 2 min. Posteriormente, se realizaron diluciones seriadas con AP al 0,1 % y se sembraron alícuotas de 1 y 5 mL en placas con diferentes medios. Las placas con el Agar de Recuento en Placa (Difco, Sparks, MD, USA) y Agar Rojo Violeta Bilis (BD, East Rutherford, NJ, USA) se dejaron en incubación por aproximadamente 48 h (Incubadora analógica 132000, Boekel Scientific, Feasterville, PA, USA), para el recuento de mesófilos aerobios y coliformes totales, respectivamente. Otras placas con el Agar de Recuento en Placa y Agar Papa Dextrosa (Difco, Sparks, MD, USA) se incubaron por 7 días a 5 °C y 22 °C para el recuento de psicrófilos y mohos y levaduras, respectivamente. Los resultados se expresaron como log UFC/g de mango mínimamente procesado. El análisis de vida útil en términos microbiológicos se efectuó de acuerdo con los índices máximos permisibles de los requisitos microbiológicos propuestos en la NTC 6005 y en la Resolución 3929 de 2013 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2013; Ministerio de Salud y Protección Social, 2013).

2.7. Modelamiento de las cinéticas de inactivación microbiana

Los datos de la inactivación microbiana fueron analizados mediante las Ecuaciones 7 y 9 reportadas en el Capítulo 1, basándose en la ecuación logarítmica lineal y el modelo de

Weibull en función de los días de almacenamiento (t corresponde a días). El ajuste a los modelos se evaluó calculando R^2, $\overline{R}^2$ y RMSE.

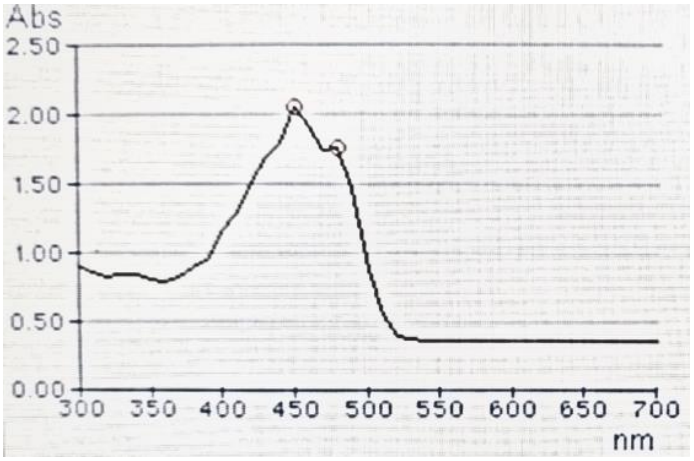
2.8. Preparación de extractos

Los extractos se obtuvieron siguiendo la metodología de Ortega et al. (2013) con algunas modificaciones. Se pesaron 2 g de las muestras frescas (Balanza electrónica PX323, OHAUS, Nänikon, ZH, CH) y se agregaron 3 mL de etanol absoluto (Reactivos Meyer, CX, MEX). Las soluciones fueron mezcladas (Agitador vórtex MX-S, Science MED, Helsinki, HE, FIN), llevadas a sonicación durante 30 minutos (Baño digital Branson 1800, Emerson, San Luis, MO, USA), y dispuestas en refrigeración y oscuridad durante la noche. Posteriormente, estas soluciones fueron centrifugadas a 1500 rpm por 20 minutos (COMPACT II CENTRIFUGE, BD, East Rutherford, NJ, USA). El sobrenadante obtenido fue empleado para la cuantificación de compuestos bioactivos.

2.9. Cuantificación de carotenoides totales y equivalentes de actividad de retinol (RAE)

Los carotenoides totales se determinaron en función al β-caroteno, de acuerdo con lo planteado por Ordoñez-Santos et al. (2018). El espectro visible de absorción resultante del estándar de β-caroteno (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA) en etanol absoluto mostró un pico máximo de absorción a 450 nm (Figura 3-2). Por lo tanto, se adicionaron 300 µL de extracto en cada pocillo de la microplaca y se midió la absorbancia a 450 nm en el lector de microplaca de 96 pocillos Multiskan GO (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA). Se realizó una curva de calibración con concentraciones entre 0,002 y 0,1 mg/mL del estándar de β-caroteno (R^2=0,991). La calibración fue medida por triplicado considerando el mismo volumen usado para los extractos de las muestras. Los resultados fueron reportados como mg β-caroteno/100 g de muestra fresca. Para calcular los equivalentes de actividad de retinol (RAE), se empleó un factor de conversión de 12 para β-caroteno (Courraud et al., 2013). Los resultados fueron expresados como mg RAE/100 g muestra fresca.

Figura 3-2: Espectro visible de absorción del estándar de β-caroteno en etanol absoluto.



2.10. Cuantificación de fenoles totales y flavonoides

Se determinaron el contenido total de fenoles y flavonoides siguiendo la metodología reportada por Pérez-Perez et al. (2020). Para la cuantificación de fenoles totales, a cada pocillo de la microplaca se le agregaron inicialmente 10 µL de extracto y 25 µL de solución de Folin 1 N (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA). La mezcla se reposó por 5 min en refrigeración y posteriormente, se adicionaron 25 µL de Na_2CO_3 al 20 % (CTR SCIENTIFIC, Monterrey, NL, MEX) y 140 µL de agua destilada. La microplaca se dejó en reposo durante media hora y se midió la absorbancia a 760 nm en el lector. Se realizó una curva de calibración con concentraciones entre 0,1 y 1 mg/mL del estándar ácido gálico (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA), y la calibración fue medida por triplicado (R^2=0,992). Los resultados se expresaron como mg EAG/100 g de muestra fresca.

Para los flavonoides, se adicionó a cada pocillo de la microplaca 80 uL de extracto y 80 uL de una solución etanólica de tricloruro de aluminio (20 g/L) (Reactivos Meyer, CX, MEX). La microplaca se agitó por 30 s y se dejó 1 h en oscuridad a una temperatura de 25 °C. Posteriormente, se agitó una vez más durante 30 s y se midió la absorbancia a 415 nm en el lector de microplaca. La curva de calibración se efectuó con el estándar de quercetina (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA), considerando concentraciones de 0 a 0,08 mg/mL (R^2=0,999). La calibración fue medida por triplicado. Los resultados se reportaron como mg EQ/100 g de muestra fresca.

2.11. Determinación de la capacidad antioxidante

La capacidad antioxidante se obtuvo mediante los métodos de DPPH, ABTS y FRAP, de acuerdo con la metodología reportada por Pérez-Perez et al. (2020) y González-Vega et al. (2021) con algunas modificaciones. Para la determinación de la capacidad antioxidante por captación del radical DPPH, se pesó 1 mg del radical DPPH (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA) y se disolvió en 1 mL de etanol absoluto. De esta solución inicial, se agregaron 0,75 mL a 29,25 mL de etanol. La absorbancia de la disolución resultante se ajustó a 0,7 para una longitud de onda de 515 nm. Se añadió a los pocillos de la microplaca 200 µL de la disolución resultante y 20 µL de extracto, se reposó la microplaca media hora y se midió la absorbancia a una longitud de onda de 515 nm en el lector de placas. Se efectuó una curva de calibración con el estándar Trolox (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA) considerando concentraciones entre 0 y 0,2 mg/mL (R^2=0,992), y la calibración fue medida por triplicado. Los resultados se expresaron como mM ET/g muestra fresca.

Para la determinación de la capacidad antioxidante por captación del radical ABTS, se disolvieron 19,3 mg de ABTS (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA) en 5 mL de agua destilada. Aparte se mezclaron 0,0378 g de persulfato de potasio (Jalmek, San Nicolás de los Garza, NL, MEX) y 1 mL de agua destilada. De la segunda solución, se agregaron 88 µL a la primera solución, y se dejó en reposo en oscuridad por 12 a 16 h en refrigeración. De esta última solución preparada, se añadió 1 mL a 88 mL de etanol y se ajustó la absorbancia a un valor de 0,7 en una longitud de onda de 734 nm. Para la medición de las muestras, se tomaron 270 µL de la solución final y 20 µL de extracto. Se evaluó la absorbancia a 734 nm después de 30 min de reposo. La curva de calibración se realizó con el estándar Trolox considerando concentraciones de 0 a 0,01 mg/mL (R^2=0,994). La calibración fue medida por triplicado y los resultados se expresaron como mM ET/g muestra fresca de muestra fresca.

Para el poder antioxidante reductor férrico (FRAP), las soluciones stock fueron un buffer de acetato de sodio 300 mM (CTR SCIENTIFIC, Monterrey, NL, MEX) a pH 3,6, una solución de $FeCl_3$ 20 mM (CTR SCIENTIFIC, Monterrey, NL, MEX) y una solución de 2,4,6-tripiridil-s-triazin 10 mM (TPTZ; Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA) en 40 mM de HCl (Reactivos Meyer, CX, MEX). Se obtuvo la solución de trabajo al agregar las soluciones stock en una relación 10:1:1 (buffer: $FeCl_3.6H_2O$: TPTZ-HCl). En cada pocillo de la microplaca se adicionaron 280 µL de la solución de trabajo y 20 µL de extracto. Se midió

la absorbancia a 638 nm después de una incubación de 30 min a 37 °C. La curva de calibración se esbozó con el estándar Trolox, con concentraciones entre 0 y 0,4 mg/mL (R^2=0,999). La calibración fue medida por triplicado y los resultados se reportaron como mM ET/g muestra fresca.

2.12. Análisis sensorial de vida útil

El tiempo medio de vida útil sensorial se estimó siguiendo la metodología de García-Mogollón, Cury-Regno & Dussán-Sarria (2010). Se evaluó la apariencia global de los trozos de mango tratados con las diferentes alternativas de desinfección mediante una escala de grado de satisfacción (Tabla 3-1), considerando 30 jueces consumidores no entrenados con edades entre 20 a 50 años.

Tabla 3-1: Escala hedónica de 9 puntos utilizada para la evaluación sensorial.

Grado de satisfacción	Calificación
Me gustó extremamente	1
Me gustó mucho	2
Me gustó moderadamente	3
Me gustó ligeramente	4
Indiferente	5
No me gustó ligeramente	6
No me gustó moderadamente	7
No me gustó mucho	8
No me gustó extremamente	9

Adaptado de: García-Mogollón et al., 2010

Siguiendo la metodología de García-Mogollón et al. (2010), se estableció un valor de 4 como criterio de censura, correspondiente a la calificación mínima en el grado de satisfacción. Se tomó el tiempo de los valores observados y se marcaron aquellos valores que estaban por debajo de dicho criterio. De esta forma, se ordenaron las observaciones de acuerdo con el tiempo de las muestras que fallaron y no fallaron. Este orden de suceso posteriormente se invirtió y se obtuvo el rango inverso (k). Mediante la Ecuación 19 se calcularon los valores de riesgo ($h(t)$) de las muestras que fallaron.

$$h(t) = \frac{100}{k} \quad (19)$$

La función de distribución acumulativa de Weibull (Ecuación 20) definió la probabilidad de que una muestra fallara antes de un tiempo determinado (Hough, Puglieso, Sanchez, & da Silva, 1999).

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}}, t \geq 0 \quad (20)$$

donde α es el parámetro de escala y β es el parámetro de forma. La magnitud de β describe una tasa de falla creciente o decreciente. Por otro parte, se tuvo en cuenta la función de riesgo planteada por García-Mogollón et al. (2010) (Ecuación 21).

$$H(t) = \frac{f(t)}{1-F(X)} \quad (21)$$

donde $f(t) = \frac{\beta}{\alpha^{\beta}} x^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}}$, y corresponde a la función de densidad de probabilidad. La Ecuación 21 se integró con respecto al tiempo para obtener la función de riesgo acumulado (Ecuación 22). Al reemplazarse la Ecuación 22, se obtuvo la Ecuación 23.

$$H(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{f(t)}{1-F(X)} = -\ln[1 - F(t)] \quad (22)$$

$$H(t) = \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta} \quad (23)$$

Al aplicarse logaritmo en ambos lados de la Ecuación 9, el tiempo se expresó como función del riesgo acumulado (Ecuación 24).

$$\log(t) = \frac{1}{\beta}\log(H(t)) + \log(\alpha) \quad (24)$$

Con los parámetros de la distribución de Weibull se halló E(t) empleando la Ecuación 25 planteada por García-Mogollón et al. (2010), la cual representó el tiempo medio de vida útil en el que los consumidores rechazaron el producto (Hough, Langohr, Gomez, & Curia, 2003).

$$E(t) = \alpha\Gamma\left[1 + \frac{1}{\beta}\right] \quad (25)$$

donde Γ es la función Gamma.

2.13. Diseño experimental y análisis estadístico

Fueron evaluados 3 tratamientos derivados de las condiciones de desinfección (hipoclorito, UV-C y sin desinfección) designados de la forma que se muestra en la Tabla 3-2. Todos los análisis estadísticos se efectuaron en Minitab 17 (Minitab Inc., State College, PA, USA).

Tabla 3-2: Condiciones de desinfección estudiadas en mango 'Tommy Atkins' mínimamente procesado.

Denominación de condición de desinfección	Descripción
C	Control (sin tratamiento de desinfección)
H	Tratamiento con hipoclorito de sodio
UV	Tratamiento con UV-C

Se empleó un diseño completamente al azar con dos factores y un arreglo factorial 3×5. El primer factor (A) fue el tipo de desinfección del mango mínimamente procesado con tres niveles (control (C), hipoclorito de sodio (H) y UV-C (UV)). Mientras que el segundo factor (B) correspondió al tiempo de almacenamiento del mango mínimamente procesado en refrigeración, comprendiendo cinco niveles (0, 3, 6, 9 y 12 días). Los trozos de mango del tratamiento control se consideraron como un control negativo y aquellos tratados con NaClO como un control positivo. La unidad experimental correspondió a cada envase en el que se acondicionaron los trozos del fruto. Los experimentos de los análisis microbiológicos se realizaron por duplicado para las tres muestras tomadas de cada envase. Los análisis fisicoquímicos, la medición de color y la cuantificación de carotenoides totales, fenoles totales, flavonoides y capacidad antioxidante se efectuaron por triplicado. Los resultados se presentaron como la media de tres réplicas ± desviación estándar. Se efectuó un análisis de varianza de dos vías y una prueba Tukey para comparar los valores medios entre tratamientos y deducir el efecto de los factores en los análisis fisicoquímicos, los parámetros de color, la población microbiana nativa, los carotenoides totales, los fenoles totales, los flavonoides y la capacidad antioxidante del mango mínimamente procesado ($p<0,05$).

Los parámetros de inactivación de los microorganismos nativos del mango mínimamente procesado se obtuvieron con los promedios de las reducciones logarítmicas de las poblaciones microbianas durante el tiempo de almacenamiento. Se emplearon los métodos mínimos cuadrados lineales y no lineales con la resolución del algoritmo de Gauss-Newton (número máximo de iteraciones de 200 y una tolerancia de convergencia de 0,00001) para evaluar el ajuste a la ecuación logarítmica lineal y al modelo de Weibull, respectivamente. La relación entre carotenoides totales, fenoles totales, flavonoides y las pruebas de capacidad antioxidante para los distintos tratamientos de desinfección se estableció mediante una matriz de correlación y el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson (ρ).

Para el análisis de vida útil sensorial, se efectuó un análisis de varianza de dos vías para evaluar el efecto del tratamiento de desinfección (A) y del tiempo de almacenamiento (B) en el grado de satisfacción del mango mínimamente procesado ($p<0.05$). A los datos resultantes de la función de riesgo acumulado se les realizó una prueba de Anderson-Darling para probar que no cumplían el supuesto de normalidad ($p<0,05$) y se ajustaban a una distribución exponencial ($p\approx0,003$), siguiendo la metodología de Güler et al. (2017). El método de mínimos cuadrados lineales se empleó para desarrollar la regresión exponencial de la distribución de Weibull (Ecuación 24) y obtener los valores de los parámetros α y β.

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización de la materia prima

En la Tabla 3-3 se presentan los valores de las propiedades fisicoquímicas, firmeza y de color superficial realizadas durante la recepción de la materia prima (mango entero). Estos parámetros permitieron constatar la variedad y el estado de madurez del mango previo a su procesamiento. La longitud, el ancho y el grosor fueron similares a las reportadas por Mahecha et al. (1991) para el mango 'Tommy Atkins'. Ostos et al. (2012) presentaron una densidad aparente ligeramente mayor (961,2 kg/m^3) y un pH menor (3,46) a aquellos hallados en la presente investigación. Tanto los sólidos solubles como la acidez titulable correspondieron a los de un mango de variedad 'Tommy Atkins' maduro (Mahecha et al., 1991; Ramírez-Méndez et al., 2010; Zafar & Sidhu, 2017). Los parámetros de color en el sistema de CIE LAB permitieron calcular los atributos C* y h*, los cuales reflejaron que los

trozos de mango tenían una saturación de color o brillo considerable y un tono similar al amarillo-naranja, respectivamente (Pathare et al., 2013). La firmeza fue mayor a la reportada por Márquez-Villacorta & Pretell-Vásquez (2013) para la pulpa de mango durante el día de procesamiento (≈4 N). Este valor pudo diferir por el espesor de la muestra y la técnica para evaluar la firmeza.

Tabla 3-3: Propiedades fisicoquímicas, firmeza y color superficial del mango entero.

Propiedad	Resultado
Longitud (cm)	11,467±0,351
Ancho (cm)	9,667±0,115
Grosor (cm)	8,800±0,265
Densidad aparente (kg/m^3)	923,940±13,311
pH	3,857±0,042
SST (°Brix)	16,033±0,058
AT (%)	0,465±0,005
L*	64,253±0,750
a*	11,983±0,230
b*	61,987±1,585
C*	63,134±1,600
h*(°)	79,057±0,069
Firmeza (N)	8,008±1,236

3.2. Propiedades fisicoquímicas del mango mínimamente procesado

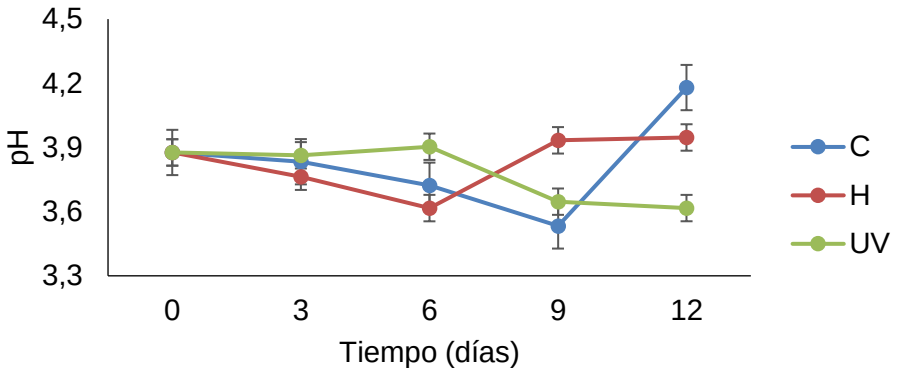
El efecto de los factores tratamiento de desinfección (A) y tiempo de almacenamiento (b) en las propiedades fisicoquímicas del mango mínimamente procesado se presentan en la Tabla 3-4.

Tabla 3-4: Valores de las propiedades fisicoquímicas de mango mínimamente procesado variedad 'Tommy Atkins'.

Orden de corrida	Tratamiento	Tiempo (días)	pH	SS (°Brix)	AT (%)	Índice de madurez	Firmeza (N)
1	C	0	3,877±0,115^{bcd}	16,033±0,058^{ef}	0,484±0,010^{e}	33,162±0,809^{a}	4,459±1,285^{abcd}
2	C	3	3,833±0,021^{bcd}	16,767±0,058^{cde}	0,798±0,043^{bcd}	21,052±1,092^{bcd}	5,795±0,240^{ab}
3	C	6	3,723±0,023^{de}	16,267±0,058^{cdef}	0,801±0,040^{bcd}	20,331±0,945^{cd}	5,106±0,099^{abc}
4	C	9	3,533±0,031^{f}	15,733±0,115^{f}	0,852±0,014^{ab}	18,472±0,426^{de}	3,236±0,095^{cde}
5	C	12	4,180±0,036^{a}	16,533±0,462^{cdef}	0,756±0,022^{cd}	21,873±0,902^{bc}	3,526±0,747^{cde}
6	H	0	3,877±0,115^{bcd}	16,033±0,058^{ef}	0,484±0,010^{e}	33,162±0,809^{a}	4,459±1,285^{abcd}
7	H	3	3,763±0,040^{cde}	15,933±0,058^{f}	0,725±0,044^{d}	22,037±1,317^{bc}	6,389±0,238^{a}
8	H	6	3,617±0,032^{ef}	14,133±0,058^{g}	0,820±0,035^{bc}	17,269±0,811^{e}	4,150±0,288^{abcde}
9	H	9	3,933±0,045^{bc}	16,033±0,058^{ef}	0,796±0,041^{bcd}	20,175±1,084^{cd}	3,907±1,237^{bcde}
10	H	12	3,947±0,025^{b}	16,867±0,058^{cd}	0,804±0,026^{bcd}	20,982±0,605^{bcd}	2,033±0,251^{e}
11	UV	0	3,877±0,115^{bcd}	16,033±0,058^{ef}	0,484±0,010^{e}	33,162±0,809^{a}	4,459±1,285^{abcd}
12	UV	3	3,863±0,047^{bcd}	17,000±0,100^{c}	0,735±0,025^{d}	23,163±0,872^{b}	5,028±0,474^{abc}
13	UV	6	3,903±0,023^{bc}	19,067±0,115^{b}	0,840±0,021^{ab}	22,707±0,669^{bc}	2,554±0,341^{de}
14	UV	9	3,647±0,032^{ef}	20,867±0,902^{a}	0,909±0,010^{a}	22,959±0,966^{b}	1,974±0,427^{e}
15	UV	12	3,617±0,025^{ef}	16,067±0,115^{def}	0,867±0,017^{ab}	18,537±0,350^{de}	2,099±0,715^{e}

Los valores son medias ± desviación estándar. Las medias que no comparten una misma letra por columna son significativamente diferentes ($p<0,05$).

Figura 3-3: Evolución de los valores de pH del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el almacenamiento refrigerado. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado.

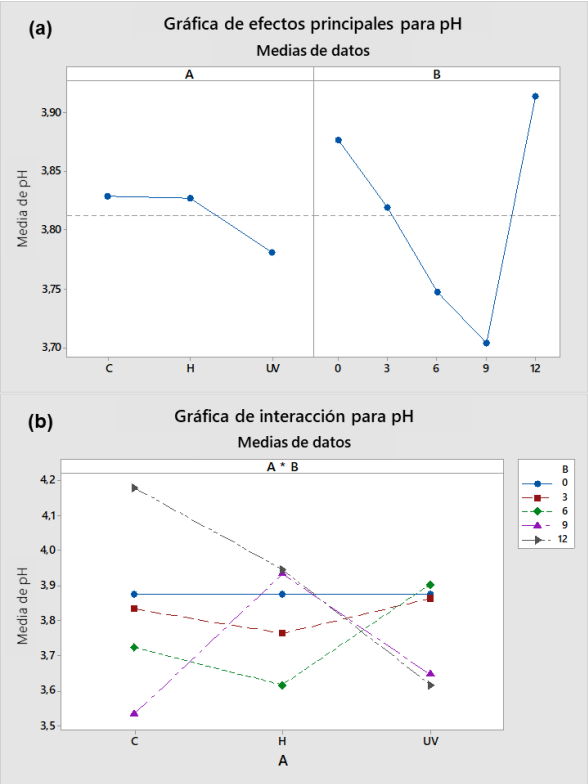


En la Figura 3-3, se observa que el pH de los trozos de mango del tratamiento C y H tuvo tendencia a aumentar durante el tiempo de almacenamiento, mientras que el pH de los trozos de mango sometidos a UV-C fue disminuyendo progresivamente hasta el día 9 de almacenamiento. Según Romero et al. (2017), el aumento del pH indicó que los trozos de mango sometido a los tratamientos C y H se encontraba entrando a la etapa de la senescencia. De esta forma, se notó un efecto positivo del tratamiento del fruto mínimamente procesado con la UV-C, ya que permitió retrasar dicha etapa. Djioua et al. (2010) reportaron que el mango 'Tommy Atkins' mínimamente procesado tratado con 10 ppm de hipoclorito de sodio por 1 minuto y mantenido a 6 °C en envases PET por 9 días, presentó una disminución del pH al final del almacenamiento. El valor de pH al inicio del almacenamiento fue de 4,46 y al final del almacenamiento, el pH fue de 4,12. Mohamed et al. (2017) notaron que el pH del banano *Musa* AAA Berangan tratado con diferentes dosis de UV-C (0, 0,01, 0,02, 0,03, 0,04, 0,06, 0,10, 0,20 y 0,30 kJ/m^2), aumentó durante los primeros días de almacenamiento y tendió a disminuir al final del almacenamiento. Por el contrario, George et al. (2016) no observaron una variación de pH del mango 'Chokanan' fresco cortado que fue irradiado con UV-C (1,764, 3,525 y 7,056 J/m^2) durante el almacenamiento.

Según el análisis de varianza de dos vías (Tabla A-1 de los Anexos), el factor tratamiento de desinfección no tuvo un efecto significativo en el pH del mango mínimamente procesado ($p>0,05$). Sin embargo, el tiempo de almacenamiento y la interacción entre los factores tuvieron efecto significativo en este parámetro ($p<0.05$). En las gráficas factoriales para

cada atributo de calidad, el factor A corresponde al efecto del factor tipo de desinfección sobre el atributo y el factor B al efecto del factor tiempo de almacenamiento. Mediante estas gráficas se constató que el valor promedio del pH fue mayor al final del almacenamiento y para las muestras del tratamiento C; y menor al inicio del almacenamiento y para las muestras tratadas con UV (Figura 3-4a). También se notó que la variación del pH durante el tiempo de almacenamiento fue mayor para las muestras del tratamiento C que para las correspondientes a los otros tratamientos (Figura 3-4b). No obstante, el mango mínimamente procesado sometido a los diferentes tratamientos y almacenado en refrigeración presentó valores de pH aceptables a nivel comercial, de acuerdo con lo descrito por Ramírez-Méndez et al. (2010). Considerando el pH como factor importante de estabilidad y observando que el mango presentó valores de pH inferiores a 4,5, se puede afirmar que se trata de un alimento estable desde el punto de vista de contaminación biológica (Azeredo, 2004).

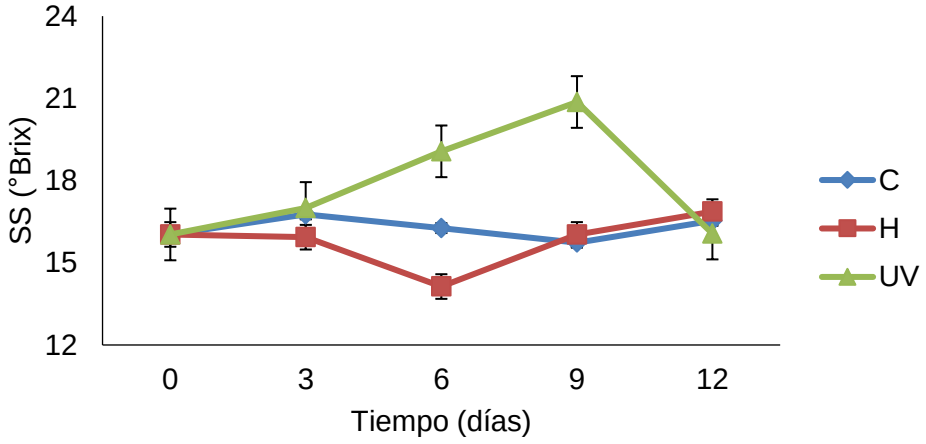
Figura 3-4: Gráficas factoriales para pH. Gráfica de efectos principales (a) y gráfica de interacción (b).



En la Figura 3-5, se evidencia que el contenido de sólidos solubles de los trozos de mango de los tratamientos H y UV tendió a aumentar durante el almacenamiento, y sus valores

mínimos se presentaron en el día 6 y 12, respectivamente. El incremento del contenido de SS en el mango MP se atribuye a la hidrólisis de polisacáridos por acción de los microorganismos y la maduración, y a la degradación de los ácidos orgánicos (George et al., 2015; Khubone & Mditshwa, 2018). Por otra parte, el contenido de SS de las muestras C se mantuvo casi constante y con un ligero decrecimiento durante el día 6 de almacenamiento. Esto pudo estar relacionado con la temperatura de almacenamiento y la atmósfera modificada lograda con el envase PET, lo cual afecta la tasa de transpiración y la transpiración, generando ligeros cambios en la concentración del agua del fruto y la dilución de los SS por evaporación (Márquez-Villacorta & Pretell-Vásquez, 2013; Zambrano-Zaragoza et al., 2021). Márquez-Villacorta et al. (2011) encontraron que los SS de las rebanadas de mango “Kent” del tratamiento control y de aquellas tratadas con UV-C por 30 s, aumentaban durante su almacenamiento a 5 °C por 20 días. Por el contrario, de Almeida-Lopes et al. (2021) reportaron una ligera disminución en el contenido de SS durante los 12 días de almacenamiento a 3 °C del mango ‘Tommy Atkins’ mínimamente procesado tratado con un producto clorado (200 mg/L).

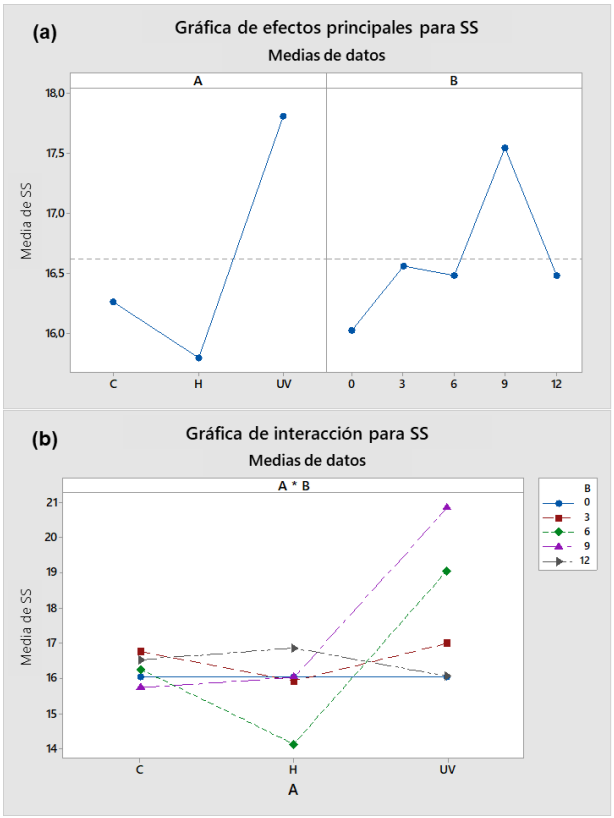
Figura 3-5: Evolución del contenido de sólidos solubles del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el tiempo de almacenamiento. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado.



Con los resultados presentados en la Tabla A-2 de los Anexos, se estableció que el tratamiento de desinfección, el tiempo de almacenamiento y la interacción entre estos factores tuvieron efecto significativo en el contenido de SS del mango mínimamente procesado ($p<0.05$). Se encontró mediante la Figura 3-6a, que el promedio de los SS fue

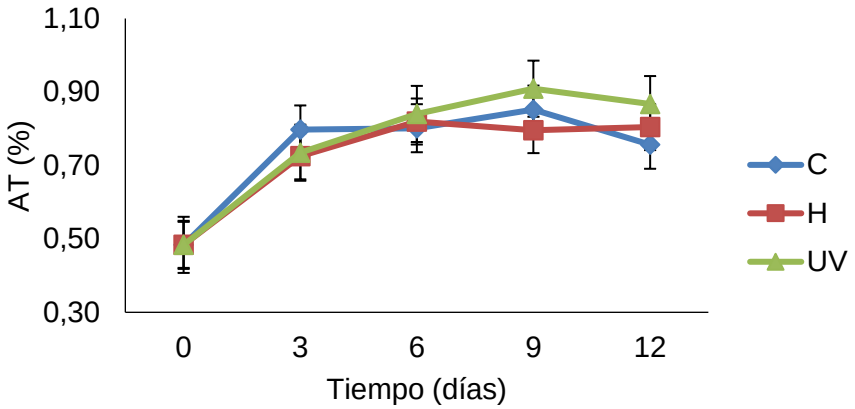
mayor para el día 9 de almacenamiento y para las muestras del tratamiento UV; y menor al inicio del almacenamiento y para los trozos de mango del tratamiento H. Según Pinzón et al. (2007), la acumulación de azúcares durante el almacenamiento se da hasta la madurez fisiológica, y estos disminuyen durante la actividad respiratoria y el inicio de la senescencia, por tanto se cree que la disminución del contendido de SS entre el día 9 y el día 12 de almacenamiento del mango tratado con UV, se debió al efecto natural de la senescencia del fruto. También se notó mayor variación en los valores de SS durante el tiempo de almacenamiento para las muestras del tratamiento UV, mientras que los valores de SS de las muestras del tratamiento C fueron similares (Figura 3-6b). Pan & Zu (2012) notaron que los SS de las rodajas de piña irradiadas con 9,5 kJ/m^2 por 60 y 90 s aumentaron durante el inicio del almacenamiento, y disminuyeron después del día 3 y 6 de almacenamiento para las muestras control (sin tratamiento) e irradiadas, respectivamente. Las muestras irradiadas presentaron mayor concentración de SS durante el almacenamiento.

Figura 3-6: Gráficas factoriales para sólidos solubles. Gráfica de efectos principales (a) y gráfica de interacción (b).



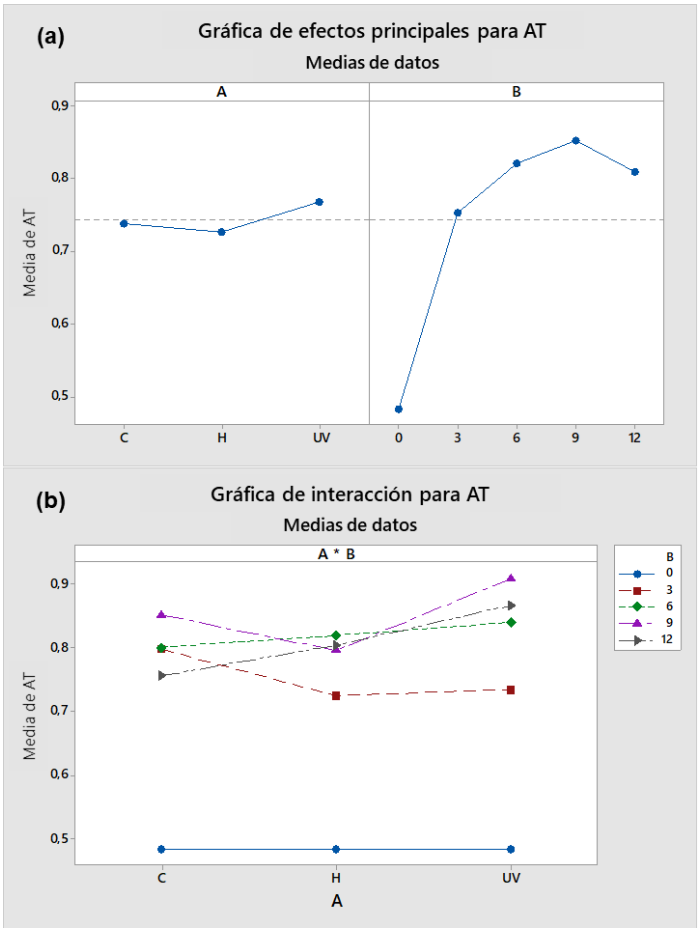
La acidez titulable de los trozos de mango del tratamiento C exhibió un aumento hasta el día 9 de almacenamiento y posteriormente, disminuyó ligeramente (Figura 3-7). La reducción de los niveles de acidez se puede vincular inicialmente con la maduración del fruto, aunque también se puede generar por el daño del procesamiento mínimo y el incremento de la actividad del sistema de reparación celular que conlleva a una mayor demanda de energía metabólica proveniente de los azúcares, ácidos y proteínas del proceso respiratorio (Barreto et al., 2021). Para las muestras de los tratamientos H y UV, la AT aumentó hasta el día 3 de almacenamiento y después se mantuvo ligeramente constante. Esto pudo suceder debido a que los tratamientos de desinfección y la atmósfera modificada ralentizaron la tasa de respiración y la tasa de utilización del sustrato respiratorio fue mínima conforme a la etapa de senescencia (Razali et al., 2021). Según Márquez-Villacorta et al. (2011), las rebanadas de mango ‘Kent’ sin tratamiento y aquellas sometidas a irradiación UV por 30 s presentaron una disminución de la acidez titulable durante los 20 días de almacenamiento a 85-90% de HR. Djioua et al. (2010) reportaron que la AT del mango “Tommy Atkins” mínimamente procesado tratado con 10 ppm de hipoclorito de cloro se mantuvo ligeramente constante durante el almacenamiento a 6 °C por 9 días. Por tanto, los valores contantes de AT entre los días 9 y 12 del mango tratado con UV-C es debido a la etapa natural de senescencia y a su vez consecuencia del efecto desacelerador de la luz UV-C en el metabolismo del fruto.

Figura 3-7: Evolución de los valores de acidez titulable del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el almacenamiento refrigerado. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado.



De acuerdo con la Tabla A-3 de los Anexos, el tratamiento de desinfección, el tiempo de almacenamiento y la interacción entre estos factores tuvieron efecto significativo en la AT del mango mínimamente procesado ($p<0.05$). El promedio de la AT fue mayor para el día 9 de almacenamiento y para los trozos de mango del tratamiento UV; y menor al principio del almacenamiento y para las muestras del tratamiento H (Figura 3-8a). La variación más significativa de la AT se produjo entre el día 0 hasta el día 3 de almacenamiento (Figura 3-8b). Según Pan & Zu (2012), el aumento de la acidez titulable durante el almacenamiento se puede relacionar con el incremento de la población microbiana en el material vegetal.

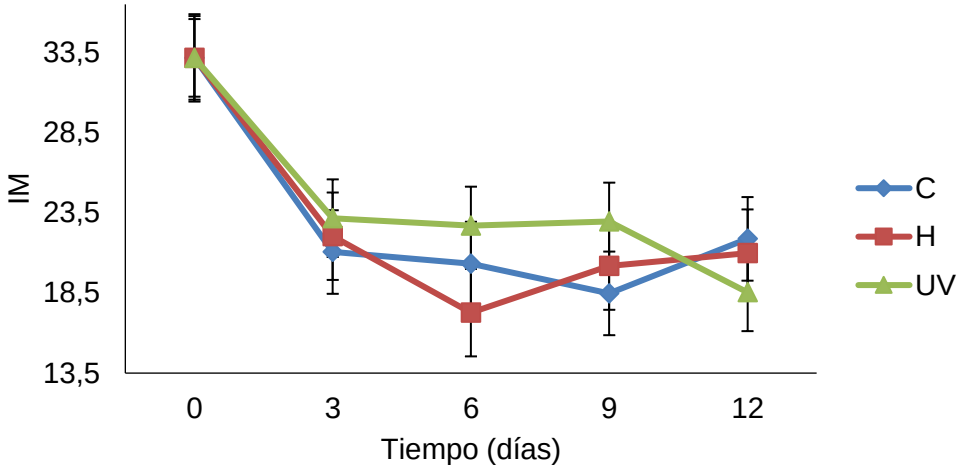
Figura 3-8: Gráficas factoriales para acidez titulable. Gráfica de efectos principales (a) y gráfica de interacción (b).



El índice de madurez (IM) de los trozos de mango de los tratamientos C, H y UV tendió a disminuir hasta el día 3 de almacenamiento, y posteriormente se mostró casi constante hasta el final del almacenamiento (Figura 3-9). Villamizar-Vargas et al. (2019) reportaron que el IM del mango 'Tommy Atkins' entero aumentaba conforme su almacenamiento por

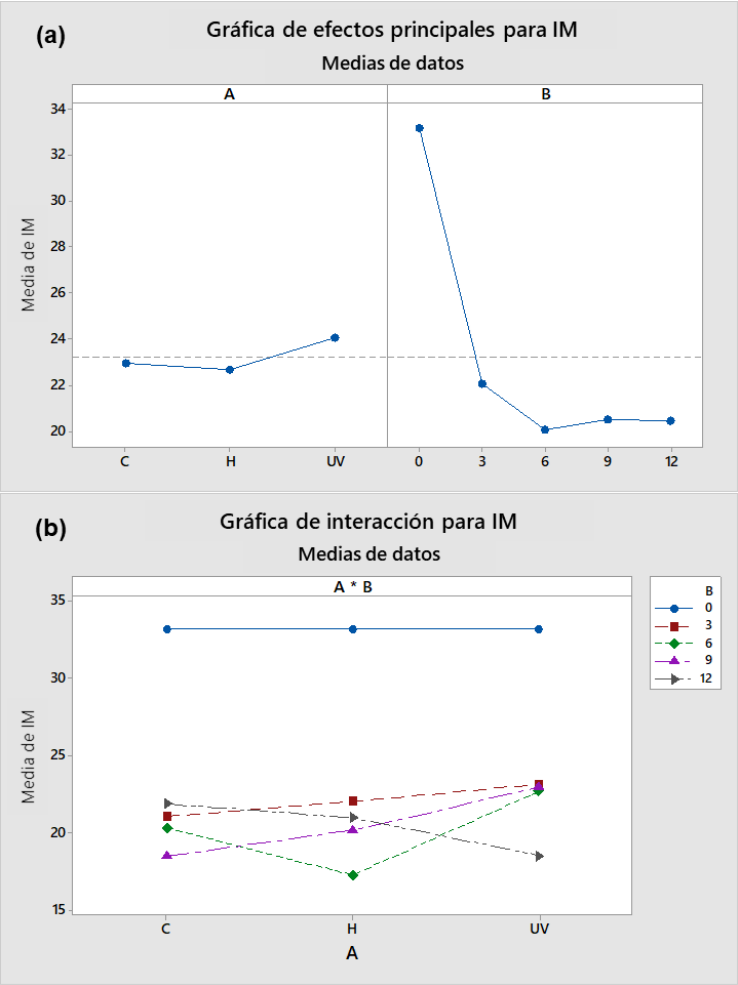
nueve días a temperatura ambiente, debido a que se iba desarrollando a la par la maduración y el aumento de SS. El contenido de los sólidos solubles también pudo verse ligeramente incrementado por la degradación de los ácidos orgánicos y el aumento en la actividad de la sacarosa fosfato sintetasa (Balaguera-López & Arévalo, 2012). De acuerdo con Morales et al. (2001), los ácidos orgánicos son una reserva energética de la fruta y su contenido disminuye en el período de máxima actividad metabólica, o durante la respiración son convertidos en azúcares.

Figura 3-9: Evolución de los Índices de madurez del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el tiempo de almacenamiento. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado.



Según la Tabla A-7 de los Anexos, el tratamiento de desinfección, el tiempo de almacenamiento y la interacción entre los factores tuvieron efecto significativo en el IM del mango mínimamente procesado ($p<0.05$). El promedio del IM fue mayor para el inicio del almacenamiento y para los trozos de mango del tratamiento UV; y menor durante el día 6 de almacenamiento y para las muestras del tratamiento H (Figura 3-10a). El IM tuvo menor variación para las muestras de los tratamientos C y UV (Figura 3-8b). Esto significó que la irradiación con UV-C y el almacenamiento en refrigeración pudo retardar algunos procesos relacionados con la maduración y respiración del fruto durante casi todo el almacenamiento (Millán-Villarroel et al., 2015).

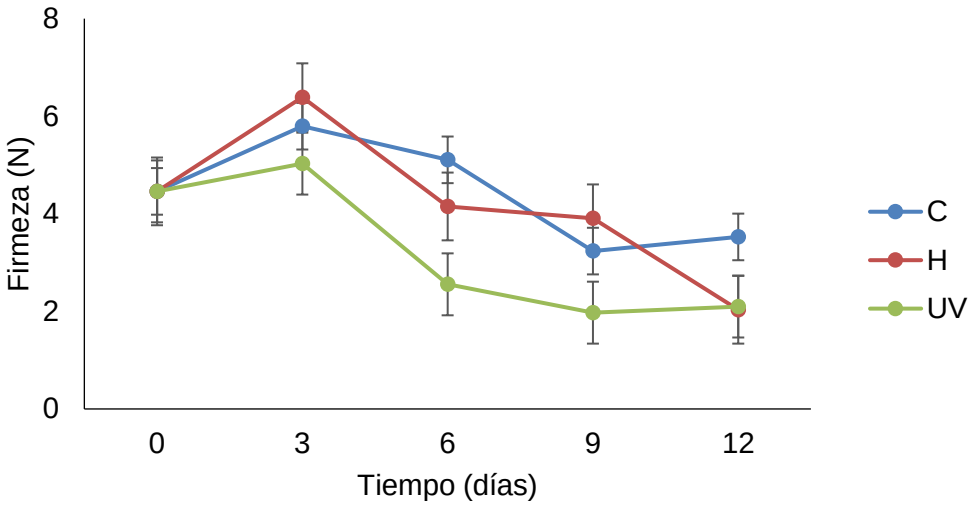
Figura 3-10: Gráficas factoriales para índice de maduración. Gráfica de efectos principales (a) y gráfica de interacción (b).



En todas las condiciones de desinfección evaluadas, el mango MP exhibió una disminución de los valores de firmeza durante el almacenamiento refrigerado. Según Barreto et al. (2021), la reducción de la firmeza de las frutas mínimamente procesadas se genera por la operación de corte y el alto grado de lesión de los tejidos celulares. Márquez-Villacorta & Pretell-Vásquez (2013) reportaron la disminución de la firmeza del mango 'Kent' mínimamente procesado irradiado con 7 y 14 kJ/m^2 y almacenado a 5 °C. Mientras que Charles et al. (2013) encontraron que la firmeza del mango 'Kent' mínimamente procesado tratado con 10 ppm de hipoclorito de sodio disminuía durante un período de almacenamiento de 7 días a 6 °C. En la Figura 3-11, se observa que los trozos de mango sometidos al tratamiento con luz UV-C exhibieron los menores valores de firmeza. De forma similar, Pristijono, Golding, et al. (2019) trataron mango 'Kensington Pride' entero

con distintas dosis de UV-C (0, 4, 8,3 y 11,7 kJ/m^2) y lo almacenaron con 0,005 y 0,1 µL/L de etileno a 20 °C. Estos investigadores encontraron que la firmeza de las muestras control (0 kJ/m^2) se mantuvo durante los 12 días de almacenamiento, mientras que la firmeza de las muestras tratadas con UV-C tendió a disminuir en dicho período. Esto pudo suceder debido a que el ablandamiento de la fruta se modula por hidrolasas de la pared celular como la poligalacturonasa, celulasa, β-galactosa y expansina, y el tratamiento con UV-C puede alterar la expresión de genes implicados en la modificación de la estructura de la pared celular (Kan et al., 2021).

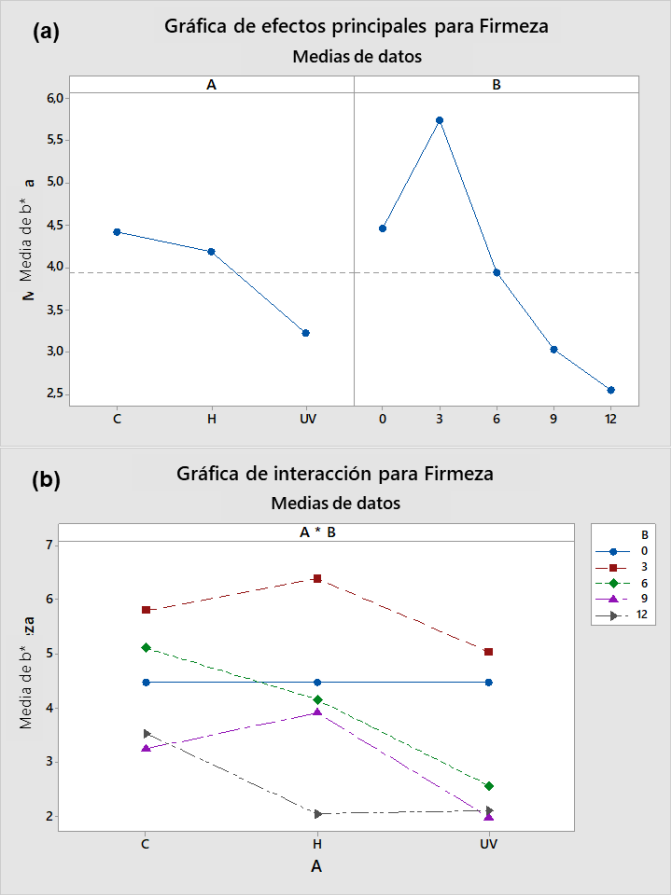
Figura 3-11: Evolución de los valores de firmeza del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el almacenamiento refrigerado. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado.



Según la Tabla A-5 de los Anexos, el tratamiento de desinfección tiempo de almacenamiento y la interacción entre estos factores tuvieron efecto significativo en la firmeza del mango mínimamente procesado ($p<0,05$). La gráfica de efectos individuales (Figura 3-12a), mostró que el promedio de la firmeza fue mayor para las muestras del tratamiento C y para el día 3 de almacenamiento; y menor para las muestras del tratamiento UV y al final del almacenamiento. La menor variación de los valores de firmeza se presentó en las muestras del tratamiento C (control) (Figura 3-12b). La reducción de la firmeza al final del almacenamiento pudo suceder por la desmetilación y la despolimerización de la pectina, la producción de radicales libres en la pared celular durante la maduración y senescencia del fruto, la degradación enzimática de la

hemicelulosa, la solubilización de los poliurónidos, la liberación de galactosa de los polímeros pécticos, la hinchazón de la pared celular, la disminución del contenido de agua y el potencial osmótico (Barreto et al., 2021; Márquez-Villacorta & Pretell-Vásquez, 2013; Pan & Zu, 2012).

Figura 3-12: Gráficas factoriales para firmeza. Gráfica de efectos principales (a) y gráfica de interacción (b).

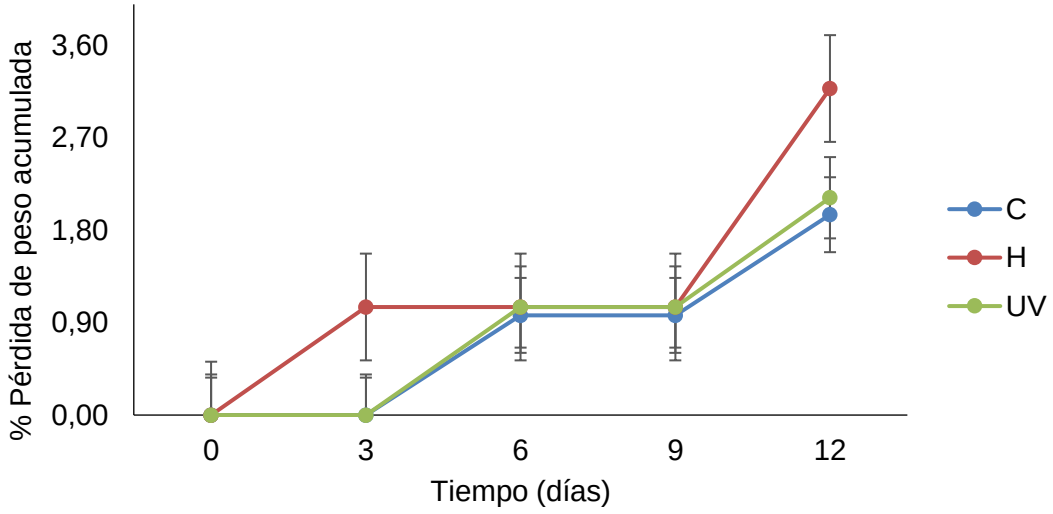


3.3. Pérdida de peso

En la Figura 3-13 se observa que la pérdida de peso aumentó conforme el tiempo de almacenamiento para las muestras de todos los tratamientos, aunque los valores resultantes estuvieron dentro de los niveles aceptables para productos mínimamente procesados (<10%) (Pretell-Vásquez et al., 2020). Las muestras del tratamiento H fueron las que más perdieron peso durante todo el almacenamiento. De acuerdo con Shehata et al. (2020), la pérdida de peso de las frutas mínimamente procesadas se relaciona directamente con la liberación de agua por transpiración y el aumento de la tasa de

respiración. No obstante, se apreciaron muy pocos remanentes de vapor de agua condensados dentro del envase debido a que se creó una atmósfera modificada pasiva que permitió reducir la actividad bioquímica y la tasa de respiración (Rangel-Marrón & López-Malo, 2012). Asimismo, el material de los envases usados para las unidades experimentales (PET) poseía un buen efecto barrera para el vapor de agua (Instituto Tecnológico del Plástico, 2012). Al final del almacenamiento, en las etapas de maduración avanzada y senescencia, fue evidente el cambio de apariencia, la diminución de la firmeza y el envejecimiento del mango mínimamente procesado, ya que existe un consumo de reservas y pérdida de volátiles por la degradación de las membranas celulares y el aumento de la actividad enzimática (Escobar-Hernández et al., 2014; Shehata et al., 2020). Todos estos daños fisiológicos pudieron a su vez aumentar la susceptibilidad a la descomposición y a la proliferación de mohos y levaduras (Ruelas-Chacón et al., 2013).

Figura 3-13: Porcentaje de pérdida de peso acumulado del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el tiempo de almacenamiento. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado.



3.4. Parámetros de color del mango mínimamente procesado

En la Tabla 3-5, se presentan los resultados del diseño relacionados con el efecto de los factores A (tratamiento de desinfección) y B (tiempo de almacenamiento) en las coordenadas del sistema CIELAB y los atributos del color del mango mínimamente procesado.

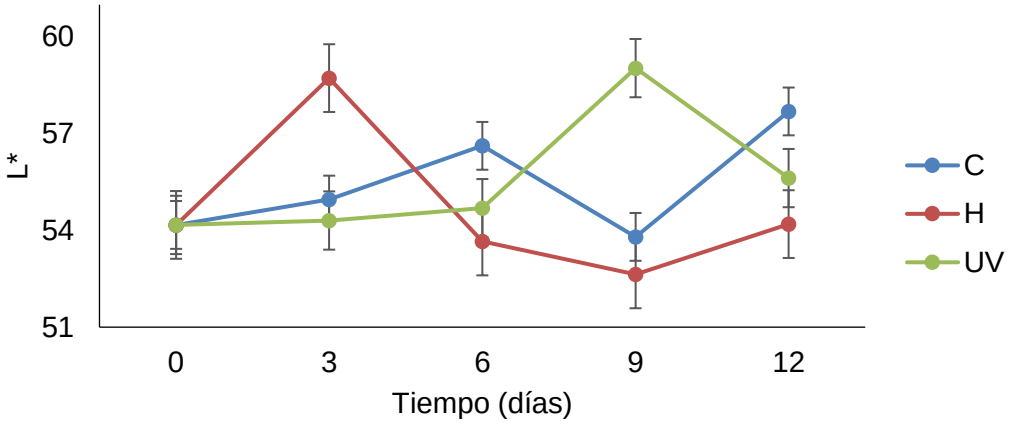
Tabla 3-5: Resultados del diseño para los parámetros de color.

Orden de corrida	Tratamiento	Tiempo (días)	L*	a*	b*	C*	h* (°)
1	C	0	54,170±0,115^{def}	8,230±0,344^{e}	55,253±1,002^{d}	55,864±0,944^{d}	81,523±0,490^{b}
2	C	3	54,957±1,337^{cde}	13,513±0,797^{b}	61,707±3,204^{c}	63,169±3,296^{c}	77,650±0,167^{f}
3	C	6	56,623±0,316^{bc}	11,090±0,255^{cd}	63,493±1,097^{bc}	64,455±1,123^{bc}	80,093±0,067^{d}
4	C	9	53,800±0,159^{ef}	11,240±0,046^{cd}	68,140±0,339^{a}	69,061±0,340^{a}	80,633±0,027^{cd}
5	C	12	57,690±0,698^{ab}	15,050±0,310^{a}	67,647±1,444^{ab}	69,301±1,472^{a}	77,457±0,098^{f}
6	H	0	54,170±0,115^{def}	8,230±0,344^{e}	55,253±1,002^{d}	55,864±0,944^{d}	81,523±0,490^{b}
7	H	3	58,723±0,471^{a}	11,927±0,262^{c}	61,803±1,472^{c}	62,944±1,494^{c}	79,077±0,045^{e}
8	H	6	53,657±0,670^{ef}	8,063±0,151^{e}	55,397±2,333^{d}	55,981±2,301^{d}	81,707±0,432^{b}
9	H	9	52,637±0,100^{f}	7,013±0,055^{f}	60,017±0,300^{c}	60,425±0,293^{c}	83,335±0,083^{a}
10	H	12	54,197±0,167^{def}	6,777±0,155^{f}	60,910±1,129^{c}	61,286±1,137^{c}	83,652±0,079^{a}
11	UV	0	54,170±0,115^{def}	8,230±0,344^{e}	55,253±1,002^{d}	55,864±0,944^{d}	81,523±0,490^{b}
12	UV	3	54,307±0,276^{def}	11,990±0,203^{c}	68,880±0,431^{a}	69,916±0,455^{a}	80,126±0,116^{d}
13	UV	6	54,690±1,405^{de}	13,583±0,345^{b}	69,980±1,987^{a}	71,286±2,004^{a}	79,014±0,182^{e}
14	UV	9	59,033±0,229^{a}	10,920±0,113^{d}	69,110±0,330^{a}	69,967±0,342^{a}	81,021±0,057^{bc}
15	UV	12	55,623±0,218^{cd}	11,587±0,025^{cd}	67,383±0,119^{ab}	68,372±0,121^{ab}	80,243±0,010^{cd}

Los valores son medias ± desviación estándar. Las medias que no comparten una misma letra por columna son significativamente diferentes ($p<0,05$).

La Figura 3-14 sugiere que los valores de la coordenada L* o luminosidad del fruto, tendieron a aumentar ligeramente durante el almacenamiento para las muestras de los tratamientos C y UV, y a disminuir para las muestras del tratamiento H. La baja luminosidad es considerada como un indicador de pardeamiento, el cual se relaciona con el efecto de los agentes desinfectantes que sirven como agentes oxidantes y provocan la activación de enzimas, incluyendo polifenol oxidasa (PPO) (Márquez-Villacorta & Pretell-Vásquez, 2013; Silveira et al., 2008). En otra investigación, la coordenada L* de tomates 'San Marzano' irradiados con 2 y 4 J/cm^2 y sin ningún tratamiento, no presentó cambios significativos durante su almacenamiento por 21 días a temperatura ambiente (Pataro et al., 2015). Mientras que Márquez-Villacorta et al. (2011) encontraron una disminución de los valores de la coordenada L* de las rebanadas de mango control y aquellas expuestas a 30 s de UV-C durante los 21 días de almacenamiento a 5 °C. Asimismo, Djioua et al. (2010) notaron un decrecimiento en la coordenada L* durante el almacenamiento por 9 días a 6 °C del mango ‘Tommy Atkins’ mínimamente procesado tratado con 10 ppm de hipoclorito de sodio.

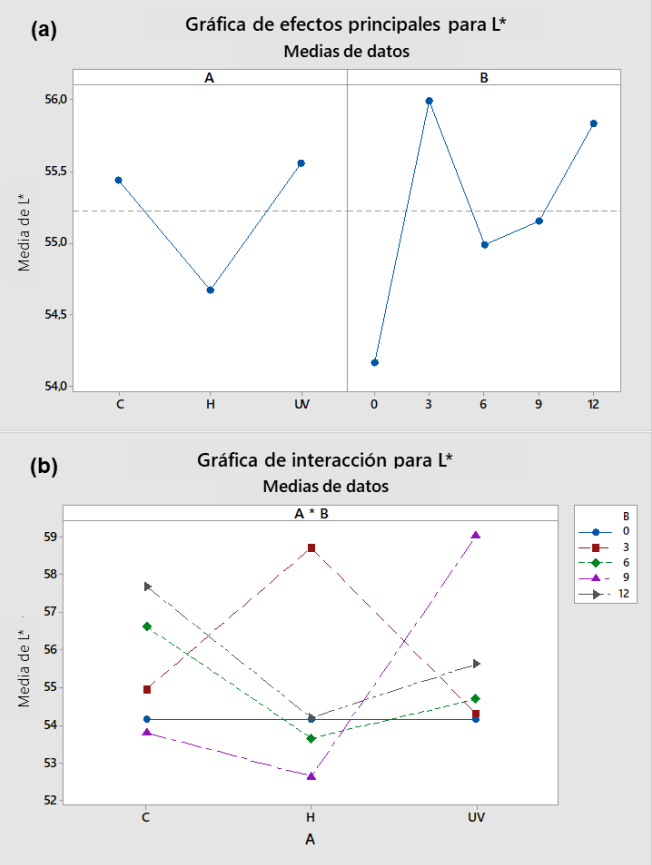
Figura 3-14: Evolución de los valores de la coordenada L* del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el tiempo de almacenamiento. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado.



De acuerdo con el análisis presentado en la Tabla A-6 de los Anexos, se constató que el tratamiento de desinfección, el tiempo de almacenamiento y la interacción de los factores tuvieron un efecto significativo en dicho parámetro ($p<0,05$). De esta forma, se pudo constatar que la luminosidad depende del tratamiento de desinfección, así como de la dosis de UV-C como lo reporta Pristijono, Golding, et al. (2019). El promedio de la coordenada

L* fue mayor para las muestras del tratamiento UV y para el día 3 de almacenamiento; mientras que el promedio de L* fue menor para las muestras del tratamiento H y para el inicio del almacenamiento (Figura 3-15a). Los valores de L* de las muestras de los tratamientos C y UV presentaron menor variación durante el almacenamiento (Figura 3-15b). Esto demuestra una reducción del oscurecimiento de la fruta con la atmósfera modificada, y que la dosis de UV-C aplicada pudo inhibir la actividad de la PPO (Barreto et al., 2021).

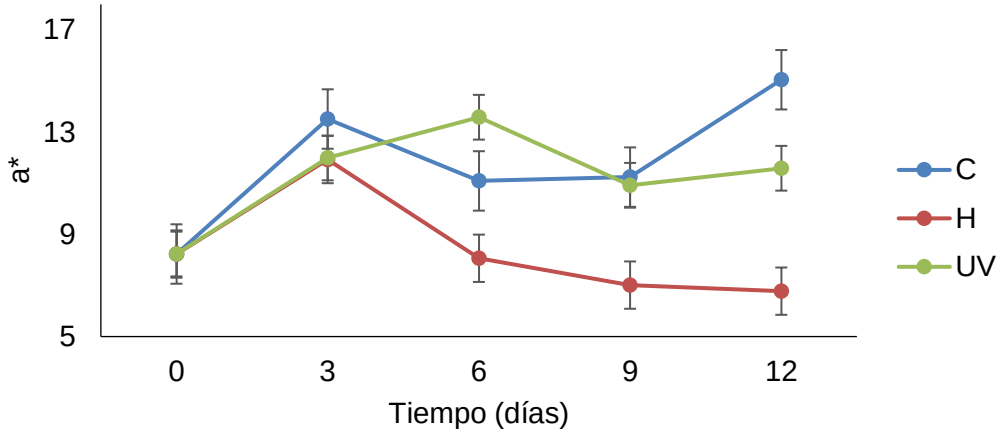
Figura 3-15: Gráficas factoriales para L*. Gráfica de efectos principales (a) y gráfica de interacción (b).



En general, se observaron valores bajos de la coordenada a* la cual representa las tonalidades entre verde y rojo. El valor de a* tendió a aumentar para las muestras del tratamiento C, a disminuir para las muestras del tratamiento H y a mantenerse ligeramente constante para las muestras del tratamiento UV (Figura 3-16). Márquez-Villacorta et al. (2011) encontraron un incremento en la coordenada a* de las rebanadas de mango sin tratamiento y aquellas tratadas con UV-C por 30 s durante los 21 días de almacenamiento. Márquez-Villacorta & Pretell-Vásquez (2013) notaron un aumento en la coordenada a* de

los trozos de mango 'Kent' control e irradiados con 7 y 14 kJ/m^2, los cuales se almacenaron por 15 días. Del mismo modo, los valores de a* para las muestras sin tratamiento fueron mayores en comparación a aquellas expuestas a UV-C. de Almeida-Lopes et al. (2021) reportaron un decrecimiento en la coordenada a* durante el almacenamiento a 3 °C por 12 días del mango ‘Tommy Atkins’ mínimamente procesado tratado con 200 mg/L de un producto clorado comercial, debido a que el tratamiento condujo a una menor compartimentación celular y al posible pardeamiento del fruto.

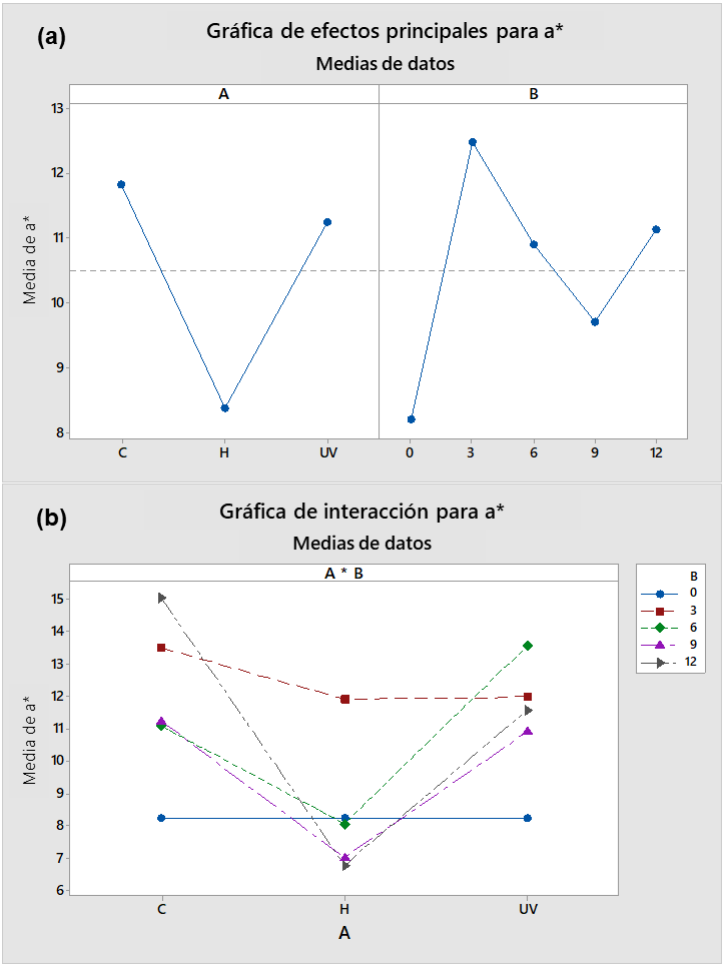
Figura 3-16: Evolución de los valores de la coordenada a* del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el almacenamiento refrigerado. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado.



Según la Tabla A-7 de los Anexos, el tratamiento de desinfección, el tiempo de almacenamiento y la interacción entre estos factores tuvieron efecto significativo en la coordenada a* del mango mínimamente procesado ($p<0.05$). Se determinó mediante la Figura 3-17a, que el promedio de la coordenada a* fue mayor para las muestras del tratamiento C y para el día 3 de almacenamiento; mientras que dicho promedio fue menor para los trozos de mango tratados con H y para el día 9 de almacenamiento. El incremento de la coordenada a* se interpreta como el aumento de pigmentos naranja o rojos, el rápido desarrolló de la maduración y algunas veces, del pardeamiento (Márquez-Villacorta & Pretell-Vásquez, 2013; Pathare et al., 2013). En la Figura 3-17b, se observó que los valores de a* de las muestras UV tuvieron la menor variación durante el almacenamiento. Esto significa que el tratamiento con radiación permitió retrasar algunos procesos adversos

ligados con la maduración acelerada y el oscurecimiento del fruto, los cuales posiblemente se presentaron en los trozos de mango de los tratamientos C y H, respectivamente.

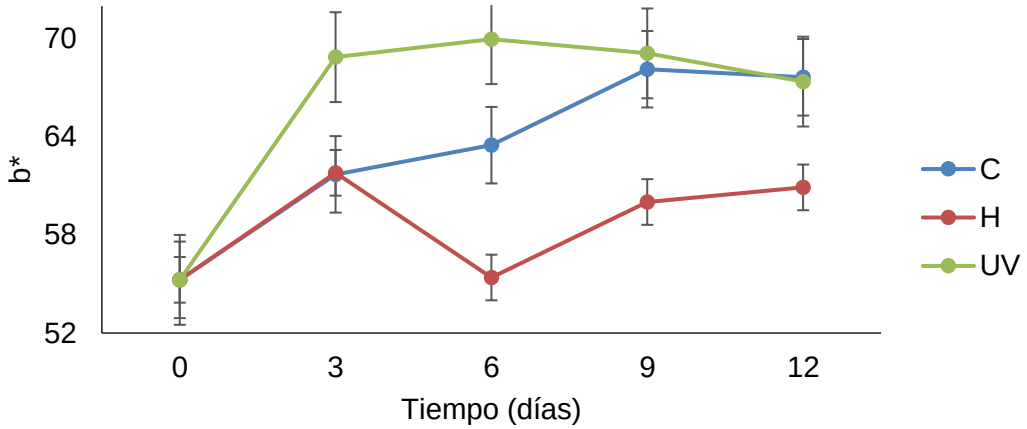
Figura 3-17: Gráficas factoriales para a*. Gráfica de efectos principales (a) y gráfica de interacción (b).



Se observaron valores positivos de la coordenada b*, lo cual indicó tonalidades amarillas. La coordenada b* tendió a mantenerse para las muestras de los tratamientos H y UV después del día 3 del almacenamiento (Figura 3-18). Esto pudo ocurrir debido a que, durante la maduración del mango, los cloroplastos de color verde se convierte en cromoplastos con tonalidades rojo amarillas (Rani et al., 2019). Dichas tonalidades en el mango se derivan principalmente de la producción de β-carotenos o carotenoides provitamina A, y su acumulación se genera dentro los cromoplastos en forma de cristaloides (Saini & Keum, 2018). Para los trozos de mango del tratamiento C, los valores de la coordenada b* aumentaron durante todo el almacenamiento. De esta forma, se notó la incidencia de la temperatura de refrigeración en los pigmentos que confieren tonalidades

amarillas. Según Rosalie et al. (2018), las bajas temperaturas pueden retrasar o bloquear la acumulación de carotenoides en las frutas, ya que puede incrementar la intensidad de la crisis respiratoria y la oxidación en los tejidos. En otra investigación, Márquez-Villacorta & Pretell-Vásquez (2013) encontraron un aumento de la coordenada b* en el mango ‘Kent’ mínimamente procesado tratado con 0, 7 y 14 kJ/m^2 y almacenado por 15 días. Dussán-Sarria et al. (2014b) reportaron que la coordenada b* del mango ‘Tommy Atkins’ mínimamente procesado empacado en PET se mantuvo constante durante su almacenamiento a 5 °C por 24 días. Djioua et al. (2010) notaron un decrecimiento en la coordenada b* durante el almacenamiento a 6 °C por 9 días del mango ‘Tommy Atkins’ mínimamente procesado tratado con 10 ppm de hipoclorito de sodio.

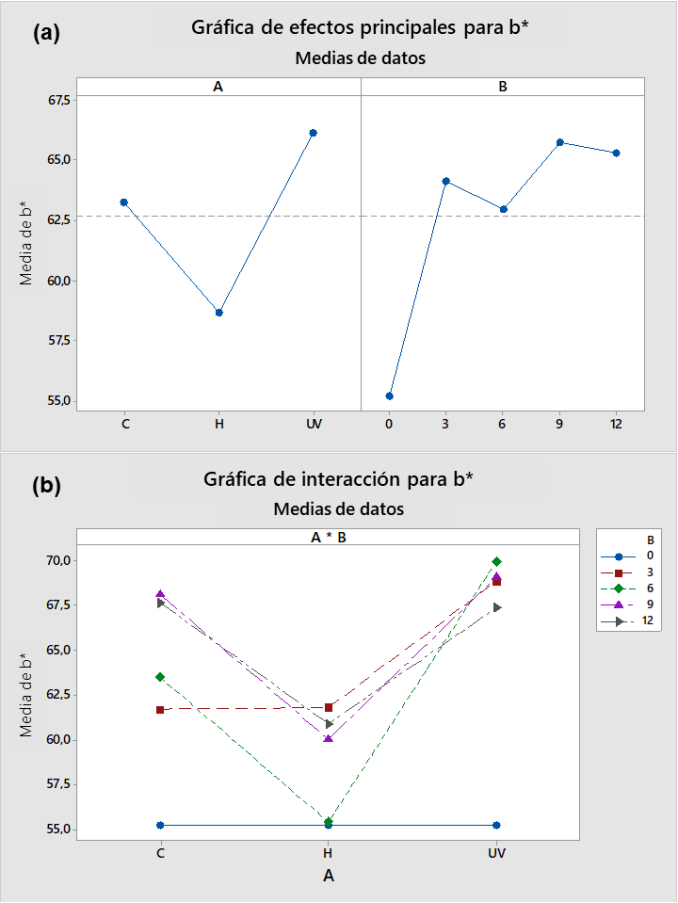
Figura 3-18: Evolución de los valores de la coordenada b* del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el almacenamiento refrigerado. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado.



Con la Tabla A-8 de los Anexos, se evidencia que el tratamiento de desinfección, el tiempo de almacenamiento y la interacción entre estos factores tuvieron efecto significativo en los valores de b* del mango mínimamente procesado ($p<0.05$). El promedio de los valores de b* fue menor para las muestras H y para el inicio del almacenamiento; mientras que el promedio de los valores de b* fue mayor para las muestras tratadas con UV y para el día 9 de almacenamiento (Figura 3-19a). La menor variación de los valores de b* después del día 3 de almacenamiento se presentó en las muestras del tratamiento UV (Figura 3-19b). Lo anterior constata que la exposición del mango a la dosis óptima de UV-C permitió

conservar los atributos de color del mango ´Tommy Atkins'. El aumento de los valores de la coordenada b*, es decir mayor tonalidad amarilla cuando se aproxima de 100, se asocia con una maduración acelerada, mientras que la disminución de b* se interpreta como el posible desarrollo del oscurecimiento del material vegetal (Márquez-Villacorta & Pretell-Vásquez, 2013).

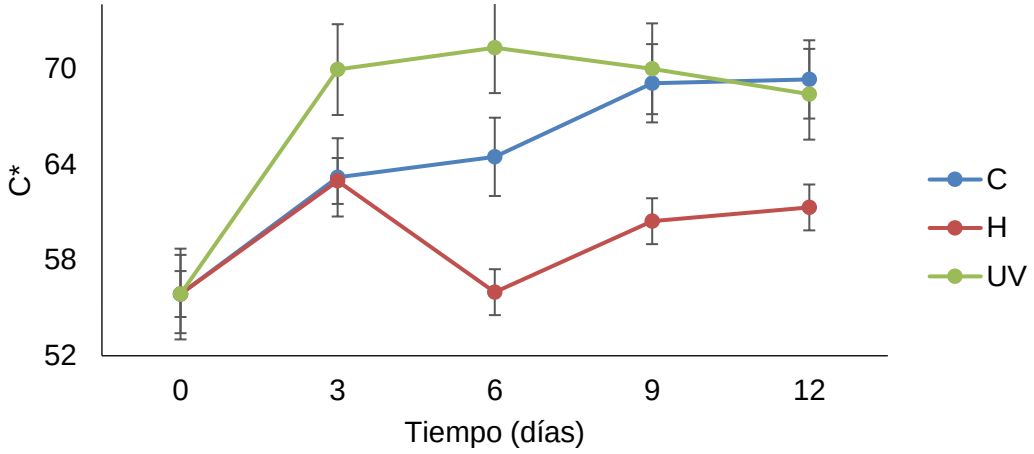
Figura 3-19: Gráficas factoriales para b*. Gráfica de efectos principales (a) y gráfica de interacción (b).



Los valores de croma (C*) y los valores de tono (h*), son importantes durante el seguimiento de calidad del mango, ya que incluyen las variaciones en las longitudes de onda a* y b* dentro del espectro de color del fruto en su proceso de maduración (de tonalidad amarilla a naranja). Es así como los valores de C* aumentaron durante el almacenamiento para los trozos de mango del tratamiento C, y tendieron a permanecer constantes para las muestras de los tratamientos H y UV después del día 3 de almacenamiento (Figura 3-20). El aumento de C* indicó que el color se tornó más saturado por el tratamiento y el almacenamiento (Xiang et al., 2020). Esto pudo suceder debido a

un incremento en la degradación metabólica de pigmentos como carotenoides, durante el almacenamiento frío (Grasso et al., 2022). En otra investigación, el valor del atributo C* se mantuvo constante en el lado superior y en el reverso de espinacas tratadas con 150 mg/L de NaClO y diferentes dosis de UV-C (0, 4,54, 7,94 y 11,35 kJ/m^2), y almacenadas a 5 y 8 °C por 13 días (Artés-Hernández et al., 2009). De la misma forma, Dussán-Sarria et al. (2014b) encontraron que C* no variaba significativamente en el mango 'Tommy Atkins' mínimamente procesado almacenado en PET hasta por 24 días a 5 °C.

Figura 3-20: Cambios en los valores de cromaticidad (C*) del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el almacenamiento refrigerado. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado.



De acuerdo con la Tabla A-9 de los Anexos, los factores tratamiento de desinfección, tiempo de almacenamiento y su interacción tuvieron efecto significativo en el atributo C* del mango mínimamente procesado ($p<0.05$). El promedio de C* fue mayor para las muestras del tratamiento UV y para el día 9 de almacenamiento. Dicho promedio fue menor para las muestras H y para el principio del almacenamiento (Figura 3-21a). Los valores de C* que presentaron menor variación después del día 3 de almacenamiento fueron los correspondientes a las muestras UV (Figura 3-21b). De esta forma, se confirmó que el tratamiento con radiación UV-C permitió mantener la saturación de color del mango mínimamente procesado durante su almacenamiento.

Figura 3-21: Gráficas factoriales para C*. Gráfica de efectos principales (a) y gráfica de interacción (b).

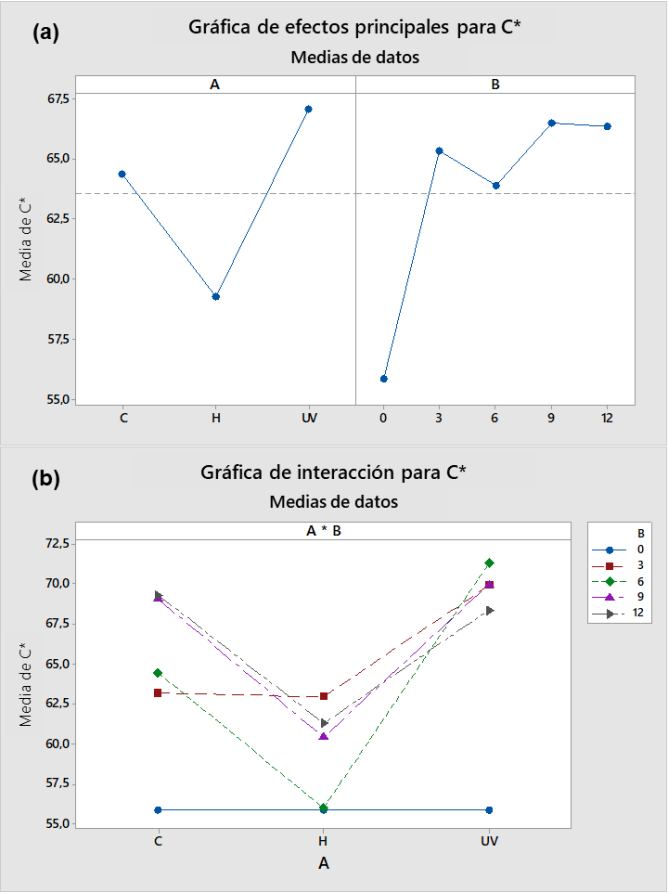
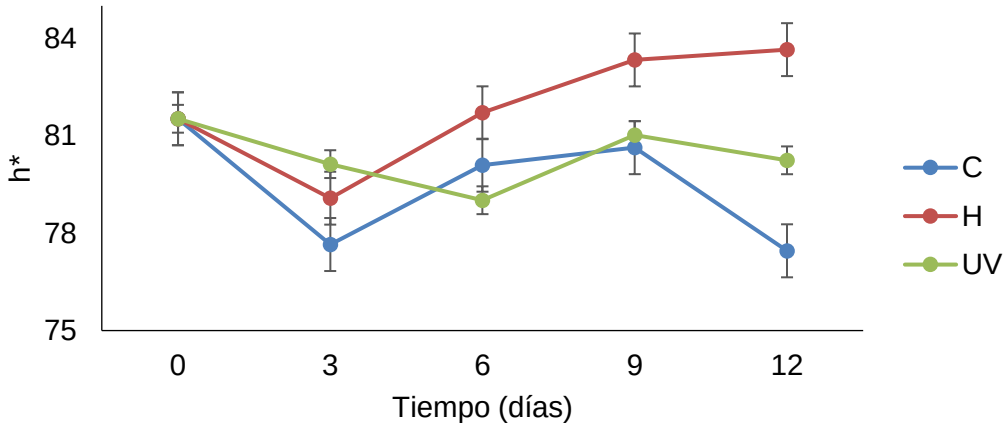
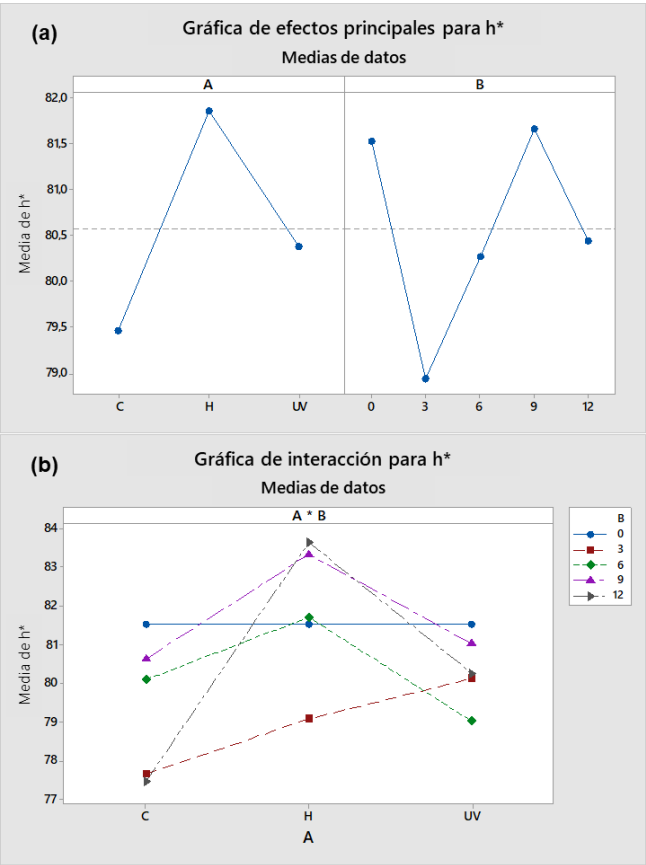


Figura 3-22: Cambios en los valores de tonalidad (h*) del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el almacenamiento refrigerado. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado.



Los valores de h* aumentaron para los trozos de mango del tratamiento H y tendieron a disminuir ligeramente para las muestras de los tratamientos C y UV (Figura 3-22). La reducción en los valores de h* indica un amarillamiento del fruto (Barreto et al., 2021). Este retraso en el desarrollo del color está ligado a la reducción de la maduración y senescencia y al prolongamiento del almacenamiento y vida útil del fruto (Khubone & Mditshwa, 2018). En contraste, el aumento de los valores de h* puede atribuirse a la isomerización acelerada de los carotenoides y a la oxidación por radicales libres (Xiang et al., 2020). En otra investigación, los trozos de mango 'Kent' sin tratamiento de desinfección presentaron una disminución en el ángulo de tono (h*) durante su almacenamiento por 12 días a 5 °C (Robles-Sánchez et al., 2009).

Figura 3-23: Gráficas factoriales para h*. Gráfica de efectos principales (a) y gráfica de interacción (b).



Los factores de estudio (tratamiento de desinfección y tiempo de almacenamiento) y su interacción tuvieron efecto significativo en los valores de h* del mango mínimamente procesado ($p<0.05$) (Tabla A-10 de los Anexos). El promedio de h* fue mayor para las

muestras del tratamiento H y para el día 9 de almacenamiento, y menor para las muestras del tratamiento C y para el día 3 de almacenamiento (Figura 3-23a). La menor variación de los valores de h* se obtuvo para los trozos de mango sometidos a UV (Figura 3-23b). Esto significó que el tratamiento con UV-C fue ideal para mantener el tono amarillo-naranja del mango durante su almacenamiento, de acuerdo con el espacio de color CIELAB (Pathare et al., 2013). De la misma forma, Pristijono, Golding, et al. (2019) encontraron que la exposición del mango 'Kensington Pride' entero a una dosis de 11,7 kJ/m^2 permitió retrasar el cambio de h* durante su almacenamiento a 20 °C.

Tabla 3-6: Cambios de la diferencia total de color del mango mínimamente procesado generados por el tratamiento de desinfección y el tiempo de almacenamiento.

Tratamiento de desinfección	Tiempo de almacenamiento (días)	ΔE
C	3	8,499±3,099^{cd}
	6	9,074±0,996^{bc}
	9	13,239±0,337^{a}
	12	14,586±1,517^{a}
H	3	8,806±1,448^{bcd}
	6	2,012±0,557^{e}
	9	5,152±0,271^{de}
	12	5,853±1,051^{cde}
UV	3	14,138±0,466^{a}
	6	15,724±1,963^{a}
	9	14,921±0,393^{a}
	12	12,668±0,136^{ab}

Los valores son medias ± desviación estándar. Las medias que no comparten una misma letra por columna son significativamente diferentes ($p<0,05$).

El parámetro de color ΔE corresponde a la combinación de las coordenadas (L*, a*, b*) y esta representa la magnitud de la diferencia en el color, pero no indica la dirección de esta diferencia. De acuerdo con la Tabla 3-6, los valores de la diferencia total de color (ΔE) se clasificaron en su mayoría como muy distintas (ΔE>3) y distintas (1,5<ΔE<3) en contraste con el día 0 de almacenamiento (Pathare et al., 2013). También se encontró mediante el ANOVA de dos vías que el tratamiento de desinfección, el tiempo de almacenamiento y su

interacción tuvieron efecto significativo en el parámetro ΔE del mango mínimamente procesado ($p<0.05$). La diferencia total de color aumentó significativamente durante todo el almacenamiento en los trozos de mango del tratamiento C, y para las muestras del tratamiento H, el incremento se presentó hasta el día 9 de almacenamiento. Estos aumentos en ΔE pudieron desarrollarse debido a la variación en las coordenadas a* y b* durante el almacenamiento, lo cual estaba ligado a los procesos de maduración y oscurecimiento del mango desarrollados en las muestras de los tratamientos C y H, respectivamente, de acuerdo con lo reportado por Cao et al. (2021). También se observó que los valores de la diferencia total de color de las muestras del tratamiento UV se mantuvieron ligeramente constantes en durante el tiempo de almacenamiento. La aplicación de UV-C en las muestras de mango pudo prevenir las reacciones oxidación asociadas con la actividad de la enzima peroxidasa (POD) y estabilizar los pigmentos y parámetros de color (Zambrano-Zaragoza et al., 2021). Aunque los valores de ΔE de las muestras irradiadas fueron ligeramente altos, permitieron constatar que no existió diferencia significativa en los valores de ΔE después del día 3 de almacenamiento.

3.5. Calidad microbiológica del mango mínimamente procesado

En la Tabla 3-7 se presentan los resultados del diseño para analizar el efecto del tratamiento de desinfección (A) y el tiempo de almacenamiento (B) en los microorganismos nativos del mango mínimamente procesado. En general, se pudo observar que hubo un aumento significativo en la población microbiana nativa del fruto durante el almacenamiento debido a la manipulación de las muestras durante el corte y por la alta relación superficie/peso de cada muestra (Artés-Hernández et al., 2021). Asimismo, se logró mayor inactivación de los microorganismos nativos con la UV-C porque la radiación pudo inducir cambios estructurales en el ADN y las proteínas de los microorganismos, fomentando la formación de dobles enlaces carbono-carbono (Franco-Vega et al., 2021).

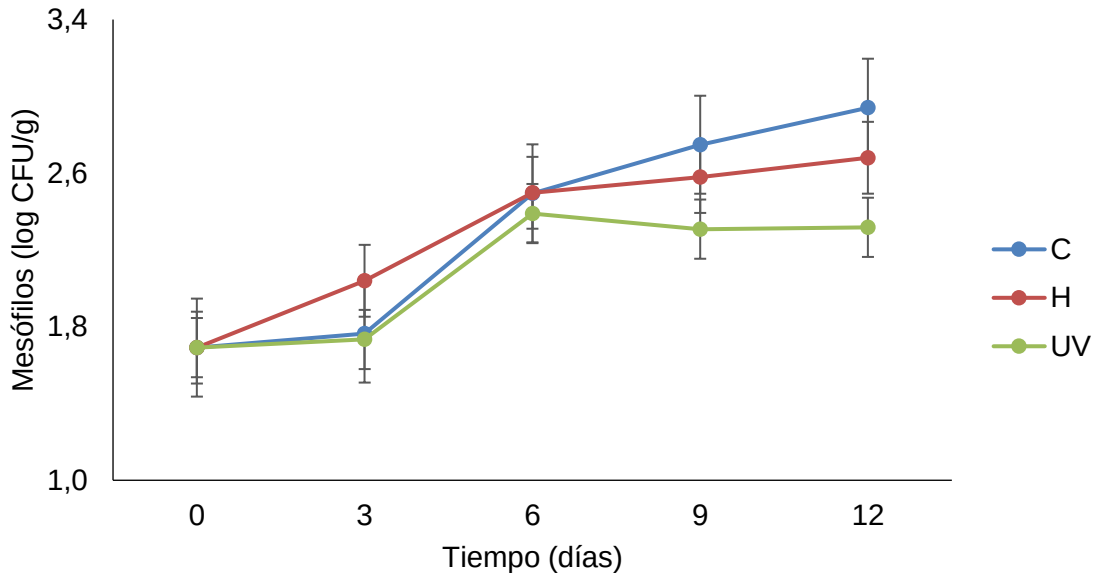
Tabla 3-7: Resultados de los análisis microbiológicos en mango mínimamente procesado tratado con diferentes alternativas de desinfección.

Orden de corrida	Tratamiento	Tiempo (días)	Mesófilos (log UFC/g)	Coliformes totales (log UFC/g)	Mohos y levaduras (log UFC/g)	Psicrófilos (log UFC/g)
1	C	0	1,691±0,053^{g}	1,900±0,060^{d}	2,503±0,055^{e}	1,469±0,102^{f}
2	C	3	1,764±0,074^{fg}	2,780±0,022^{bc}	2,800±0,039^{bcde}	1,719±0,058^{de}
3	C	6	2,495±0,043^{bcd}	3,017±0,019^{bc}	2,840±0,123^{abcd}	2,052±0,058^{c}
4	C	9	2,748±0,020^{ab}	3,080±0,033^{bc}	3,104±0,037^{ab}	2,468±0,078^{b}
5	C	12	2,941±0,028^{a}	3,686±0,045^{a}	3,132±0,008^{a}	2,747±0,035^{a}
6	H	0	1,691±0,053^{g}	1,900±0,060^{d}	2,503±0,055^{e}	1,469±0,102^{f}
7	H	3	2,039±0,080^{ef}	2,626±0,026^{c}	2,689±0,046^{de}	1,662±0,093^{def}
8	H	6	2,497±0,102^{bcd}	2,932±0,326^{bc}	2,708±0,226^{cde}	1,790±0,097^{d}
9	H	9	2,580±0,011^{bcd}	2,975±0,185^{bc}	2,689±0,045^{de}	2,338±0,095^{b}
10	H	12	2,680±0,074^{abc}	3,188±0,469^{ab}	3,017±0,038^{abc}	2,567±0,032^{ab}
11	UV	0	1,691±0,053^{g}	1,900±0,060^{d}	2,503±0,055^{e}	1,469±0,102^{f}
12	UV	3	1,733±0,078^{g}	2,548±0,149^{c}	2,505±0,111^{e}	1,486±0,111^{ef}
13	UV	6	2,389±0,105^{cd}	2,709±0,236^{bc}	2,512±0,233^{e}	1,787±0,016^{d}
14	UV	9	2,308±0,267^{de}	2,884±0,162^{bc}	2,549±0,147^{de}	2,095±0,028^{c}
15	UV	12	2,318±0,125^{de}	3,251±0,174^{ab}	2,816±0,040^{abcde}	2,431±0,088^{b}

Los valores son medias ± desviación estándar. Las medias que no comparten una misma letra por columna son significativamente diferentes ($p<0,05$).

La población inicial de mesófilos fue 1,690 log UFC/g para los trozos de mango. Los datos observados en la Tabla 3-14 y en la Figura 3-24, sugieren que la población de mesófilos de las muestras de los tratamientos C y H aumentó conforme el tiempo de almacenamiento. Para las muestras sometidas a UV-C, dicha población se mantuvo estable después del día 6 de almacenamiento. Los tratamientos con NaClO y UV-C redujeron 0,261 y 0,623 log CFU/g, respectivamente, la población de mesófilos de los trozos de mango en comparación con el tratamiento C al día 12 de almacenamiento refrigerado.

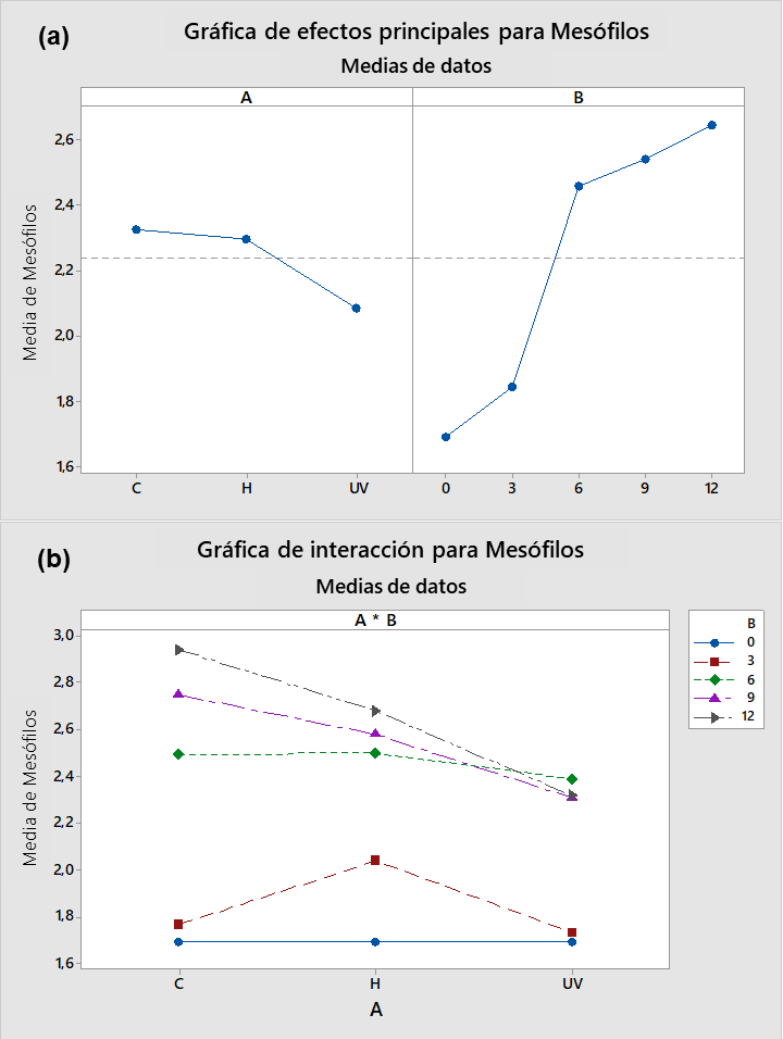
Figura 3-24: Evolución de la población de mesófilos del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el almacenamiento refrigerado. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado.



En la Tabla A-11 de los Anexos, se observa que el factor A (tratamiento de desinfección) y B (tiempo de almacenamiento), y su interacción tuvieron efecto significativo en la población de mesófilos del mango mínimamente procesado ($p<0.05$). De acuerdo con la Figura 3-25a, el promedio de la población de mesófilos fue mayor para las muestras del tratamiento C y menor para las muestras del tratamiento UV. El aumento más significativo de la población de mesófilos se dio hasta el día 6 de almacenamiento (Figura 3-25b). De forma similar, Sgroppo & Sosa (2009) reportaron que la población inicial de mesófilos en zapallo fue de 2,59 log UFC/g, y con un tratamiento de 3,14 kJ/m^2 lograron una reducción mayor a 1 log UFC/g después de 14 días de almacenamiento. Márquez-Villacorta & Pretell-

Vásquez (2013) señalaron que los trozos de mango 'Kent' irradiados con 7 y 14 kJ/m^2 tuvieron recuentos de 3,01 y 2,88 log UFC/g al final de 15 días de almacenamiento. La rúcula presentó una carga inicial de 7,9 log UFC/g de mesófilos, y después de tratamientos con una solución de NaClO de 100 mg/L y distintas dosis de UV-C (0,34, 5,16, 10,15, 15,14 y 20,13 kJ/m^2), hubo una reducción de 1 log UFC al final del almacenamiento de 10 días (Baeza et al., 2015).

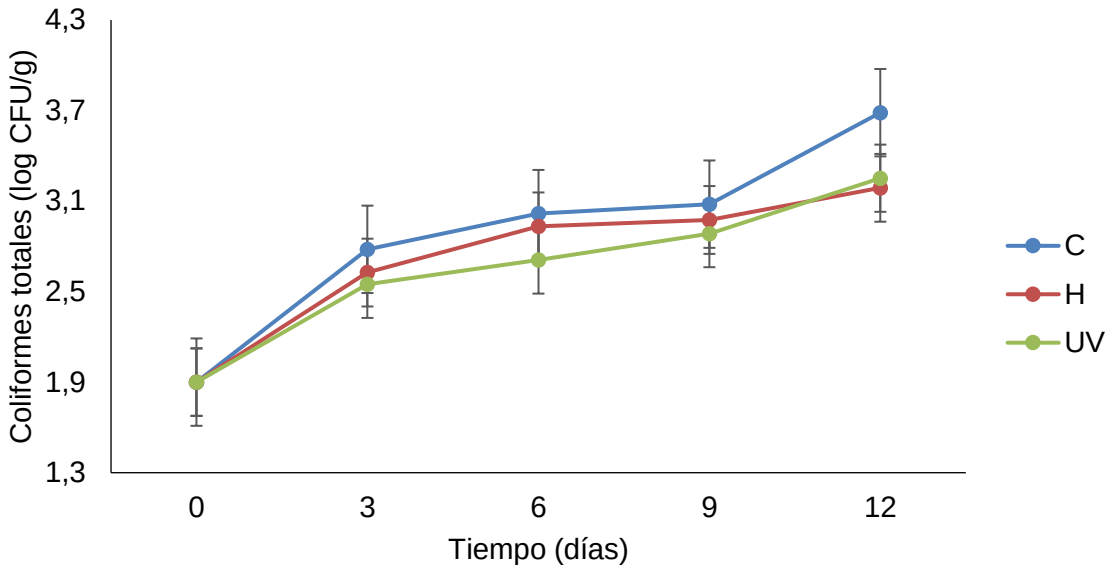
Figura 3-25: Gráficas factoriales para mesófilos. Gráfica de efectos principales (a) y gráfica de interacción (b).



La población inicial de coliformes totales fue de 1,900 log UFC/g para el mango mínimamente procesado. El recuento de coliformes totales de las muestras tendió a aumentarse durante el almacenamiento (Figura 3-26). Al final del almacenamiento, los

tratamientos con agentes desinfectantes a los que se sometieron los trozos de mango permitieron reducir cerca de 0,5 log UFC/g de la población de enterobacterias en contraste con el tratamiento C.

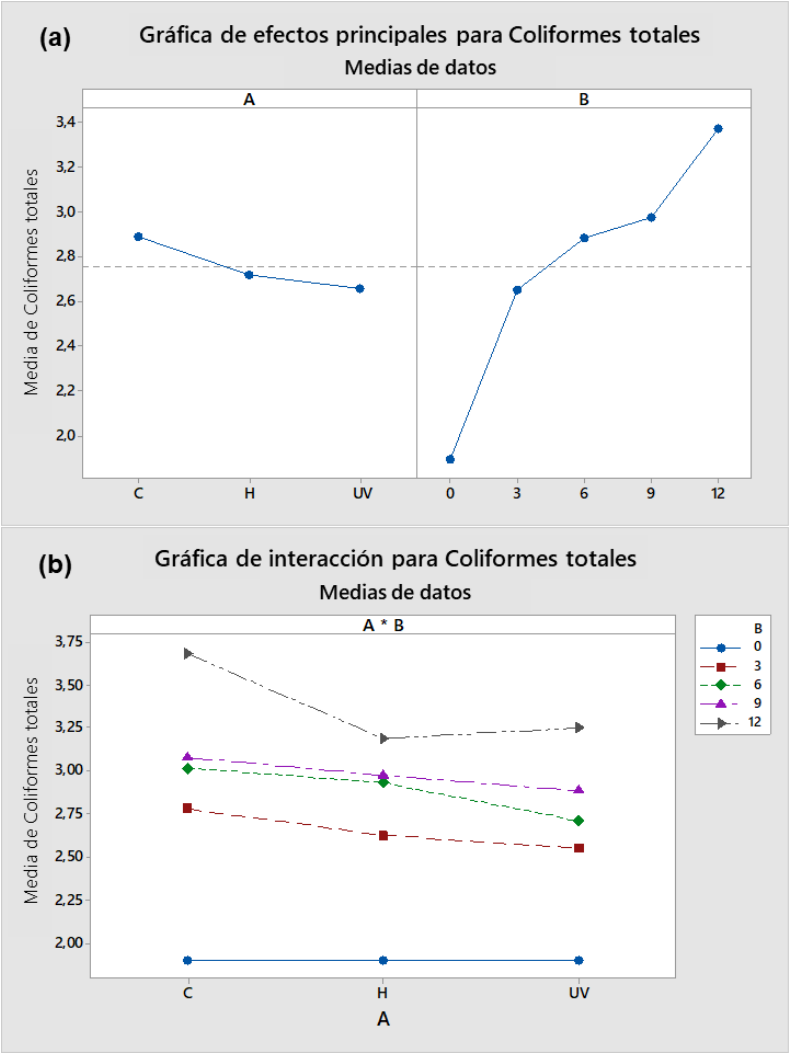
Figura 3-26: Evolución de la población de coliformes totales del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el almacenamiento refrigerado. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado.



Según la Tabla A-12 de los Anexos, los factores tratamiento de desinfección (A) y tiempo de almacenamiento (B) tuvieron efecto significativo en la población de coliformes totales del mango mínimamente procesado ($p<0,05$). La interacción entre estos factores no tuvo un efecto significativo en la población de coliformes totales ($p>0,05$) La gráfica de efectos individuales (Figura 3-27a) evidenció que el promedio de la población de coliformes fue mayor para las muestras del tratamiento C y menor para las muestras tratadas con UV. La Figura 3-27b constató que la interacción de los factores A y B no fue significativa para la población de coliformes totales en el mango mínimamente procesado, y que los valores de la población de coliformes totales tuvieron menor variación para las muestras expuestas a la radiación UV-C. Artés-Hernández et al. (2009) reportaron que los conteos de coliformes fueron menores a 2 log UFC/g en espinacas mínimamente procesadas tratadas con UV-C (0, 4,54, 7,94 y 11,35 kJ/m^2) y una solución de 150 mg/L de NaClO, y almacenadas a 5 y

8 °C por 13 días. La población de enterobacterias del brócoli sin ningún tratamiento y sometido a NaClO (100 mg/L) se mantuvo constante durante el almacenamiento de 19 días, mientras que la población de coliformes con brócoli tratado con UV-C (6 kJ/m^2) aumentó ligeramente (Martínez-Hernández et al., 2013).

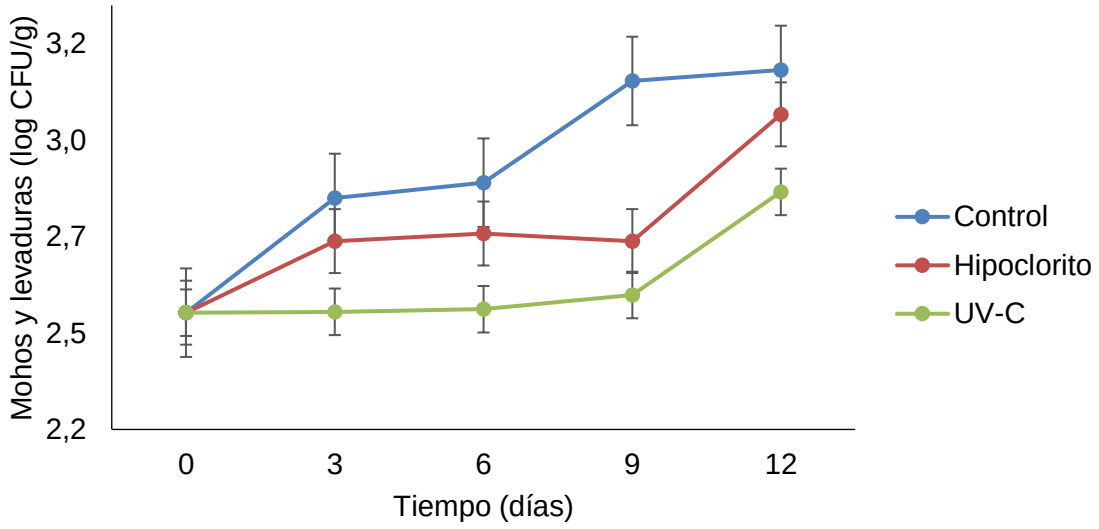
Figura 3-27: Gráficas factoriales para coliformes totales. Gráfica de efectos principales (a) y gráfica de interacción (b).



La población de mohos y levaduras en mango mínimamente procesado fue de 2,503 log CFU/g. En la Figura 3-28, se observa que el recuento de mohos y levaduras aumentó durante el almacenamiento de las muestras de los tratamientos C y H. Para las muestras del tratamiento UV, la población de mohos y levaduras se mantuvo constante hasta el día 9 de almacenamiento. Al final del almacenamiento, la reducción lograda en las muestras

de los tratamientos H y UV fue de 0,115 y 0,316 log UFC/g, respectivamente, en contraste con las muestras del tratamiento C.

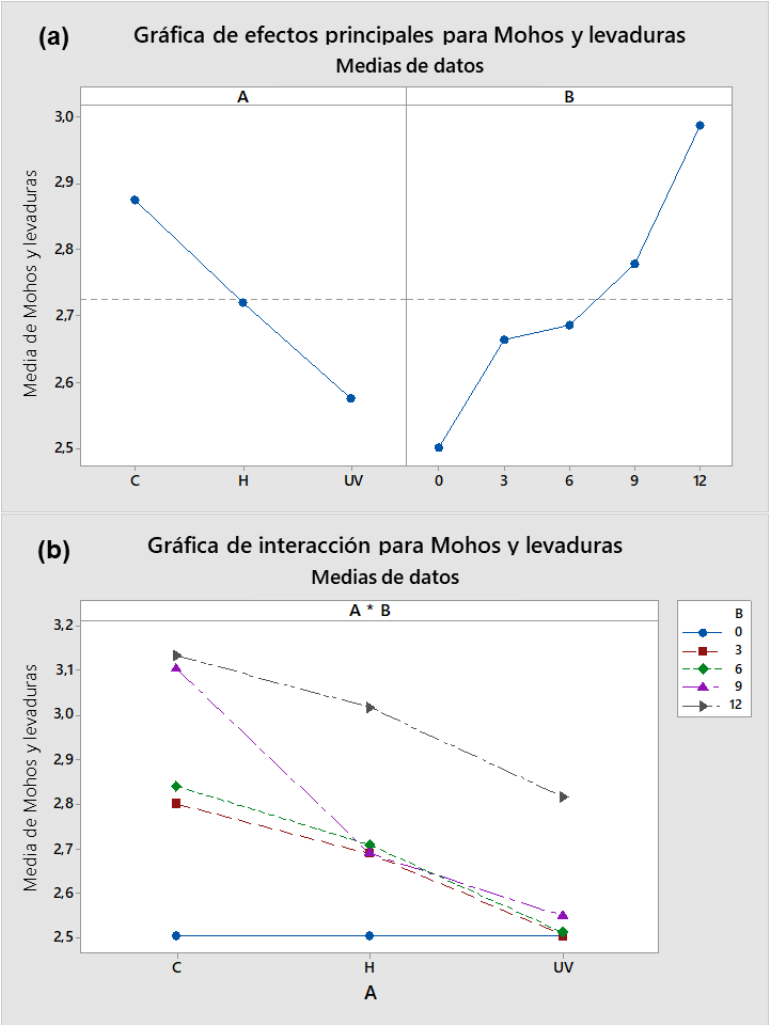
Figura 3-28: Población de mohos y levaduras del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el tiempo de almacenamiento. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado.



De acuerdo con la Tabla A-13 de los Anexos, el tratamiento de desinfección, el tiempo de almacenamiento y la interacción de estos factores tuvieron efecto significativo en el mango mínimamente procesado ($p<0.05$). El promedio de la población de mohos y levaduras fue mayor para las muestras del tratamiento C y menor para las muestras tratadas con UV (Figura 3-29a). La mayor variación de la población de mohos se observó después del día 6 de almacenamiento (Figura 3-29b). En otra investigación, la población de mohos y levaduras de rebanadas de trozo 'Kent' expuestas a UV-C durante 30 s inicialmente fue de 2,3 log UFC/g, y al final de un almacenamiento de 20 días a 4 °C correspondió a 4,4 log UFC/g (Márquez-Villacorta et al., 2011). Salinas-Roca et al. (2018) reportaron un aumento en la población de mohos y levaduras de 2 log UFC/g durante el almacenamiento por 14 días a 4 °C del mango ‘Tommy Atkins’ mínimamente procesado del tratamiento control. Según Baeza et al. (2015), la rúcula mínimamente procesada presentó un recuento inicial de hongos y levaduras de 1,6 log CFU/g y aproximadamente 1 log UFC/g, respectivamente. Posterior a los tratamientos con distintas dosis de UV-C (0,34, 5,16,

10,15, 15,14 y 20,13 kJ/m^2) y de un almacenamiento de 10 días a 5 °C, el recuento de hongos fue menor a 2 log UFC/g y la población de levaduras se mantuvo casi constante.

Figura 3-29: Gráficas factoriales para mohos y levaduras. Gráfica de efectos principales (a) y gráfica de interacción (b).



La población inicial de psicrófilos fue de 1,469 log UFC/g para el mango mínimamente procesado. El recuento de psicrófilos aumentó durante el almacenamiento de todas las muestras (Figura 3-30). Al final del almacenamiento, la reducción de la población en las muestras de los tratamientos H y UV fue de 0,180 y 0,317 log UFC/g, respectivamente, en contraste con los trozos de mango del tratamiento C. Los factores tratamiento de desinfección (A) y tiempo de almacenamiento (B), y su interacción tuvieron efecto negativo en la población de psicrófilos del mango mínimamente procesado ($p<0.05$) (Tabla A-14 de los Anexos). El promedio de la población de psicrófilos fue mayor para las muestras del

tratamiento C y menor para los trozos de mango del tratamiento UV (Figura 3-31a). La menor variación de la población de psicrófilos durante el almacenamiento se presentó en las muestras correspondientes a los tratamientos H y UV (Figura 3-31b). De acuerdo con Martínez-Hernández et al. (2013), el recuento inicial de psicrófilos en brócoli mínimamente procesado sin ningún tratamiento, dispuesto en una solución de NaClO (100 mg/L) e irradiado con UV-C (6 kJ/m^2) fue de 2,3, 1 y 1,5 log UFC/g, respectivamente. El brócoli sin tratamiento mostró un aumento significativo en la población de psicrófilos hasta el día 19 de almacenamiento a 5 °C, mientras que la población de estos microorganismos en el brócoli tratado con los agentes desinfectantes se mantuvo durante el almacenamiento. Márquez-Villacorta et al. (2011) reportaron que las rebanadas de mango 'Kent' irradiadas por 30 s con UV-C exhibieron una población inicial de psicrófilos de 1,48 log UFC/g. Al final de un almacenamiento de 20 días a 5 °C, el recuento de psicrófilos en las rebanadas de mango aumentó a 3 log UFC/g. En otra investigación, El mango 'Tommy Atkins' mínimamente procesado tratado con 200 mg/L de un producto clorado comercial presentó baja contaminación por microorganismos psicrotrófos durante su almacenamiento a 3 °C por 12 días debido al proceso de sanitización y las buenas prácticas de manufactura (de Almeida-Lopes et al., 2021).

Figura 3-30: Evolución de la población de psicrófilos del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el almacenamiento refrigerado. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado.

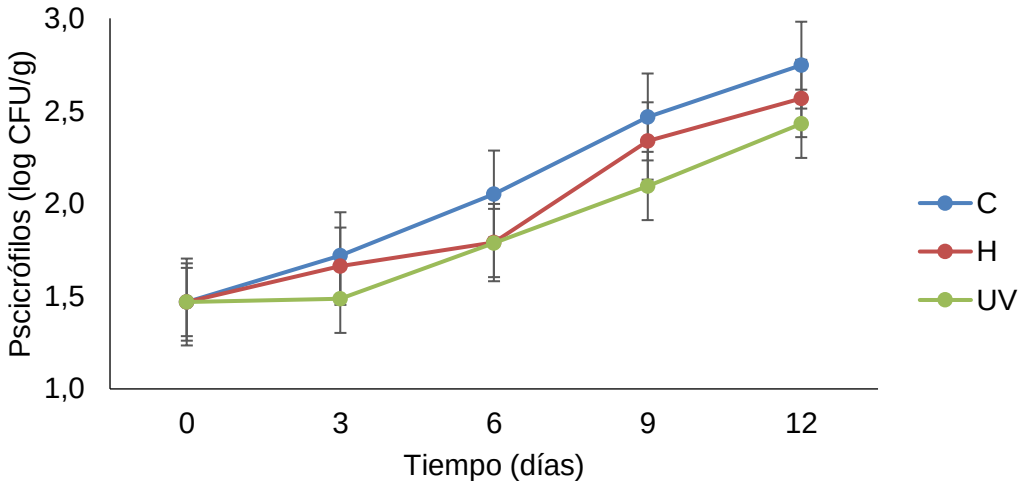
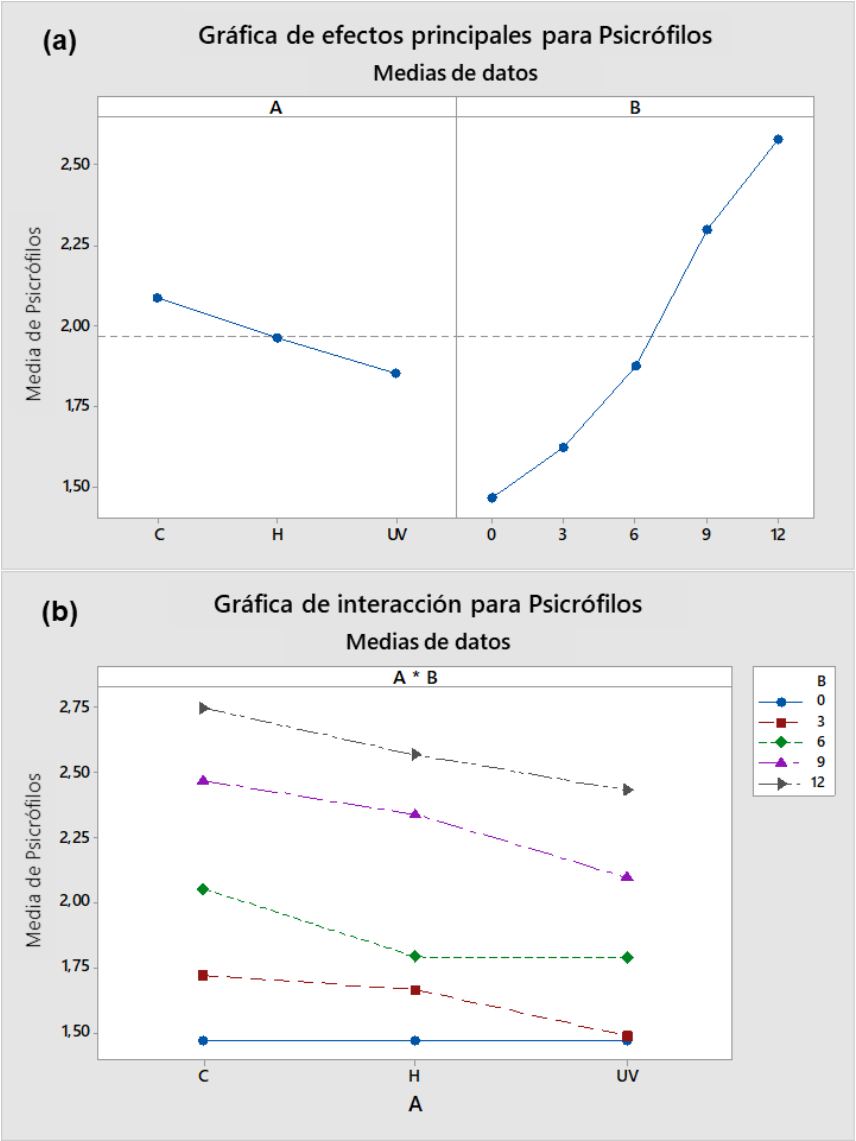


Figura 3-31: Gráficas factoriales para psicrófilos. Gráfica de efectos principales (a) y gráfica de interacción (b).



La vida útil del mango mínimamente procesado sometido a los distintos tratamientos se determinó basándose en los índices máximos permisibles de los requisitos microbiológicos reportados en la NTC 6005 y en la Resolución 3929 de 2013. Se encontró que la población de mesófilos para los trozos de mango pertenecientes a todos los tratamientos y almacenados hasta el día 12, no sobrepasaba el índice máximo permisible reportado en la NTC 6005 para un nivel de buena calidad (5 log UFC/g). Según Baeza et al. (2015), el índice máximo permitido en el recuento de enterobacterias para las frutas mínimamente procesadas es de 4,7 log UFC/g. Mientras que el índice máximo objetivo de psicrófilos es

de 5 log UFC/g (Pérez-Pérez & López-Malo, 2011). Por lo tanto, los trozos de mango tratados con las diferentes alternativas de desinfección se consideraron aptos para el consumo hasta el día 12 de almacenamiento en términos de la población de coliformes totales y de psicrófilos. De acuerdo con los requisitos microbiológicos de la Resolución 3929 de 2013 para mohos y levaduras, las muestras de los tratamientos C y H presentaron un nivel aceptable de calidad hasta el día 3 y 9 de almacenamiento, respectivamente. Las muestras a las que se les aplicó UV-C tuvieron un nivel aceptable de calidad en términos de esta última población microbiana durante su almacenamiento hasta el día 12. De esta forma, se determinó que el mango mínimamente procesado tratado con una dosis de 6 kJ/m^2 de luz UV-C cumplió con todos los requisitos microbiológicos señalados en la NTC 6005 (Tabla 0-2), la Resolución 3929 de 2013 (Tabla 0-3) y demás reportes para un nivel aceptable de calidad hasta el día 12 de almacenamiento, basándose en los recuentos de coliformes totales, mohos y levaduras y, psicrófilos en el fruto.

3.6. Cinéticas de inactivación microbiana

De acuerdo con la Tabla 3-8, la microbiología predictiva a través del modelo Weibull explicó la inactivación de mesófilos, coliformes totales, mohos y levaduras, y psicrófilos del mango mínimamente procesado sometido a diferentes tratamientos. La única excepción se presentó para la inactivación de mesófilos y psicrófilos de los trozos de mango del tratamiento C y UV. Taze & Unluturk (2018) reportaron que las curvas de supervivencia de la población de mesófilos y mohos y levaduras en albaricoques irradiados con distintas dosis de UV-C (0 a 48,45 kJ/m^2) se ajustaron a un modelo de Weibull con cola y a un modelo bifásico, respectivamente. Según van Boekel (2002), el parámetro de forma del modelo de Weibull (β) con un valor menor a 1 indicó que existían células con la capacidad de adaptarse al estrés aplicado en la población de coliformes totales y mohos y levaduras de las muestras del tratamiento C, la población de mesófilos y coliformes totales de las muestras del tratamiento H y la población de coliformes totales de las muestras del tratamiento UV. Mientras que un valor de $\beta>1$ significó que había células restantes que se dañaban con el estrés aplicado en la población de mohos y levaduras y psicrófilos de las muestras del tratamiento H y en la población de mohos y levaduras de las muestras del tratamiento UV.

Tabla 3-8: Parámetros de ajuste y cinéticos de los modelos de inactivación de los microorganismos nativos del mango mínimamente procesado sometido a los distintos tratamientos de desinfección.

C					
Población microbiana	**Modelo**	**Parámetros de ajuste**			**Parámetros cinéticos**
		R^2	**$\bar{R}^2$**	**RMSE**	
Mesófilos	Logarítmico lineal	0,931	0,908	0,290	k =0,267 día^{-1}
	Weibull	0,861	0,815	0,297	α =4,209 día; β =1,072
Coliformes totales	Logarítmico lineal	0,893	0,858	0,423	k =0,297 día^{-1}
	Weibull	0,965	0,954	0,251	α =0,967 día; β =0,525
Mohos y levaduras	Logarítmico lineal	0,925	0,900	0,131	k =0,120 día^{-1}
	Weibull	0,965	0,953	0,105	α =6,467; β =0,645
Psicrófilos	Logarítmico lineal	0,994	0,992	0,083	k =0,254 día^{-1}
	Weibull	0,983	0,978	0,062	α =4,523 día; β =1,129
H					
Población microbiana	**Modelo**	**Parámetros de ajuste**			**Parámetros cinéticos**
		R^2	**$\bar{R}^2$**	**RMSE**	
Mesófilos	Logarítmico lineal	0,905	0,874	0,233	k =0,193 día^{-1}
	Weibull	0,939	0,918	0,162	α =2,844 día; β =0,607
Coliformes totales	Logarítmico lineal	0,847	0,796	0,378	k =0,224 día^{-1}
	Weibull	0,991	0,988	0,088	α =0,730 día; β =0,383
Mohos y levaduras	Logarítmico lineal	0,769	0,692	0,159	k =0,079 día^{-1}
	Weibull	0,883	0,845	0,165	α =11,902 día; β =1,106
Psicrófilos	Logarítmico lineal	0,948	0,931	0,211	k =0,221 día^{-1}
	Weibull	0,968	0,958	0,159	α =6,069 día; β =1,412
UV					
Población microbiana	**Modelo**	**Parámetros de ajuste**			**Parámetros cinéticos**
		R^2	**$\bar{R}^2$**	**RMSE**	
Mesófilos	Logarítmico lineal	0,703	0,604	0,356	k =0,140 día^{-1}
	Weibull	0,672	0,563	0,347	α =5,889 día; β=0,717
Coliformes totales	Logarítmico lineal	0,931	0,908	0,262	k =0,233 día^{-1}
	Weibull	0,992	0,989	0,133	α =1,827 día; β=0,571
Mohos y levaduras	Logarítmico lineal	0,616	0,488	0,138	k =0,051 día^{-1}
	Weibull	1	1	0,006	α =12,608 día; β=6,606
Psicrófilos	Logarítmico lineal	0,945	0,926	0,183	k =0,194 día^{-1}
	Weibull	0,943	0,925	0,082	α =7,474 día; β=1,716

3.7. Contenido de carotenoides totales y equivalentes de actividad de retinol (RAE)

En la Tabla 3-9, se presentan los resultados del diseño que permitió evaluar el efecto del tratamiento de desinfección y del tiempo de almacenamiento en los carotenoides totales (Cx+c) y en los equivalentes de actividad de retinol (RAE) del mango mínimamente procesado. Este último parámetro presentó valores mayores en las muestras durante su almacenamiento en comparación con otras investigaciones. Muoki et al. (2009) señalaron que el mango ‘Tommy Atkins’ parcialmente maduro y maduro presentó de 0,033 a 0,07 RAE mg/100 g peso fresco y 0,043 a 0,068 RAE mg/100 g peso fresco, respectivamente. Fratianni et al. (2020) encontraron que los equivalentes de actividad de retinol del mango 'Keitt' y 'Osteen' eran de 0,215 y 0,110 RAE mg/100 g peso fresco, respectivamente.

Tabla 3-9: Resultados del diseño para carotenoides totales y RAE.

Orden de corrida	Tratamiento	Tiempo (días)	Cx+c (mg β-caroteno/100 g muestra fresca)	RAE mg/100 g muestra fresca
1	C	0	5,769±0,350^{e}	0,481±0,029
2	C	3	30,793±2,066^{a}	2,566±0,172
3	C	6	10,663±1,892^{d}	0,889±0,158
4	C	9	19,895±0,487^{c}	1,658±0,041
5	C	12	19,340±1,319^{c}	1,612±0,110
6	H	0	5,769±0,350^{e}	0,481±0,029
7	H	3	17,776±0,747^{c}	1,481±0,062
8	H	6	8,695±0,315^{de}	0,725±0,026
9	H	9	11,420±1,357^{d}	0,952±0,113
10	H	12	19,038±0,605^{c}	1,586±0,050
11	UV	0	5,769±0,350^{e}	0,481±0,029
12	UV	3	18,583±0,992^{c}	1,549±0,083
13	UV	6	30,036±1,553^{a}	2,503±0,129
14	UV	9	17,322±0,315^{c}	1,444±0,026
15	UV	12	26,504±0,462^{b}	2,209±0,039

Los valores son medias ± desviación estándar. Las medias que no comparten una misma letra por columna son significativamente diferentes ($p<0,05$).

El contenido de carotenoides totales exhibió picos durante el día 3 de almacenamiento para los trozos de mango del tratamiento C, durante el día 6 de almacenamiento para las muestras del tratamiento UV, y al final del almacenamiento para las muestras del tratamiento H (Figura 3-32). La acumulación de carotenoides durante algunos días del almacenamiento pudo estar influenciado por el estado de madurez de la fruta (Rosalie et al., 2018). El aumento en los niveles de β-caroteno después del mínimo procesamiento pudo explicar el desarrollo de un color amarillo en la pulpa del mango con la coordenada b*, aunque se encuentran involucrados otros carotenoides como la violaxantina (Ma et al., 2018). Por otra parte, la ligera disminución del contenido de carotenoides en las muestras pudo deberse a que la temperatura de almacenamiento se encontraba por debajo de los 7 °C, afectando el valor nutricional del mango (Artés-Hernández et al., 2021). También pudo influir la destrucción de la estructura celular del fruto debido al mínimo procesamiento y a la degradación oxidativa enzimática y no enzimática (autoxidación e isomerización) de los carotenoides, desencadenando reacciones como la epoxidación, la formación de apocarotenos y su hidroxilación (Rodriguez-Amaya, 2019). Robles-Sánchez et al. (2009) reportaron una cantidad inicial de 1,6 mg β-caroteno/100 g en el mango 'Kent' fresco cortado, la cual aumentó progresivamente durante los 12 días de almacenamiento a 5 °C. de Almeida-Lopes et al. (2021) notaron que el contenido de carotenoides del mango “Tommy Atkins” mínimamente procesado tratado con 200 mg/L de un producto clorado comercial, se mantenía constante durante su almacenamiento a 3 °C por 12 días. Sgroppo & Sosa (2009) señalaron que el contenido de carotenoides de zapallos en cubo sin ningún tratamiento aumentaba ligeramente de 31,57 a 39,54 µg β-caroteno/g peso fresco durante los 14 días de almacenamiento. Mientras que el contenido de carotenoides de los zapallos irradiados con 2,08 y 3,14 kJ/m^2 disminuía y se mantenía, respectivamente, durante su almacenamiento.

Con la Tabla A-15 de los Anexos se constata que los factores tratamiento de desinfección y tiempo de almacenamiento, así como su interacción, tuvieron efecto significativo en el contenido de carotenoides totales del mango mínimamente procesado ($p<0,05$). El promedio del contenido de carotenoides total fue mayor para las muestras del tratamiento UV y para el día 3 de almacenamiento, mientras que fue menor para las muestras del tratamiento H y para el inicio del almacenamiento (Figura 3-33a). La menor variación del contenido de carotenoides durante el almacenamiento se presentó para las muestras del tratamiento H (Figura 3-33b). Esto evidenció que algunos compuestos bioactivos y con

actividad biológica pudieron disminuir al momento de sumergir los trozos de mango en la solución con hipoclorito de sodio. Mientras que la irradiación del mango con UV-C pudo incidir en el contenido de carotenoides debido al estrés fisiológico y sus mecanismos de adaptación, como lo señala Kumar et al. (2021). En el fruto, la proteína UVR8 actúa como fotorreceptor de la radiación UV-C e interactúa con otra proteína codificadora COP1 para estimular la producción de carotenoides como efecto fotoprotector (Castillejo et al., 2022). Asimismo, el aumento en el contenido de los carotenoides totales puede relacionarse con la activación de la enzima caroteno isomerasa y la acumulación de transcripciones de genes de fitoeno sintasa (PSY) y zeta-caroteno desaturasa (ZDS), los cuales están involucrados en la carotenogénesis (Khubone & Mditshwa, 2018). No obstante, la UV-C puede inhibir dichos genes relacionados con las enzimas PSY y ZDS a dosis altas o una larga exposición a la radiación (Kan et al., 2021). En otra investigación, González-Aguilar et al. (2007a) indicaron que la irradiación del mango ‘Tommy Atkins’ mínimamente procesado con UV-C por 0, 1, 3, 5 y 10 min causaba una disminución en los niveles de β-caroteno durante los 15 días de almacenamiento a 5°C, debido al incremento del estrés oxidativo en los tejidos vegetales.

Figura 3-32: Cambios en el contenido de carotenoides totales del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el almacenamiento refrigerado. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado.

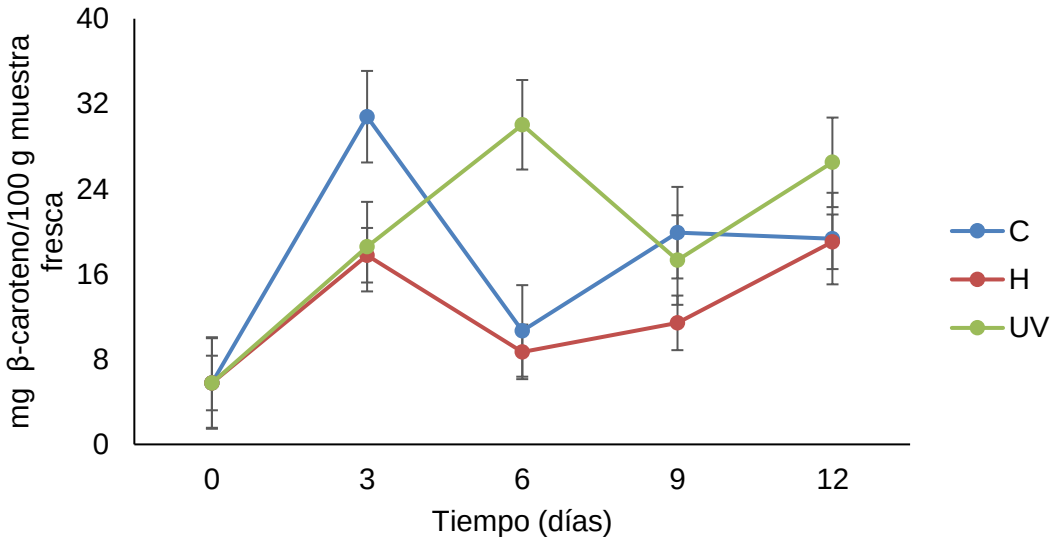
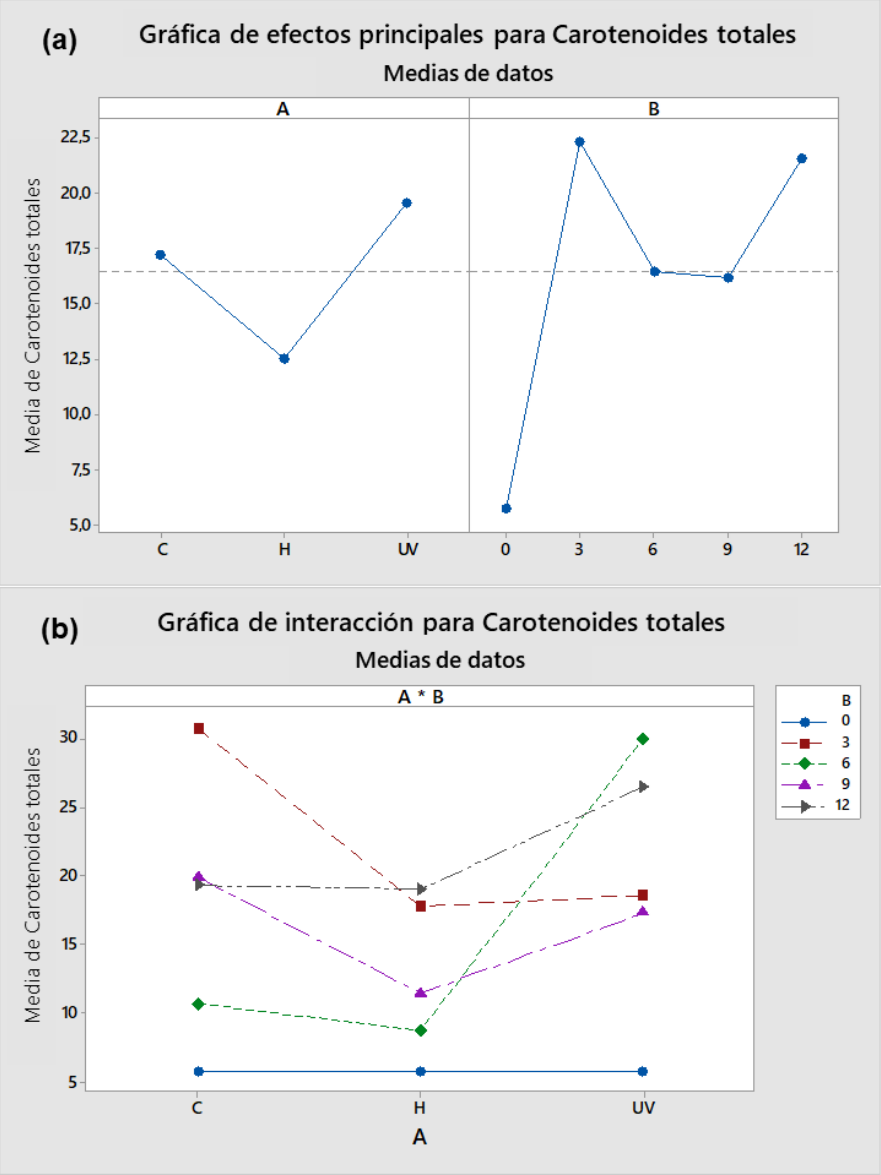


Figura 3-33: Gráficas factoriales para carotenoides totales. Gráfica de efectos principales (a) y gráfica de interacción (b).



3.8. Contenido de fenoles totales y flavonoides

Los resultados del diseño planteado para evaluar el efecto del tratamiento de desinfección (A) y del tiempo de almacenamiento (B) en el contenido de fenoles totales y flavonoides en el mango mínimamente procesado, se presenta en la Tabla 3-10. Se evidenció que la irradiación con UV-C condujo a la activación del metabolismo secundario y la biosíntesis de compuestos con actividad biológica y antioxidante, como lo reporta Michailidis et al. (2019).

Tabla 3-10: Resultados del diseño para fenoles totales y flavonoides.

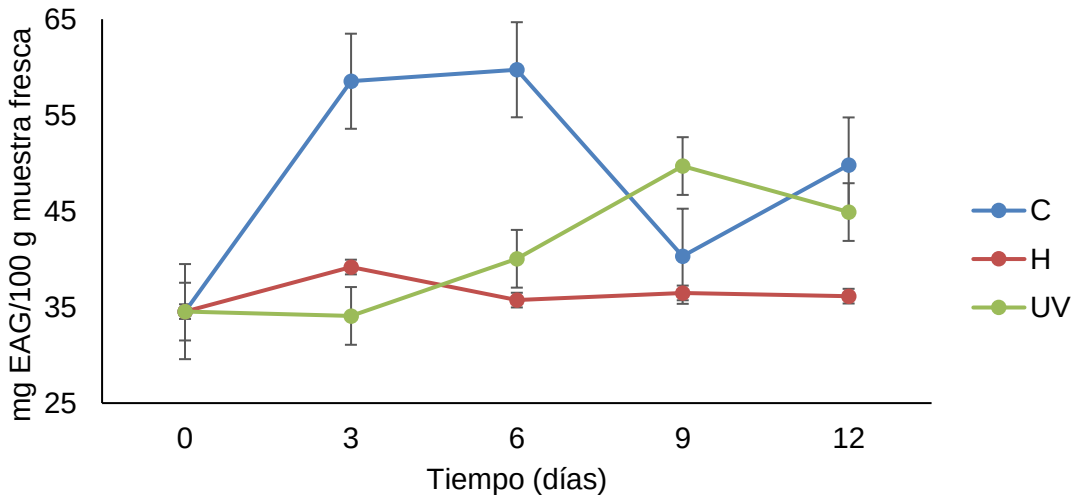
Orden de corrida	Tratamiento	Tiempo (días)	Fenoles totales (mg EAG/100 g muestra fresca)	Flavonoides (mg EQ/100 g muestra fresca)
1	C	0	34,532±5,712^{c}	0,385±0,087^{ef}
2	C	3	58,533±12,631^{ab}	1,002±0,154^{ab}
3	C	6	59,731±12,653^{a}	0,675±0,048^{cd}
4	C	9	40,298±8,457^{abc}	0,688±0,041^{cd}
5	C	12	49,809±0,722^{abc}	0,825±0,098^{bc}
6	H	0	34,532±5,712^{c}	0,385±0,087^{ef}
7	H	3	39,175±7,583^{abc}	0,658±0,016^{cd}
8	H	6	35,731±4,106^{bc}	0,317±0,068^{f}
9	H	9	36,479±2,354^{bc}	0,562±0,103^{def}
10	H	12	36,142±8,269^{bc}	0,716±0,006^{cd}
11	UV	0	34,532±5,712^{c}	0,385±0,087^{ef}
12	UV	3	34,083±8,152^{c}	0,624±0,030^{cde}
13	UV	6	40,036±8,466^{abc}	1,139±0,138^{a}
14	UV	9	49,697±5,965^{abc}	0,668±0,119^{cd}
15	UV	12	44,904±8,090^{abc}	0,767±0,046^{bcd}

Los valores son medias ± desviación estándar. Las medias que no comparten una misma letra por columna son significativamente diferentes ($p<0,05$).

De acuerdo con la Figura 3-34, el contenido fenoles totales del mango mínimamente procesado sometido a UV-C mostró un incremento hasta el día 6 del almacenamiento y posteriormente, no hubo cambios notorios. El aumento de los fenoles totales se atribuyó a la liberación de estos compuestos conjugados unidos a los polisacáridos de la pared celular, la despolimerización de polímeros de fenoles como ligninas y taninos, y la inactivación de la enzima PPO (Xiang et al., 2020). Asimismo, la continua exposición a la UV-C pudo afectar la reactividad de los compuestos fenólicos, ya que los grupos funcionales (-OH y -CH_3) pudieron cambiar de posición en los anillos benzoicos (Bhagat & Chakraborty, 2022). Por otro lado, el contenido de fenoles de las muestras de los tratamientos C y H disminuyó progresivamente en el día 9 y 3 de almacenamiento,

respectivamente, y después permaneció constante. La disminución en el contenido de fenoles totales durante el almacenamiento se debe a la oxidación de estos compuestos por el aumento del área de contacto del fruto con el O_2 en función del corte (Barreto et al., 2021). También puede considerarse síntoma de la senescencia de las frutas, ya que los fenoles son usados como sustratos de las enzimas relacionadas con la maduración, como la β-glucosidasa, la PPO y la POD (Velderrain-Rodríguez et al., 2021).

Figura 3-34: Cambios en el contenido de fenoles totales del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el almacenamiento refrigerado. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado.



Se constató que el tratamiento de desinfección, el tiempo de almacenamiento y la interacción entre los factores tuvieron efecto en el contenido de fenoles totales del mango mínimamente procesado ($p<0,05$) (Tabla A-16 de los Anexos). La gráfica de efectos principales (Figura 3-35a) sugirió que el promedio de contenido de fenoles totales fue mayor para las muestras del tratamiento C y para el día 6 de almacenamiento; y menor para las muestras del tratamiento H y para el inicio del almacenamiento. La menor variación del contenido de fenoles totales durante el almacenamiento se presentó para las muestras del tratamiento H. (Figura 3-35b). De la misma forma, Charles et al. (2013) encontraron que el mango “Kent” mínimamente procesado tratado con 10 ppm de hipoclorito de sodio permaneció constante durante su almacenamiento a 6 °C por 7 días. En otra investigación, Pristijono, Golding, et al. (2019) reportaron que el contenido de

fenoles totales del mango entero 'Kensington Pride' tratado con 0, 4, 8,3 y 11,7 kJ/m^2 exhibió un ligero aumento en durante el almacenamiento del fruto con 0,005 y 0,1 µL/L de etileno a 20 °C. Pataro et al. (2015) notaron un incremento en el contenido de polifenoles del tomate ‘San Marzano’ tratado dosis de UV-C de 2 y 4 J/cm^2 y almacenado por 21 días a temperatura ambiente. González-Aguilar et al. (2007a) señalaron que el contenido de fenoles totales del mango ‘Tommy Atkins’ fresco cortado irradiado con UV-C por 10 min aumentaba significativamente durante su almacenamiento por 15 días a 5°C debido al incremento de la actividad de la fenilalanina amonio liasa (PAL).

Figura 3-35: Gráficas factoriales para fenoles totales. Gráfica de efectos principales (a) y gráfica de interacción (b).

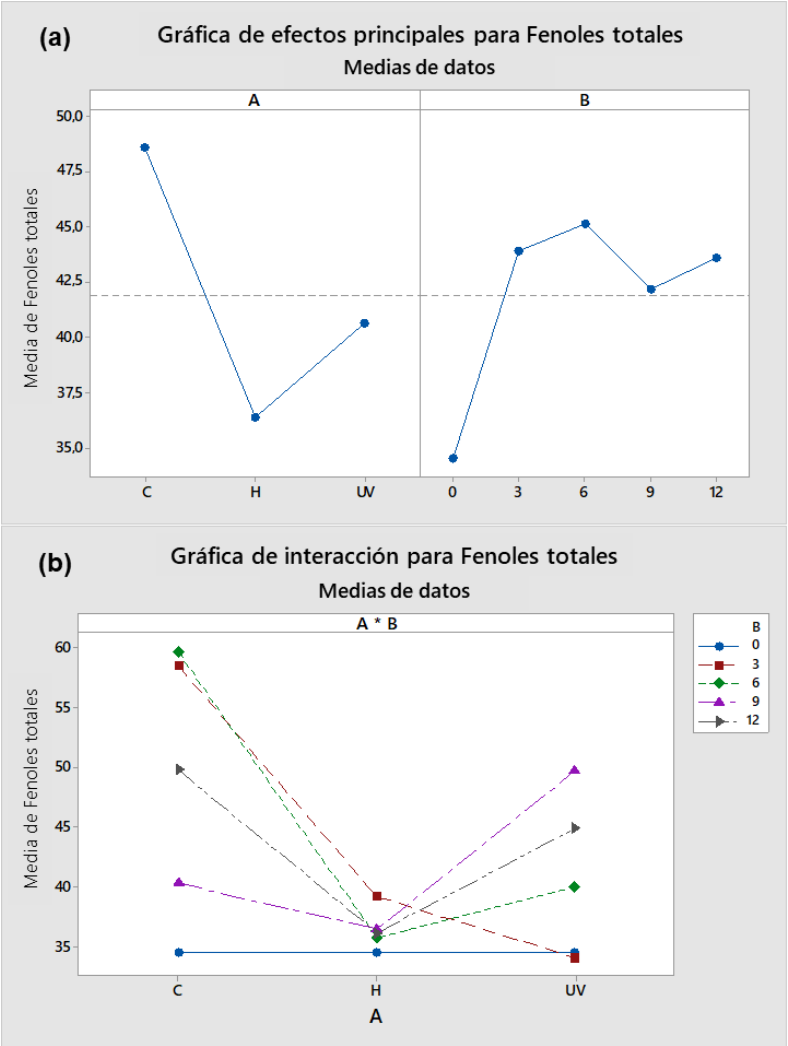
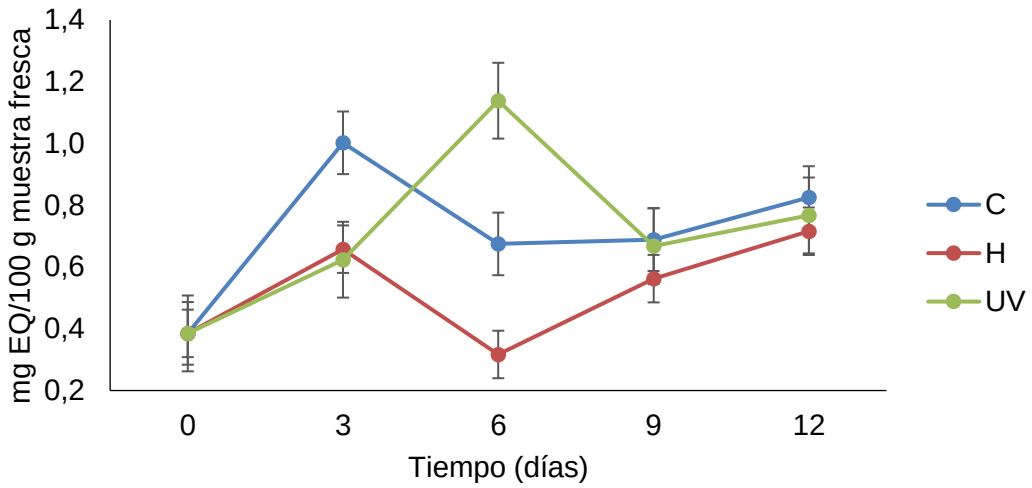


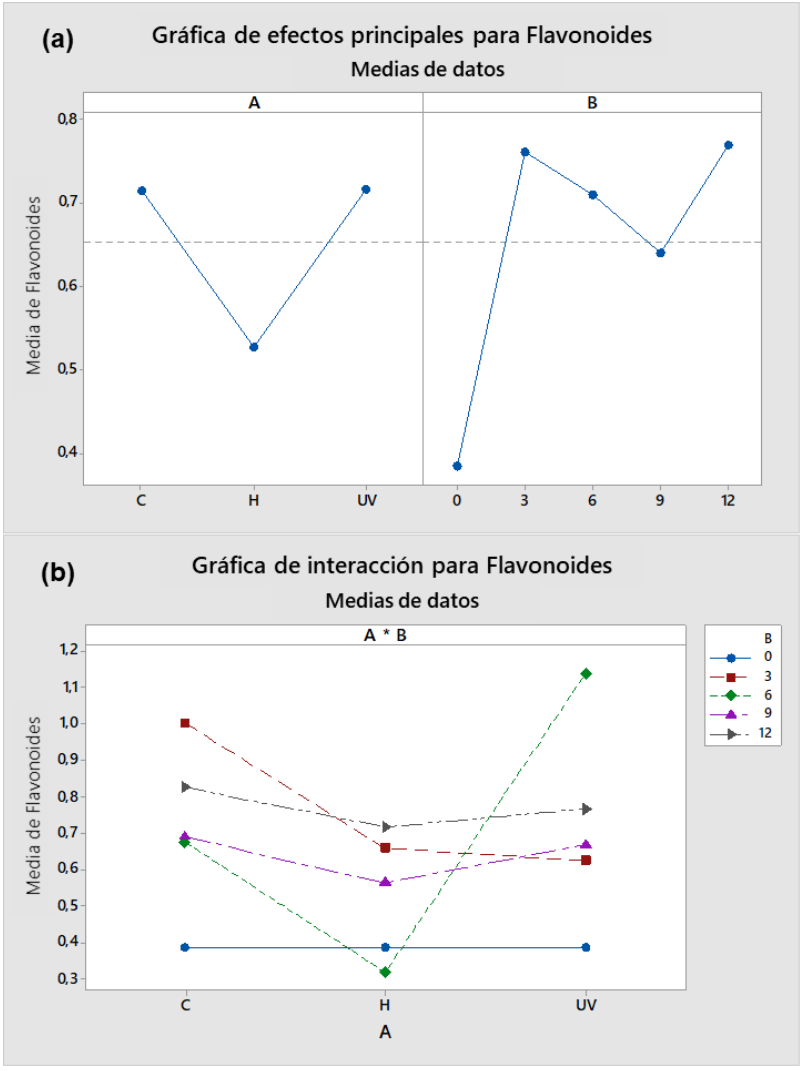
Figura 3-36: Cambios en el contenido de flavonoides del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el almacenamiento refrigerado. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado.



El mango mínimamente procesado mostró un bajo contenido de flavonoides, lo cual pudo presentarse por la baja expresión de la enzima flavonol sintasa en la maduración del fruto, según Maldonado-Celis et al. (2019). No obstante, se presentaron picos en el contenido de flavonoides durante los días 3, 12 y 6 para las muestras de los tratamientos C, H y UV, respectivamente (Figura 3-36). Según la Tabla A-17 de los Anexos, el tratamiento de desinfección, el tiempo de almacenamiento y la interacción de estos factores tuvieron efecto significativo en el contenido de flavonoides del mango mínimamente procesado ($p<0,05$). La gráfica de efectos principales (Figura 3-37a) indica que el promedio del contenido de flavonoides fue mayor para las muestras del tratamiento UV y para el día 12; y menor para las muestras del tratamiento H y al inicio del almacenamiento. Mientras que la gráfica de interacción (Figura 3-37b) sugiere que el contenido de flavonoides tuvo menor variación durante el almacenamiento para las muestras del tratamiento H. Esto pudo deberse a que la UV-C induce al incremento de los niveles de flavonoides debido a sus propiedades cromóforas y de absorción de luz (Zeng et al., 2020). La irradiación del fruto con UV-C conlleva a la regulación del estrés oxidativo y la biosíntesis de enzimas clave en la ruta biosintética de flavonoides como la fenilalanina amonio liasa (PAL) y la chalcona sintasa (CHS) (Michailidis et al., 2019). El estrés causado por la UV-C puede aumentar la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) y de compuestos captadores de ROS

y absorbentes de radiación UV (Castillejo et al., 2022). Este proceso se desarrolla mediante la activación de la vía de señalización de las proteínas COP1 y UVR8 de fotorrecepción para la producción de moléculas anti UV, incluyendo los flavonoides (Li et al., 2017). En otra investigación desarrollada por González-Aguilar et al. (2007b) encontraron que el contenido de flavonoides totales incrementaba en el mango 'Haden' mínimamente procesado irradiado con UV-C por 0, 5 y 10 min durante los 18 días de almacenamiento a 5 °C. De forma similar, las muestras irradiadas exhibieron valores mayores en el contenido de flavonoides totales, en comparación el mango mínimamente procesado sin tratamiento de desinfección.

Figura 3-37: Gráficas factoriales para flavonoides. Gráfica de efectos principales (a) y gráfica de interacción (b).



3.9. Capacidad antioxidante

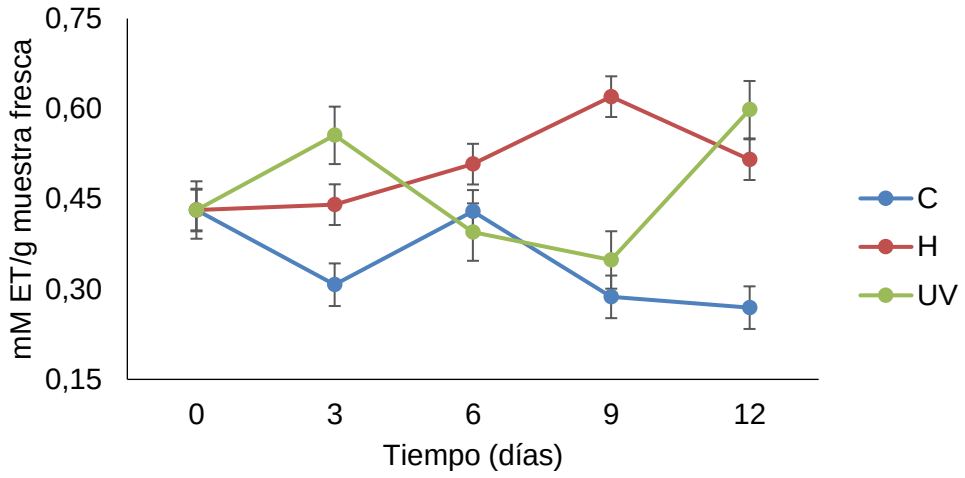
En la Tabla 3-11, se muestran los resultados del diseño que permitió analizar el efecto del tratamiento desinfección y del tiempo de almacenamiento en la capacidad antioxidante del mango mínimamente procesado mediante los ensayos de DPPH, ABTS y FRAP. Según Rosalie et al. (2018) y Kan et al. (2021), el aumento de la producción de ROS debido a la actividad respiratoria y mitocondrial puede conllevar a la acumulación de H_2O_2 y al incremento en el contenido de malondialdehido. De esta forma, para hacer frente al estrés oxidativo ocasionado por la maduración y al frío durante el almacenamiento, el mango puede aumentar los sistemas enzimáticos antioxidantes y de regeneración de ascorbato, mediante la eliminación enzimática de ROS por la superoxidasa dismutasa (SOD), catalasa (CAT), ascorbato peroxidasa (APX), glutatión S-transferasa (GST), GPX y POD.

Tabla 3-111: Resultados del diseño para capacidad antioxidante

Orden de corrida	Tratamiento	Tiempo (días)	DPPH (mM ET/g muestra fresca)	ABTS (mM ET/g muestra fresca)	FRAP (mM ET/g muestra fresca)
1	C	0	0,432±0,035^{bcde}	0,561±0,016^{ab}	0,539±0,008^{e}
2	C	3	0,307±0,010^{e}	0,595±0,014^{a}	0,653±0,012^{ab}
3	C	6	0,429±0,102^{bcde}	0,622±0,022^{a}	0,677±0,000^{a}
4	C	9	0,287±0,063^{e}	0,572±0,007^{ab}	0,635±0,019^{abcd}
5	C	12	0,269±0,008^{e}	0,611±0,012^{a}	0,658±0,013^{ab}
6	H	0	0,432±0,035^{bcde}	0,561±0,016^{ab}	0,539±0,008^{e}
7	H	3	0,441±0,018^{bcde}	0,515±0,044^{bc}	0,605±0,007^{bcd}
8	H	6	0,508±0,099^{abcd}	0,623±0,013^{a}	0,581±0,010^{de}
9	H	9	0,620±0,014^{a}	0,596±0,019^{a}	0,641±0,022^{abc}
10	H	12	0,515±0,108^{abcd}	0,565±0,006^{ab}	0,590±0,590^{cde}
11	UV	0	0,432±0,035^{bcde}	0,561±0,016^{ab}	0,539±0,008^{e}
12	UV	3	0,556±0,049^{abc}	0,575±0,016^{ab}	0,641±0,022^{abc}
13	UV	6	0,395±0,055^{cde}	0,613±0,012^{a}	0,689±0,050^{a}
14	UV	9	0,349±0,088^{de}	0,617±0,012^{a}	0,655±0,004^{ab}
15	UV	12	0,598±0,071^{ab}	0,481±0,053^{c}	0,651±0,023^{ab}

Los valores son medias ± desviación estándar. Las medias que no comparten una misma letra por columna son significativamente diferentes ($p<0,05$).

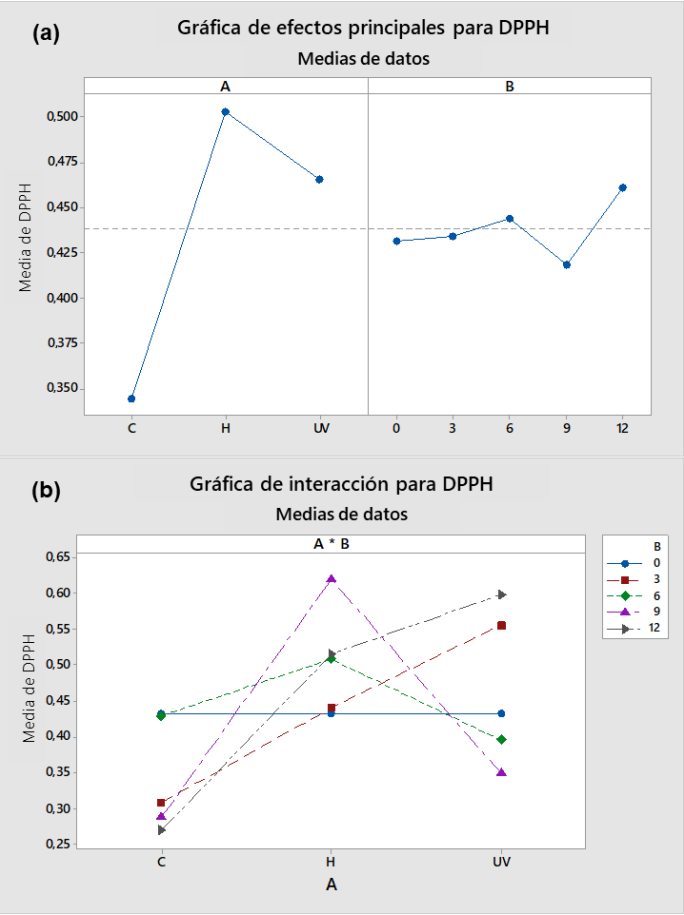
Figura 3-38: Evolución de la capacidad antioxidante por DPPH del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el almacenamiento refrigerado. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado.



La capacidad antioxidante estimada con el ensayo DPPH exhibió una tendencia a mantenerse constante durante todo el almacenamiento del mango mínimamente procesado de los tratamientos C y H. Al final del almacenamiento, la capacidad antioxidante disminuyó en los trozos de mango del tratamiento C y aumentó en las muestras del tratamiento UV (Figura 3-38). Alothman et al. (2009) mencionaron que la capacidad antioxidante por el ensayo DPPH puede disminuir por la oxidación de algunos compuestos bioactivos, en especial del ácido ascórbico. Mientras que el aumento de la capacidad antioxidante por DPPH en las muestras del tratamiento UV pudo relacionarse con el incremento de la actividad de la enzima PAL en respuesta al estrés externo provocado por la irradiación del fruto (Prajapati et al., 2021). Mediante el ensayo de DPPH se mide la capacidad de que los compuestos con capacidad de estabilizar radicales libres, tales como ácidos orgánicos y fenólicos, y alcoholes fenólicos (Velderrain-Rodríguez et al., 2021). Por ende, la acumulación de fenoles pudo conllevar a una alta actividad antioxidante. En otra investigación, Pristijono et al. (2019) reportaron que la capacidad antioxidante por el ensayo DPPH fue mayor para el mango entero irradiado con 4, 8,3 y 11,7 kJ/m^2 al final del almacenamiento a 20 °C con 0,005 y 0,1 µL/L de etileno, en comparación los mangos de la muestra control (sin ningún tratamiento). González-Aguilar et al. (2007a) indicaron que la capacidad antioxidante por DPPH del mango mínimamente

procesado tratado con UV-C por 1, 3, 5 y 10 minutos, aumentaba conforme a la intensidad del tratamiento y a los días de almacenamiento a 5 °C. Estos autores también encontraron que las muestras control no mostraban cambios en su capacidad antioxidante durante los 15 días de almacenamiento. La baja capacidad antioxidante pudo ser consecuencia de las lesiones producidas debido al mínimo procesamiento (Barreto et al., 2021).

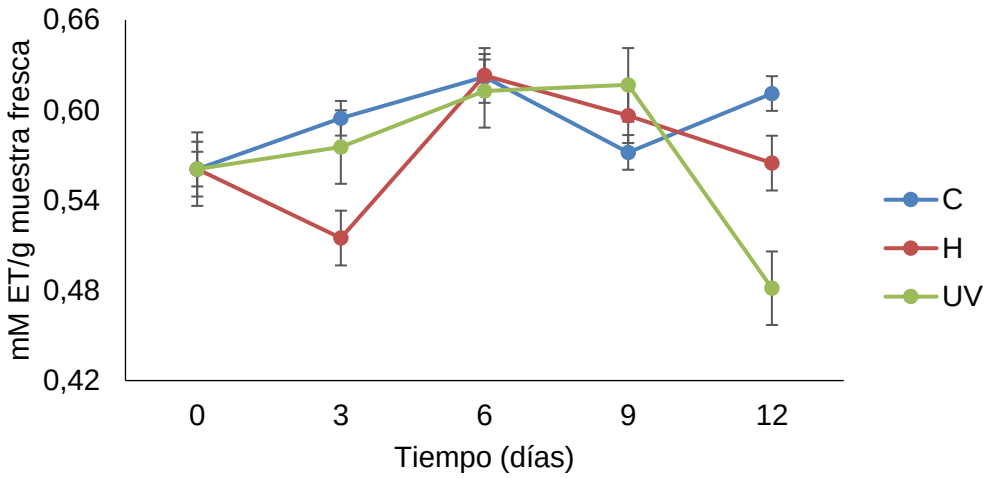
Figura 3-39: Gráficas factoriales para capacidad antioxidante por DPPH. Gráfica de efectos principales (a) y gráfica de interacción (b).



Con la Tabla A-18 de los Anexos, se constató que el tratamiento de desinfección, y la interacción entre los factores tuvieron efectos significativos en la capacidad antioxidante del mango mínimamente procesado obtenida por el método DPPH ($p<0,05$). Sin embargo, el factor tiempo de almacenamiento no tuvo un efecto significativo en la capacidad antioxidante del mango mínimamente procesado obtenida mediante el ensayo DPPH ($p>0,05$). Por otra parte, el promedio de la capacidad antioxidante obtenida por el ensayo DPPH fue ligeramente mayor para las muestras del tratamiento H y al final del

almacenamiento; y fue menor para las muestras del tratamiento C y al día 9 de almacenamiento (Figura 3-39a). La menor variación de la capacidad antioxidante durante el almacenamiento se presentó para las muestras del tratamiento C. (Figura 3-39b).

Figura 3-40: Evolución de la capacidad antioxidante por ABTS del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el almacenamiento refrigerado. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado.



De acuerdo con la Figura 3-40, la capacidad antioxidante obtenida por el método ABTS tendió a ser constante para los trozos de mango del tratamiento C, aumentó ligeramente para las muestras del tratamiento H durante todo el almacenamiento, y disminuyó para las muestras del tratamiento UV al final del almacenamiento. Esto pudo suceder por la oxidación o baja acumulación de delta-tocoferol en la fruta debido a la irradiación con UV-C y a la maduración del mango (Kan et al., 2021). Es posible que la UV-C afectara la integridad de la estructura celular y de las vacuolas, fomentando la liberación de compuestos con actividad antioxidante (Rybak et al., 2021). Asimismo, Almeida-Miguel et al. (2016) reportaron que la elevada actividad de la enzima PPO y la baja actividad de la PAL en el mango durante el inicio de la senescencia tienen incidencia en su capacidad antioxidante por ABTS. En otro estudio, Rivera-Pastrana et al. (2014) indicaron que en la pulpa de la papaya 'Maradol' tratada con 1,48 kJ/m^2, la capacidad antioxidante por el ensayo ABTS disminuyó durante los 15 días de almacenamiento a 15 °C; y en las muestras control se notaron cambios importantes en la capacidad antioxidante. En la Tabla A-19 de

los Anexos, se confirma que el tratamiento de desinfección, el tiempo de almacenamiento y la interacción de estos factores tuvieron un efecto significativo en la capacidad antioxidante del mango mínimamente procesado obtenida por ABTS ($p<0,05$). El promedio de la capacidad antioxidante obtenida por el ensayo ABTS fue mayor para las muestras del tratamiento C y para el día 6 de almacenamiento; mientras que este parámetro fue menor para las muestras del tratamiento UV y al inicio del almacenamiento (Figura 3-41a). La variación de los valores de la capacidad antioxidante obtenida por ABTS fue menor para las muestras del tratamiento C (Figura 3-41b).

Figura 3-41: Gráficas factoriales para capacidad antioxidante por ABTS. Gráfica de efectos principales (a) y gráfica de interacción (b).

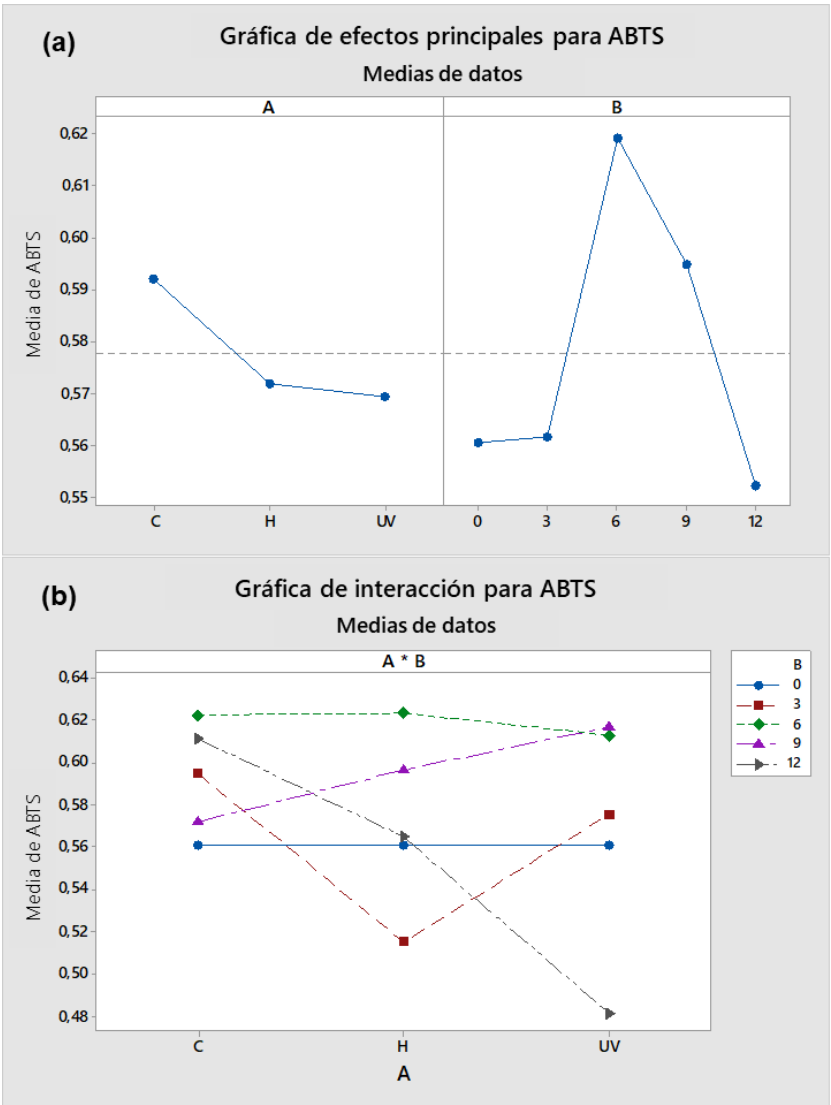
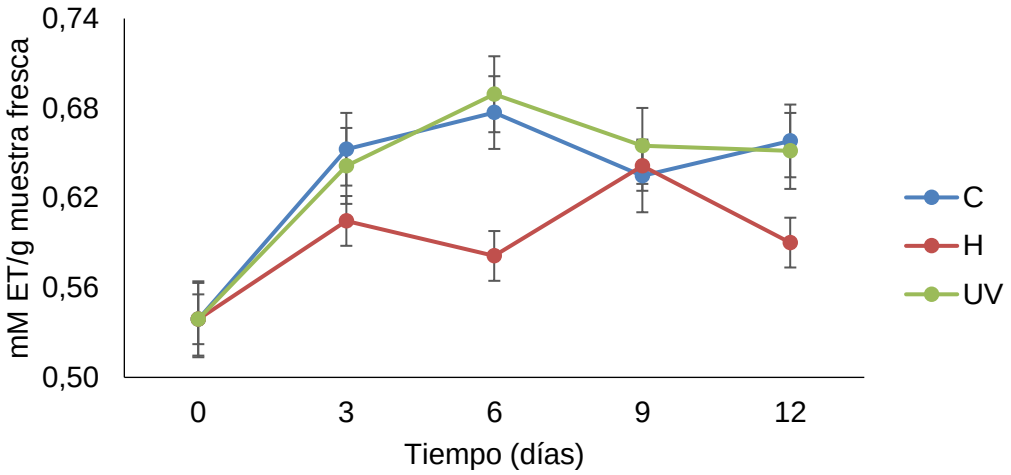


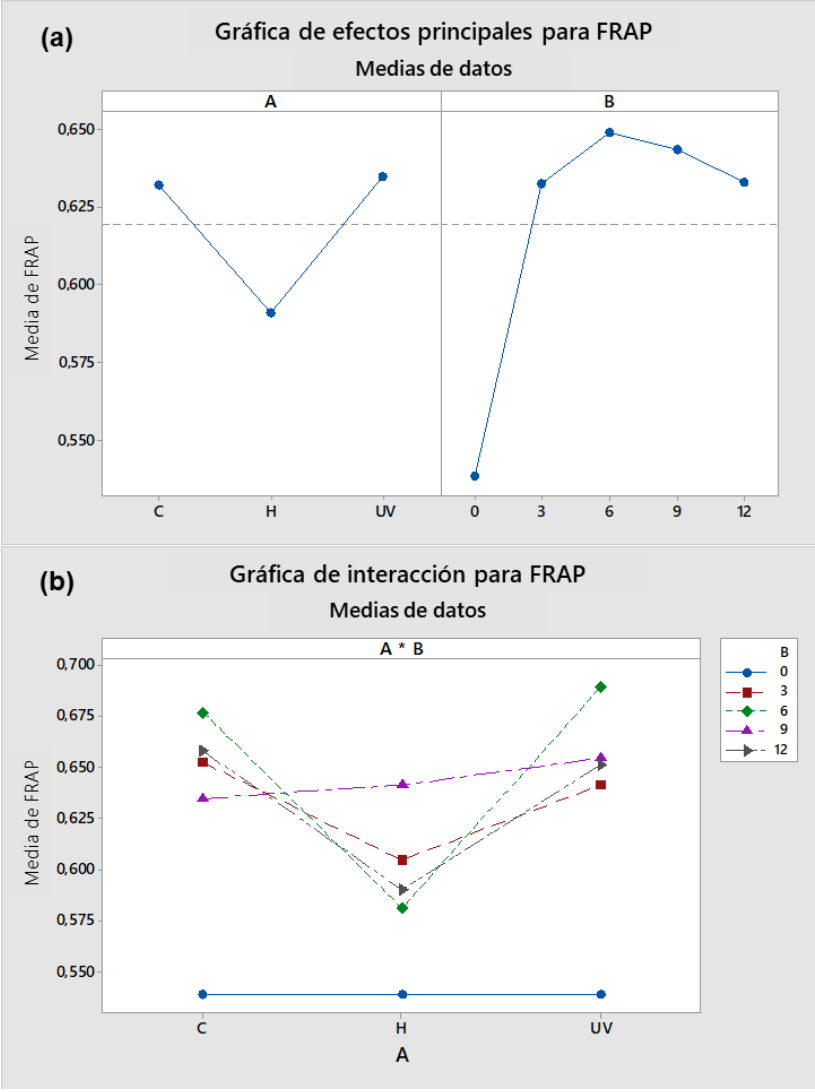
Figura 3-42: Evolución de la capacidad antioxidante por FRAP del mango mínimamente procesado con distintos tratamientos de desinfección durante el almacenamiento refrigerado. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado.



La capacidad antioxidante obtenida por el ensayo FRAP exhibió ligeros picos en el día 6 de almacenamiento para los trozos de mango de los tratamientos C y UV, y en el día 9 de almacenamiento para las muestras del tratamiento H. Esto probablemente sucedió debido a que el estrés por la baja temperatura de refrigeración y la irradiación con UV-C activaron el mecanismo de defensa de enzimas relacionadas con la eliminación de ROS y la biosíntesis de compuestos antioxidantes (Hinojosa et al., 2013). Asimismo, el poder reductor pudo estar correlacionado con el grado de hidroxilación y conjugación de los polifenoles presentes en el fruto (Londoño-Londoño, 2012). Alothman et al. (2009) encontraron que la capacidad antioxidante por el método de FRAP de los trozos de piña, banano y guayaba irradiados con UV-C por 0, 10, 20 y 30 min, permaneció casi constante después de todos los tratamientos. Por el contrario, Shen et al. (2013) indicaron que la capacidad antioxidante por FRAP en la mandarina 'Satsuma' mínimamente procesada e irradiada con 0, 0,75, 1,5 y 3 kJ/m^2, disminuía conforme a la intensidad del tratamiento y al avance del almacenamiento a 4 °C. Según la Tabla A-20 de los Anexos, el tratamiento de desinfección, el tiempo de almacenamiento y la interacción de dichos factores tuvieron efecto significativo en la capacidad antioxidante del mango mínimamente procesado obtenido por el método FRAP ($p<0,05$). El promedio de la capacidad antioxidante obtenida por FRAP fue mayor para las muestras del tratamiento UV y para el día 6 de

almacenamiento; y menor para las muestras del tratamiento H y al inicio del almacenamiento (Figura 3-40a). La menor variación de los valores de capacidad antioxidante por FRAP fue presentada por las muestras del tratamiento H (Figura 3-40b). Ruiz-Cruz et al. (2010) señalaron que el tratamiento con un agente químico puede conllevar a la pérdida de compuestos fenólicos y de la capacidad antioxidante en un vegetal mínimamente procesado por la inmersión del material vegetal en una disolución.

Figura 3-43: Gráficas factoriales para capacidad antioxidante por FRAP. Gráfica de efectos principales (a) y gráfica de interacción (b).



En la Tabla 3-12 se presentan las correlaciones más significativas entre carotenoides totales, fenoles totales, flavonoides y capacidad antioxidante por los ensayos DPPH, ABTS y FRAP. La correlación lineal entre flavonoides y carotenoides totales fue muy alta

(ρ=0,923). Han et al. (2012) señalaron que el β-caroteno y la isoflavona puerarina tienen una reacción de sinergismo en los liposomas, lo cual permite que se retrase la formación de dienos conjugados durante la oxidación lipídica primaria. La regeneración del β-caroteno se lleva a cabo con la estabilización del radical catión Car con el 7-fenolato de la puerarina, mediante la transferencia de electrones. La correlación alta entre FRAP y fenoles pudo darse porque son métodos que emplean el mecanismo de transferencia de electrones para evaluar la actividad antioxidante de una matriz (Moharram & Youssef, 2014). Tanto en el ensayo de FRAP como en el método de cuantificación de fenoles totales se desarrollan reacciones de óxido-reducción. Entre la capacidad antioxidante por el método FRAP y los carotenoides totales existió una correlación positiva y alta, ya que los carotenoides también actúan por el mecanismo de transferencia de electrones, lo cual implicó un alto potencial redox en estos compuestos (Pérez-Gálvez et al., 2020).

La correlación alta entre flavonoides y la capacidad antioxidante por FRAP puede darse en una matriz heterogénea porque los flavonoides son estabilizadores de distintos radicales y compuestos antioxidantes, incluyendo la regeneración del β-caroteno (Han et al., 2012). La correlación moderada entre flavonoides y fenoles se pudo establecer partiendo del hecho de que los flavonoides también son compuestos fenólicos de dos anillos bencénicos unidos por un heterociclo piránico (Londoño-Londoño, 2012). Tanto los fenoles como los flavonoides son unos de los principales compuestos bioactivos con actividad antioxidante en los extractos provenientes de vegetales (Aryal et al., 2019).

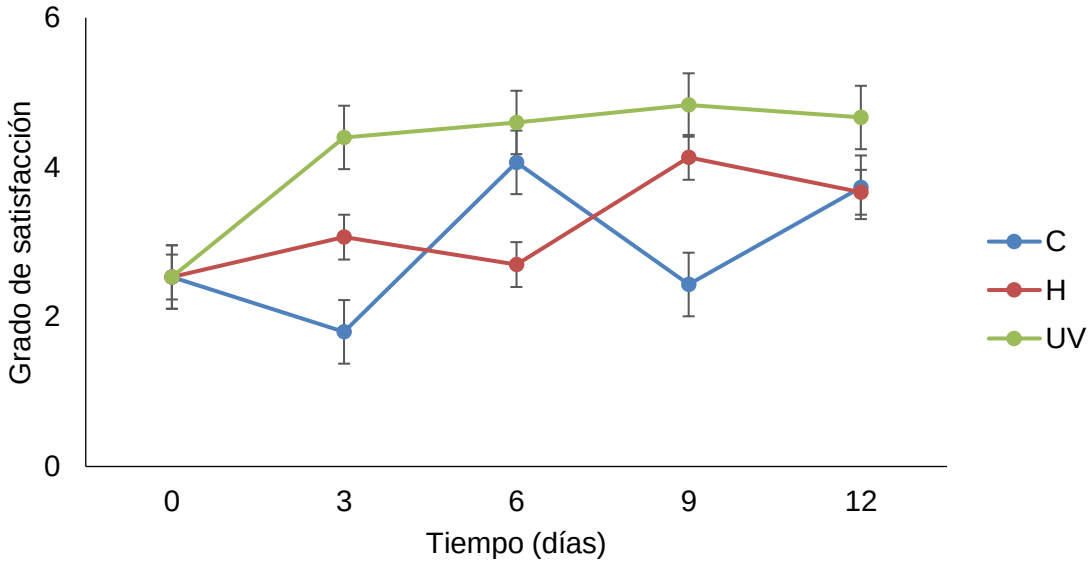
Tabla 3-122: Coeficiente de correlación entre carotenoides totales, fenoles totales, flavonoides y las pruebas de capacidad antioxidante.

Correlación	Coeficiente de correlación de Pearson (ρ)	Valor p
Flavonoides-Carotenoides	0,923	0,000
FRAP-Flavonoides	0,799	0,006
FRAP-Carotenoides	0,723	0,043
FRAP-Fenoles	0,649	0,028
Flavonoides-Fenoles	0,547	0,035

3.10. Análisis de vida útil sensorial

La apariencia global de un producto mínimamente procesado es un aspecto crítico para los consumidores al momento de la compra (Ares et al., 2008). De acuerdo con la Tabla B-1 de los Anexos, el tratamiento de desinfección, el tiempo de almacenamiento y la interacción entre dichos factores tuvo un efecto significativo en el grado de satisfacción de los consumidores con respecto a la apariencia global del mango mínimamente procesado ($p<0,05$). Por lo tanto, se constató que es necesario calcular la vida útil de un producto considerando la percepción de los consumidores en la compra y consumo (Giménez & Ares, 2019).

Figura 3-44: Efecto de los distintos tratamientos de desinfección y del tiempo de almacenamiento del mango mínimamente procesado sobre el grado de satisfacción del consumidor en su apariencia global. Los puntos indican la media y las barras de error denotan la desviación estándar de los resultados obtenidos por triplicado.



En la Figura 3-44, se observa que en general hubo una tendencia a que al final del almacenamiento del mango mínimamente procesado aumentaran las calificaciones que fluctuaban entre 5 ("Indiferente") y 9 ("No me gustó extremamente"), dada la senescencia de los tejidos vegetales. El rechazo al final del almacenamiento se evidencia en distintos estudios debido a la pérdida o cambio de características de calidad de los alimentos (Giménez et al., 2012). El mango mínimamente procesado con el tratamiento C fue el más

aceptado por parte de los consumidores durante todo el almacenamiento. Los trozos de mango con el tratamiento H recibieron la segunda mejor calificación durante el almacenamiento, debido a que el hipoclorito de sodio es un agente desinfectante altamente efectivo en la reducción de microorganismos causantes del deterioro, los cuales pueden afectar la apariencia de un alimento de origen vegetal (Silveira et al., 2008). Por otra parte, el mango mínimamente procesado del tratamiento UV mantuvo unas calificaciones de grado de satisfacción cercanas al criterio de censura durante todo el almacenamiento, ya que la irradiación con UV-C pudo retrasar algunos cambios bioquímicos, los cuales influyeron en la maduración del fruto y su color superficial (Quintero-Cerón et al., 2013).

La estimación de vida útil fue desarrollado empleando la distribución de Weibull y se consideró una probabilidad de 50% para que los consumidores rechazaran las muestras, según la metodología de García-Mogollón et al. (2010). Para ello, inicialmente se rechazó el supuesto de normalidad con una prueba de Anderson-Darling ($p<0,05$), lo cual permitió determinar que los datos resultantes de la función de riesgo acumulado tenían mejor ajuste a una distribución exponencial ($p\approx0,003$), similar a la naturaleza de la distribución de Weibull (ver figuras del Anexo B). Los tiempos de fallo se obtuvieron mediante una regresión exponencial de la distribución de Weibull con el método de mínimos cuadrados lineales, y se notó que el ajuste a una línea recta fue mayor para los tratamientos que presentaron los valores de p más cercanos a 0 en la prueba de Anderson-Darling. De esta forma, los datos de los tratamientos H y UV fueron los que más se ajustaron a la distribución de Weibull ($R^2>0,8$). Los datos de los tratamientos C exhibieron menor ajuste ($R^2>0,7$). También cabe resaltar que, para el tratamiento C, el promedio de grado de satisfacción no sobrepasó el criterio de censura durante el tiempo de almacenamiento.

Con la información presentada en la Tabla 3-13, se evidenció que la distribución de Weibull no estaba sesgada y permitía mejores estimaciones de la vida útil, ya que los valores del factor de forma (β) se encontraban dentro de un rango óptimo ($2<\beta<4$) (Cardelli & Labuza, 2001). Según Hough & Garitta (2012), con la distribución de Weibull no se considera la naturaleza censurada de los datos. Por esta razón, se estimaron los valores de tiempo de falla a la izquierda y a la derecha mediante un análisis de supervivencia que consideró los intervalos de confianza, de acuerdo con lo planteado por García-Mogollón et al. (2010). Esto con el fin de determinar un rango en el que exista la probabilidad de que el consumidor rechace el mango mínimamente procesado tratado con las alternativas de desinfección. El

tiempo de vida útil sensorial fue mayor para los trozos de mango tratados con hipoclorito de sodio y ligeramente menor para aquellas muestras de los tratamientos C y UV. En promedio, el tiempo de vida útil sensorial del mango 'Tommy Atkins' mínimamente procesado tendió a ser aproximadamente 8 días. Aunque dicho resultado no converge con los análisis microbiológicos, la aceptación de un producto por parte de los consumidores depende de los atributos sensoriales y no sensoriales, estos últimos incluyen la seguridad alimentaria y los componentes nutricionales (Maherani et al., 2016).

Tabla 3-133: Tiempos de vida útil sensorial estimados para el mango mínimamente procesado tratado con diferentes alternativas de desinfección.

Tratamiento de desinfección	Tiempo de vida útil sensorial (días)	Parámetros	
		α	β
C	5,1≤7,9≤10,9	8,801	3,277
H	5,6≤8,6≤11,8	9,659	2,965
UV	4,4≤7,4≤10,5	8,295	2,481

4. Conclusiones

Los tratamientos de desinfección del mango 'Tommy Atkins' mínimamente procesado con hipoclorito de sodio seguido por el de luz UV-C fueron los más apropiados en la conservación de atributos de calidad. La aplicación de una dosis de luz UV-C de 6 kJ/m^2, promovió la conservación de las propiedades fisicoquímicas, los parámetros de color, el contenido de carotenoides totales, fenoles totales, flavonoides y la capacidad antioxidante por los ensayos de DPPH y FRAP durante el almacenamiento por 12 días a 5 °C y 85-90% de HR. Sin embargo, este tratamiento fomentó la pérdida de la firmeza y de compuestos antioxidantes lipofílicos. Aunque la vida útil sensorial de los trozos de mango tratados con luz UV-C fue de 7,4 días, estos presentaron condiciones de consumo e inocuidad hasta el final del periodo de almacenamiento de acuerdo con los valores tolerables de recuentos definidos en la norma NTC 6005. En general, se puede afirmar que el tratamiento agroindustrial de desinfección de mango en trozos con luz UV-C es una alternativa tecnológica para sustituir al método de desinfección convencional con hipoclorito de sodio, ya que además de promover la conservación de los atributos de calidad del fruto, mitiga el impacto en el medio ambiente y en la salud de los consumidores al no incluir químicos peligrosos durante el procesamiento mínimo.

Referencias

Almeida-Miguel, A. C., Durigan, J. F., Marques, K. M., Ascari-Morgado, C. M., & Ferraudo, A. S. (2016). Prevention of chilling injury in “Tommy Atkins” mangoes previously stored at 5 °C, using heat tratment and radiation UV (UV-C). *Revista Brasileira de Fruticultura*, *38*(1), 53–63. https://doi.org/10.1590/0100-2945-123/14

Alothman, M., Bhat, R., & Karim, A. A. (2009). UV radiation-induced changes of antioxidant capacity of fresh-cut tropical fruits. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *10*(4), 512–516. https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2009.03.004

AOAC International. (2012). *Official Methods of Analysis of AOAC International* (G. W. Latimer (Ed.); 19th Edition). AOAC International.

Ares, G., Giménez, A., & Gámbaro, A. (2008). Sensory shelf life estimation of minimally processed lettuce considering two stages of consumers’ decision-making process. *Appetite*, *50*(2–3), 529–535. https://doi.org/10.1016/J.APPET.2007.11.002

Artés-Hernández, F., Escalona, V. H., Robles, P. A., Martínez-Hernández, G. B., & Artés, F. (2009). Effect of UV-C radiation on quality of minimally processed spinach leaves. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *89*(3), 414–421. https://doi.org/10.1002/JSFA.3460

Artés-Hernández, F., Martínez-Hernández, G. B., Aguayo, E., Gómez, P. A., & Artés, F. (2017). Fresh-cut fruit and vegetables: emerging eco-friendly techniques for sanitation and preserving safety. In I. Kahramanoglu (Ed.), *Postharvest handling*. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.69476

Artés-Hernández, F., Robles, P. A., Gómez, P. A., Tomás-Callejas, A., Artés, F., & Martínez-Hernández, G. B. (2021). Quality changes of fresh-cut watermelon during storage as affected by cut intensity and UV-C pre-treatment. *Food and Bioprocess Technology*, *14*(3), 505–517. https://doi.org/10.1007/S11947-021-02587-1/TABLES/2

Aryal, S., Baniya, M. K., Danekhu, K., Kunwar, P., Gurung, R., & Koirala, N. (2019). Total phenolic content, flavonoid content and antioxidant potential of wild vegetables from Western Nepal. *Plants*, *8*(4). https://doi.org/10.3390/PLANTS8040096

Azeredo, H. M. C. de. (2004). *Fundamentos de estabilidade de alimentos*. Embrapa Agroindústria Tropical.

Baeza, A., Silveira, A. C., & Escalona, V. (2015). Empleo de radiación UV-C como método de desinfección para la elaboración de rúcula (*Eruca sativa* Mill.) mínimamente

procesada. *Agrociencia (Uruguay)*, *19*(2), 26–35. http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2301-15482015000200004

Balaguera-López, H. E., & Arévalo, A. H. (2012). Estudio de algunos cambios bioquímicos durante el crecimiento y hasta la cosecha del fruto de champa (*Campomanesia lineatifolia* R. & P. familia myrtaceae). *Revista Brasileira de Fruticultura*, *34*(2), 460–468. https://doi.org/10.1590/S0100-29452012000200019

Barreto, C. F., Navroski, R., Duarte-Marques, L. O., dos Santos, R. F., Barbosa-Malgarim, M., & Martins, C. R. (2021). Influência da radiação ultravioleta e aditivos na conservação de kiwis minimamente processados. *Brazilian Journal of Food Technology*, *24*, e2020024. https://doi.org/10.1590/1981-6723.02420

Bhagat, B., & Chakraborty, S. (2022). Potential of pulsed light treatment to pasteurize pomegranate juice: Microbial safety, enzyme inactivation, and phytochemical retention. *LWT*, *159*, 113215. https://doi.org/10.1016/J.LWT.2022.113215

Cao, M., Wang, D., Qiu, L., Ren, X., & Ma, H. (2021). Shelf life prediction of 'Royal Gala' apples based on quality attributes and storage temperature. *Horticultural Science and Technology*, *39*(3), 343–355. https://doi.org/10.7235/HORT.20210031

Cardelli, C., & Labuza, T. P. (2001). Application of Weibull hazard analysis to the determination of the shelf life of roasted and ground coffee. *LWT*, *34*(5), 273–278. https://doi.org/10.1006/FSTL.2000.0732

Castillejo, N., Martínez-Zamora, L., & Artés-Hernández, F. (2022). Postharvest UV radiation enhanced biosynthesis of flavonoids and carotenes in bell peppers. *Postharvest Biology and Technology*, *184*, 111774. https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2021.111774

Charles, F., Vidal, V., Olive, F., Filgueiras, H., & Sallanon, H. (2013). Pulsed light treatment as new method to maintain physical and nutritional quality of fresh-cut mangoes. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *18*, 190–195. https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2013.02.004

Courraud, J., Berger, J., Cristol, J., & Avallone, S. (2013). Stability and bioaccessibility of different forms of carotenoids and vitamin A during in vitro digestion. *Food Chemistry*, *136*(2), 871–877. https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2012.08.076

de Almeida-Lopes, M. M., de Lucena, H. H., Souza da Silveira, M. R., dos Santos Garruti, D., Feitosa Machado, T., Souza de Aragão, F. A., & de Oliveira Silva, E. (2021). The use of electrolyzed water as a disinfectant for fresh cut mango. *Scientia Horticulturae*,

287, 110227. https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2021.110227

De Corato, U. (2020). Improving the shelf-life and quality of fresh and minimally-processed fruits and vegetables for a modern food industry: A comprehensive critical review from the traditional technologies into the most promising advancements. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *60*(6), 940–975. https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1553025

Djioua, T., Charles, F., Freire, M., Filgueiras, H., Ducamp-Collin, M. N., & Sallanon, H. (2010). Combined effects of postharvest heat treatment and chitosan coating on quality of fresh-cut mangoes *(Mangifera indica* L.). *International Journal of Food Science & Technology*, *45*(4), 849–855. https://doi.org/10.1111/J.1365-2621.2010.02209.X

Dussán-Sarria, S., Perea-Camayo, M. A., & Hleap-Zapata, J. I. (2019). Efecto de diferentes antioxidantes y envases en atributos físico-químicos y sensoriales de orellana refrigerada. *Información Tecnológica*, *30*(6), 55–62. https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000600055

Dussán-Sarria, S., Ramírez-Yela, J. I., & Hleap-Zapata, J. I. (2017). Conservación de mango mínimamente procesado usando un recubrimiento comestible a base de aceite de aguacate. *Información Tecnológica*, *28*(3), 67–74. https://doi.org/10.4067/S0718-07642017000300008

Dussán-Sarria, S., Torres-León, C., & Hleap-Zapata, J. I. (2014a). Efecto de un recubrimiento comestible y de diferentes empaques durante el almacenamiento refrigerado de mango Tommy Atkins mínimamente procesado. *Información Tecnológica*, *25*(4), 123–130. https://doi.org/10.4067/S0718-07642014000400014

Dussán-Sarria, S., Torres-León, C., & Reyes-Calvache, P. M. (2014b). Efecto del recubrimiento comestible sobre los atributos físicoquímicos de mango “Tommy Atkins” mínimamente procesado y refrigerado. *Acta Agronómica*, *63*(3), 212–221. https://doi.org/10.15446/acag.v63n3.40973

Ediriweera, M. K., Tennekoon, K. H., & Samarakoon, S. R. (2017). A review on ethnopharmacological applications, pharmacological activities, and bioactive compounds of *Mangifera indica* (Mango). *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, *2017*. https://doi.org/10.1155/2017/6949835

Escobar-Hernández, A., Márquez-Cardozo, C. J., Restrepo-Florez, C. E., & Cordoba-Pérez, L. J. (2014). Aplicación de tecnología de barreras para la conservación de

mezclas de vegetales mínimamente procesados. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, *67*(1), 7237–7245. https://doi.org/10.15446/rfnam.v67n1.42652

Franco-Vega, A., Reyes-Jurado, F., González-Albarrán, D., Ramírez-Corona, N., Palou, E., & López-Malo, A. (2021). Developments and advances of high intensity pulsed light and its combination with other treatments for microbial inactivation in food products. *Food Engineering Reviews*, *13*(4), 741–768. https://doi.org/10.1007/S12393-021-09280-1

Fratianni, A., Adiletta, G., Matteo, M. Di, Panfili, G., Niro, S., Gentile, C., Farina, V., Cinquanta, L., & Corona, O. (2020). Evolution of carotenoid content, antioxidant activity and volatiles compounds in dried mango fruits (*Mangifera Indica* L.). *Foods 2020, 9*(10), 1424. https://doi.org/10.3390/FOODS9101424

García-Mogollón, C., Cury-Regno, K. I., & Dussán-Sarria, S. (2010). Evaluación poscosecha y estimación de vida útil de guayaba fresca utilizando el modelo de Weibull. *Acta Agronómica*, *59*(3), 347–355. https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/17664/18534

Garzón-García, A. M., Ruiz-Cruz, S., Márquez-Ríos, E., Dussán-Sarria, S., Hleap-Zapata, J. I., & Lobatón, H. F. (2020). Computational fluid dynamics as a technique for the UV-C light dose determination in horticultural products. *Biotecnia*, *22*(1), 84–92. https://doi.org/10.18633/BIOTECNIA.V22I1.1128

George, D. S., Razali, Z., Santhirasegaram, V., & Somasundram, C. (2015). Effects of ultraviolet light (UV-C) and heat treatment on the quality of fresh-cut Chokanan mango and Josephine pineapple. *Journal of Food Science*, *80*(2), S426–S434. https://doi.org/10.1111/1750-3841.12762

George, D. S., Razali, Z., Santhirasegaram, V., & Somasundram, C. (2016). Effect of postharvest ultraviolet-C treatment on the proteome changes in fresh cut mango (*Mangifera indica* L. cv. Chokanan). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *96*(8), 2851–2860. https://doi.org/10.1002/JSFA.7454

Giménez, A., Ares, F., & Ares, G. (2012). Sensory shelf-life estimation: A review of current methodological approaches. *Food Research International*, *49*(1), 311–325. https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2012.07.008

Giménez, A., & Ares, G. (2019). Sensory shelf life estimation. In C. M. Galanakis (Ed.), *Food quality and shelf life* (pp. 333–357). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817190-5.00011-2

González-Aguilar, G. A., Villegas-Ochoa, M. A., Martínez-Téllez, M. A., Gardea, A. A., &

Ayala-Zavala, J. F. (2007a). Improving antioxidant capacity of fresh-cut mangoes treated with UV-C. *Journal of Food Science*, *72*(3), S197–S202. https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00295.x

González-Aguilar, G. A., Zavaleta-Gatica, R., & Tiznado-Hernández, M. E. (2007b). Improving postharvest quality of mango ‘Haden’ by UV-C treatment. *Postharvest Biology and Technology*, *45*(1), 108–116. https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2007.01.012

González-Vega, R. I., Cárdenas-López, J. L., López-Elías, J. A., Ruiz-Cruz, S., Reyes-Díaz, A., Perez-Perez, L. M., Cinco-Moroyoqui, F. J., Robles-Zepeda, R. E., Borboa-Flores, J., & Del-Toro-Sánchez, C. L. (2021). Optimization of growing conditions for pigments production from microalga *Navicula incerta* using response surface methodology and its antioxidant capacity. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *28*(2), 1401–1416. https://doi.org/10.1016/J.SJBS.2020.11.076

Grasso, C., Forniti, R., & Botondi, R. (2022). Post-harvest quality evaluation of “Soreli” kiwifruit at two ripening °Brix values from vineyards of different age under hail nets. *Foods*, *11*(3), 431. https://doi.org/10.3390/FOODS11030431

Güler, S. K., Bostan, S. Z., & Çon, A. H. (2017). Effects of gamma irradiation on chemical and sensory characteristics of natural hazelnut kernels. *Postharvest Biology and Technology*, *123*, 12–21. https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2016.08.007

Han, R.-M., Zhang, J.-P., & Skibsted, L. H. (2012). Reaction dynamics of flavonoids and carotenoids as antioxidants. *Molecules*, *17*(2), 2140. https://doi.org/10.3390/MOLECULES17022140

Hinojosa, A., Silveira, A. C., Ospina, M., Char, C., Sáenz, C., & Escalona, V. H. (2013). Safety of ready-to-eat watercress using environmentally friendly sanitization methods. *Journal of Food Quality*, *36*(1), 66–76. https://doi.org/10.1111/jfq.12016

Hough, G., Langohr, K., Gomez, G., & Curia, A. (2003). Survival analysis applied to sensory shelf life of foods. *Journal of Food Science*, *68*(1), 359–362. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2003.tb14165.x

Hough, Guillermo, & Garitta, L. (2012). Methodology for sensory shelf-life estimation: a review. *Journal of Sensory Studies*, *27*(3), 137–147. https://doi.org/10.1111/J.1745-459X.2012.00383.X

Hough, Guillermo, Puglieso, M. L., Sanchez, R., & da Silva, O. M. (1999). Sensory and microbiological shelf-life of a commercial Ricotta cheese. *Journal of Dairy Science*,

82(3), 454–459. https://doi.org/10.3168/JDS.S0022-0302(99)75253-7

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2013). *NTC 6005: ALIMENTOS MÍNIMAMENTE PROCESADOS* (pp. 1–13).

Instituto Tecnológico del Plástico. (2012). *Guía del usuario del envase plástico*. https://www.sena-sa.com/wp-content/uploads/2020/04/elenvaseplastico.pdf

Kader, A. A. (2008). *Parámetros de calidad y estándares de clasificación en mango. Revisión de información disponible y futuras necesidades de investigación*. https://www.mango.org/wp-content/uploads/2018/03/Mango_Grade_Standards_Final_Report_Spn.pdf

Kan, J., Hui, Y., Lin, X., Liu, Y., & Jin, C. (2021). Postharvest ultraviolet-C treatment of peach fruit: Changes in transcriptome profile focusing on genes involved in softening and senescence. *Journal of Food Processing and Preservation*, *45*(10), e15813. https://doi.org/10.1111/JFPP.15813

Khubone, L. W., & Mditshwa, A. (2018). The effects of UV-C irradiation on postharvest quality of tomatoes (*Solanum lycopersicum*). *Acta Horticulturae*, *1201*, 75–82. https://doi.org/10.17660/ACTAHORTIC.2018.1201.11

Kumar, M., Saurabh, V., Tomar, M., Hasan, M., Changan, S., Sasi, M., Maheshwari, C., Prajapati, U., Singh, S., Prajapat, R. K., Dhumal, S., Punia, S., Amarowicz, R., & Mekhemar, M. (2021). Mango (*Mangifera indica* L.) leaves: Nutritional composition, phytochemical profile, and health-promoting bioactivities. *Antioxidants,10*(2), 299. https://doi.org/10.3390/ANTIOX10020299

Lázaro, A., & Lorenzo, C. de. (2015). Texture analysis in melon landraces through instrumental and sensory methods. *International Journal of Food Properties*, *18*(7), 1575–1583. https://doi.org/10.1080/10942912.2014.923441

Li, P., Yu, X., & Xu, B. (2017). Effects of UV-C light exposure and refrigeration on phenolic and antioxidant profiles of subtropical fruits (litchi, longan, and rambutan) in different fruit forms. *Journal of Food Quality*, *2017*. https://doi.org/10.1155/2017/8785121

Londoño-Londoño, J. (2012). Antioxidantes: importancia biológica y métodos para medir su actividad. In *Desarrollo y transversalidad* (pp. 129–162). Corporación Universitaria Lasallista. http://repository.lasallista.edu.co/dspace/handle/10567/133

Ma, X., Zheng, B., Ma, Y., Xu, W., Wu, H., & Wang, S. (2018). Carotenoid accumulation and expression of carotenoid biosynthesis genes in mango flesh during fruit development and ripening. *Scientia Horticulturae*, *237*, 201–206. https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2018.04.009

Mahecha, G., De Civetta, L. A., & Rodríguez, C. (1991). Normas de calidad para las variedades de mango “Tommy Atkins” y “común” (hilacha). *Revista Colombiana de Química*, *20*(2), 10–17. https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim

Maherani, B., Hossain, F., Criado, P., Ben-Fadhel, Y., Salmieri, S., & Lacroix, M. (2016). World market development and consumer acceptance of irradiation technology. *Foods*, *5*(4), 79. https://doi.org/10.3390/FOODS5040079

Maldonado-Celis, M. E., Yahia, E. M., Bedoya, R., Landázuri, P., Loango, N., Aguillón, J., Restrepo, B., & Guerrero Ospina, J. C. (2019). Chemical composition of mango (*Mangifera indica* L.) fruit: Nutritional and phytochemical compounds. *Frontiers in Plant Science*, *10*, 1073. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01073

Márquez-Villacorta, L., Pretell-Vásquez, C., & Minchón-Medina, C. (2011). Efecto del tratamiento desinfectante y tiempo de almacenamiento sobre las características fisicoquímicas, microbiológicas y sensoriales de rebanadas de mango (*Mangifera indica*) Kent mínimamente procesado. *Pueblo Continente*, *22*(2), 385–403. http://journal.upao.edu.pe/PuebloContinente/article/view/432

Márquez-Villacorta, L., & Pretell-Vásquez, C. P. (2013). Irradiación UV-C en frutas tropicales mínimamente procesadas. *Scientia Agropecuaria*, *4*(3), 147–161. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=357633706001

Martínez-Hernández, G. B., Artés-Hernández, F., Gómez, P. A., Formica, A. C., & Artés, F. (2013). Combination of electrolysed water, UV-C and superatmospheric O_2 packaging for improving fresh-cut broccoli quality. *Postharvest Biology and Technology*, *76*, 125–134. https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2012.09.013

Michailidis, M., Karagiannis, E., Polychroniadou, C., Tanou, G., Karamanoli, K., & Molassiotis, A. (2019). Metabolic features underlying the response of sweet cherry fruit to postharvest UV-C irradiation. *Plant Physiology and Biochemistry*, *144*, 49–57. https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2019.09.030

Millán-Villarroel, D., Romero-González, L., Brito, M., & Ramos-Villarroel, A. Y. (2015). Luz ultravioleta: inactivación microbiana en frutas. *Saber*, *27*(3), 454–469. http://www.ojs.udo.edu.ve/index.php/saber/article/view/1897

Ministerio de Salud y Protección Social. (2013). *Resolución 3929 de 2013*. https://www.invima.gov.co/images/pdf/normatividad/alimentos/resoluciones/resoluciones/2013/Resolucion-3929-2013.pdf

Mohamed, N. T. S., Ding, P., Kadir, J., & Ghazali, H. M. (2017). Potential of UVC germicidal

irradiation in suppressing crown rot disease, retaining postharvest quality and antioxidant capacity of Musa AAA “Berangan” during fruit ripening. *Food Science & Nutrition*, *5*, 967–980. https://doi.org/10.1002/FSN3.482

Moharram, H. A., & Youssef, M. M. (2014). Methods for determining the antioxidant activity: A review. *Alexandria Journal of Food Science and Technology*, *11*(1), 31–42.

Morales, M., Soledad Hernández-, M., Cabezas, M., Barrera, J., & Martínez, O. (2001). Caracterización de la maduración del fruto de pina nativa (*Ananas comosus* L. Merrill) CV. India. *Agronomía Colombiana*, *18*(1–3), 63–69. https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/21706

Moreno, B. L., & Deaquiz-Oyola, Y. A. (2015). Caracterización de parámetros fisicoquímicos en frutos de mora (Rubus alpinus Macfad). *Acta Agronómica*, *65*(2), 130–136. https://doi.org/10.15446/acag.v65n2.45587

Muoki, P. N., Makokha, A. O., Onyango, C. A., & Ojijo, N. K. O. (2009). Potential contribution of mangoes to reduction of vitamin A deficiency in Kenya. *Ecology of Food and Nutrition*, *48*(6), 482–498. https://doi.org/10.1080/03670240903308604

Ntsoane, M. L., Zude-Sasse, M., Mahajan, P., & Sivakumar, D. (2019). Quality assesment and postharvest technology of mango: A review of its current status and future perspectives. *Scientia Horticulturae*, *249*, 77–85. https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2019.01.033

Ordoñez-Santos, L. E., Martínez-Girón, J., Villamizar-Vargas, R. H., & Villamizar-Vargas, R. H. (2018). Encapsulation of β-carotene extracted from peach palm residues: a stability study using two spray-dried processes. *DYNA*, *85*(206), 128–134. https://doi.org/10.15446/dyna.v85n206.68089

Ortega, V. G., Ramírez, J. A., Velázquez, G., Tovar, B., Mata, M., & Montalvo, E. (2013). Effect of high hydrostatic pressure on antioxidant content of “Ataulfo” mango during postharvest maturation. *Food Science and Technology*, *33*(3), 561–568. https://doi.org/10.1590/S0101-20612013005000062

Ostos, S. L., Díaz, A. C., & Suarez, H. (2012). Evaluación de diferentes condiciones de proceso en la fortificación de mango (Tommy Atkins) con calcio mediante impregnación a vacío. *Revista Chilena de Nutrición*, *39*(2), 181–190. https://doi.org/10.4067/S0717-75182012000200007

Pan, Y.-G., & Zu, H. (2012). Effect of UV-C Radiation on the Quality of Fresh-cut Pineapples. *Procedia Engineering*, *37*, 113–119. https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2012.04.212

Pataro, G., Sinik, M., Capitoli, M. M., Donsì, G., & Ferrari, G. (2015). The influence of post-harvest UV-C and pulsed light treatments on quality and antioxidant properties of tomato fruits during storage. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *30*, 103–111. https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2015.06.003

Pathare, P. B., Opara, U. L., & Al-Said, F. A.-J. (2013). Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: A review. *Food and Bioprocess Technology*, *6*(1), 36–60. https://doi.org/10.1007/s11947-012-0867-9

Pérez-Gálvez, A., Viera, I., & Roca, M. (2020). Carotenoids and chlorophylls as antioxidants. *Antioxidants*, *9*(6), 1–39. https://doi.org/10.3390/ANTIOX9060505

Pérez-Pérez, E. P., & López-Malo, A. (2011). Tecnologías involucradas en el procesamiento mínimo de frutas y hortalizas. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, *5*(2), 13–27. https://www.udlap.mx/WP/tsia/files/No5-Vol-2/TSIA-5(2)-Pérez-Perez-et-al-2011.pdf

Pérez-Perez, L. M., Del-Toro-Sánchez, C. L., Sánchez-Chavez, E., González-Vega, R. I., Reyes-Díaz, A., Borboa-Flores, J., Soto-Parra, J. M., & Flores-Cordova, M. A. (2020). Bioaccesibilidad de compuestos antioxidantes de diferentes variedades de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en México, mediante un sistema gastrointestinal in vitro. *Biotecnia*, *22*(1), 117–125. https://doi.org/10.18633/BIOTECNIA.V22I1.1159

Pinela, J., & Ferreira, I. C. F. R. (2017). Nonthermal physical technologies to decontaminate and extend the shelf-life of fruits and vegetables: Trends aiming at quality and safety. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(10), 2095–2111. https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1046547

Pinzón, I. M. del P., Fischer, G., & Corredor, G. (2007). Determinación de los estados de madurez del fruto de la gulupa (*Passiflora edulis* Sims.). *Agronomía Colombiana*, *25*(1), 83–95. http://www.scielo.org.co/pdf/agc/v25n1/v25n1a10.pdf

Prajapati, U., Asrey, R., Varghese, E., Singh, A. K., & Pal Singh, M. (2021). Effects of postharvest ultraviolet-C treatment on shelf-life and quality of bitter gourd fruit during storage. *Food Packaging and Shelf Life*, *28*, 100665. https://doi.org/10.1016/J.FPSL.2021.100665

Pretell-Vásquez, C., Márquez-Villacorta, L., Siche, R., & Hayayumi-Valdivia, M. (2020). Efecto del ozono y tiempo de almacenamiento sobre las características fisicoquímicas de espárrago verde (*Asparagus officinalis* L.) mínimamente procesado. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, *21*(3), 2–16.

https://doi.org/10.21930/RCTA.VOL21_NUM3_ART:1506

Pristijono, P., Golding, J. B., & Bowyer, M. C. (2019). Postharvest UV-C treatment, followed by storage in a continuous low-level ethylene atmosphere, maintains the quality of 'Kensington pride' mango fruit stored at 20 °C. *Horticulturae*, *5*(1), 1–12. https://doi.org/10.3390/horticulturae5010001

Quintero-Cerón, J. P., Bohorquez-Pérez, Y., Valenzuela-Real, C., & Solanilla-Duque, J. F. (2013). Avances en la aplicación de luz ultravioleta de onda corta (UVC) en frutas y vegetales enteros y mínimamente procesados: revisión. *Revista Tumbaga*, *1*(8), 29–60. http://revistas.ut.edu.co/index.php/tumbaga/article/view/294/349

Ramírez-Méndez, R., Quijada, O., Castellano, G., Burgos, M. E., Camacho, R., & Marin R., C. (2010). Características físicas y químicas de frutos de trece cultivares de mango (*Mangifera indica* L) en el municipio Mara en la planicie de Maracaibo. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, *10*(2), 65–72. http://www.redalyc.org/html/813/81315091002/

Rangel-Marrón, M., & López-Malo, A. (2012). Cambios en frutas tropicales frescas, cortadas y empacadas en atmósfera modificada durante su almacenamiento en refrigeración. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, *6*(2), 94–109. http://web.udlap.mx/tsia/files/2013/12/TSIA-62Rangel-Marron-et-al-2012.pdf

Rani, K., Manasa, C. B., Jagadeesh, S., & Thammaiah, N. (2019). Colour measurement of ripening mango fruits as influenced by pre-harvest treatments using L* a* b* coordinates. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, *8*(1), 2466–2470.

Razali, Z., Somasundram, C., Nurulain, S. Z., Kunasekaran, W., & Alias, M. R. (2021). Postharvest quality of cherry tomatoes coated with mucilage from dragon fruit and irradiated with UV-C. *Polymers*, *13*(17), 2919. https://doi.org/10.3390/POLYM13172919

Rivera-Pastrana, D. M., Gardea, A. A., Yahia, E. M., Martínez-Téllez, M. A., & González-Aguilar, G. A. (2014). Effect of UV-C irradiation and low temperature storage on bioactive compounds, antioxidant enzymes and radical scavenging activity of papaya fruit. *Journal of Food Science and Technology*, *51*(12), 3821–3829. https://doi.org/10.1007/S13197-013-0942-X

Robles-Sánchez, R. M., Rojas-Graü, M. A., Odriozola-Serrano, I., González-Aguilar, G. A., & Martín-Belloso, O. (2009). Effect of minimal processing on bioactive compounds and antioxidant activity of fresh-cut 'Kent' mango (*Mangifera indica* L.). *Postharvest Biology and Technology*, *51*(3), 384–390.

https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2008.09.003

Rodriguez-Amaya, D. B. (2019). Update on natural food pigments - A mini-review on carotenoids, anthocyanins, and betalains. *Food Research International*, *124*, 200–205. https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2018.05.028

Rodríguez-Mijangos, R., Gonzalez-Boué, G., Barffuson-Dominguez, F., López-Vargas, J. M., & Gómez-Yépiz, M. S. (2014). Cámara de irradiación UV-C económica y sus potenciales aplicaciones en la desinfección de alimentos. *EPISTEMUS*, *16*, 72–78. https://biblat.unam.mx/hevila/EpistemusCienciatecnologiaysalud/2014/no16/10.pdf

Romero, L., Colivet, J., Aron, N. M., & Ramos-Villarroel, A. (2017). Impact of ultraviolet light on quality attributes of stored fresh-cut mango. *The Annals of the University Dunarea de Jos of Galati Fascicle VI – Food Technology*, *41*(1), 62–80. http://eds.a.ebscohost.com/eds/detail/detail?vid=0&sid=7221daa0-c4ff-44c6-aa97-f4f0446caa61%40sessionmgr4008&bdata=Jmxhbmc9ZXMmc2l0ZT1lZHMtbGl2ZQ%3D%3D#AN=125098472&db=fsr

Rosalie, R., Léchaudel, M., Dhuique-Mayer, C., Dufossé, L., & Joas, J. (2018). Antioxidant and enzymatic responses to oxidative stress induced by cold temperature storage and ripening in mango (*Mangifera indica* L. cv. ‘Cogshall’) in relation to carotenoid content. *Journal of Plant Physiology*, *224–225*, 75–85. https://doi.org/10.1016/J.JPLPH.2018.03.011

Ruelas-Chacón, X., De La, M., Reyes-Vega, L., Valdivia-Urdiales, B., Carlos Contreras-Esquivel, J., César Montañez-Saenz, J., Aguilera-Carbó, A. F., & Darío Peralta-Rodríguez, R. (2013). Conservación de Frutas y Hortalizas Frescas y Mínimamente Procesadas con Recubrimientos Comestibles. *Revista Científica de La Universidad Autónoma de Coahuila*, *5*(9), 31–37.

Ruiz-Cruz, S., Alvarez-Parrilla, E., de la Rosa, L. A., Martinez-Gonzalez, A. I., de Jesus Ornelas-Paz, J., Mendoza-Wilson, A. M., & Gonzalez-Aguilar, G. A. (2010). Effect of different sanitizers on microbial, sensory and nutritional quality of fresh-cut jalapeno peppers. *American Journal of Agricultural and Biological Science*, *5*(3), 331–341. https://doi.org/10.3844/ajabssp.2010.331.341

Rybak, K., Wiktor, A., Pobiega, K., Witrowa-Rajchert, D., & Nowacka, M. (2021). Impact of pulsed light treatment on the quality properties and microbiological aspects of red bell pepper fresh-cuts. *LWT*, *149*, 111906. https://doi.org/10.1016/J.LWT.2021.111906

Saini, R. K., & Keum, Y. S. (2018). Significance of genetic, environmental, and pre- and

postharvest factors affecting carotenoid contents in crops: A review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *66*(21), 5310–5325. https://doi.org/10.1021/ACS.JAFC.8B01613/ASSET/IMAGES/ACS.JAFC.8B01613.SOCIAL.JPEG_V03

Salinas-Roca, B., Guerreiro, A., Welti-Chanes, J., Antunes, M. D. C., & Martín-Belloso, O. (2018). Improving quality of fresh-cut mango using polysaccharide-based edible coatings. *International Journal of Food Science & Technology*, *53*(4), 938–945. https://doi.org/10.1111/IJFS.13666

Santo, D., Graça, A., Nunes, C., & Quintas, C. (2018). *Escherichia coli and Cronobacter sakazakii* in 'Tommy Atkins' minimally processed mangos: Survival, growth and effect of UV-C and electrolyzed water. *Food Microbiology*, *70*, 49–54. https://doi.org/10.1016/j.fm.2017.09.008

Sgroppo, S. C., & Sosa, C. A. (2009). Zapallo anco (*Cucurbita moschata* D.) fresco cortado tratado con luz UV-C. *FACENA*, *25*, 7–19. https://revistas.unne.edu.ar/index.php/fce/article/view/5474

Shehata, S. A., Abdeldaym, E. A., Ali, M. R., Mohamed, R. M., Bob, R. I., & Abdelgawad, K. F. (2020). Effect of some citrus essential oils on post-harvest shelf life and physicochemical quality of strawberries during cold storage. *Agronomy, 10*(10), 1466. https://doi.org/10.3390/AGRONOMY10101466

Shen, Y., Sun, Y., Qiao, L., Chen, J., Liu, D., & Ye, X. (2013). Effect of UV-C treatments on phenolic compounds and antioxidant capacity of minimally processed Satsuma mandarin during refrigerated storage. *Postharvest Biology and Technology*, *76*, 50–57. https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2012.09.006

Silveira, A. C., Conesa, A., Aguayo, E., & Artés, F. (2008). alternative sanitizers to chlorine for use on fresh-cut "Galia" (*Cucumis melo* var. catalupensis) melon. *Journal of Food Science*, *73*(9), M405–M411. https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2008.00939.x

Taze, B. H., & Unluturk, S. (2018). Effect of postharvest UV-C treatment on the microbial quality of 'Şalak' apricot. *Scientia Horticulturae*, *233*, 370–377. https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2018.02.012

van Boekel, M. A. J. S. (2002). On the use of the Weibull model to describe thermal inactivation of microbial vegetative cells. *International Journal of Food Microbiology*, *74*(1–2), 139–159. https://doi.org/10.1016/S0168-1605(01)00742-5

Velderrain-Rodríguez, G. R., Salmerón-Ruiz, M. L., González-Aguilar, G. A., Martín-Belloso, O., & Soliva-Fortuny, R. (2021). Ultraviolet/visible intense pulsed light

irradiation of fresh-cut avocado enhances its phytochemicals content and preserves quality attributes. *Journal of Food Processing and Preservation*, *45*(3), e15289. https://doi.org/10.1111/JFPP.15289

Xiang, Q., Fan, L., Zhang, R., Ma, Y., Liu, S., & Bai, Y. (2020). Effect of UVC light-emitting diodes on apple juice: Inactivation of *Zygosaccharomyces rouxii* and determination of quality. *Food Control*, *111*, 107082. https://doi.org/10.1016/J.FOODCONT.2019.107082

Zafar, T. A., & Sidhu, J. S. (2017). Composition and nutritional properties of mangoes. In M. Siddiq, J. K. Brecht, & J. S. Sidhu (Eds.), *Handbook of mango Fruit: Production, postharvest science, processing technology and nutrition* (pp. 217–236). Wiley-Blackwell.

Zambrano-Zaragoza, M. L., Quintanar-Guerrero, D., González-Reza, R. M., Cornejo-Villegas, M. A., Leyva-Gómez, G., & Urbán-Morlán, Z. (2021). Effects of UV-C and edible nano-coating as a combined strategy to preserve fresh-cut cucumber. *Polymers*, *13*(21), 3705. https://doi.org/10.3390/POLYM13213705

Zambrano, J., Valera, A., Maffei, M., Materano, W., Quintero, I., & Graterol, K. (2017). Efecto de un recubrimiento comestible formulado con mucílago del cactus (*Opuntia elatior* Mill.) sobre la calidad de frutos de piña mínimamente procesados. *Bioagro*, *29*(2), 129–136. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612017000200007&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Zeng, J. K., Jiang, Z. T., Li, W., Zhang, L. B., & Shao, Y. Z. (2020). Effects of UV-C irradiation on postharvest quality and antioxidant properties of wampee fruit [*Clausena lansium* [Lour.) Skeels) during cold storage. *Fruits*, *75*(1), 36–43. https://doi.org/10.17660/TH2020/75.1.4

Anexo A: Análisis de varianza de dos vías para evaluar el efecto de los tratamientos de desinfección y el tiempo de almacenamiento en los análisis experimentales

Tabla A-11: Análisis de varianza de dos vías para pH.

Factor	GL	Adj SC	Adj CM	Valor F	Valor p
Modelo	14	1,151	0,082	23,42	0,000***
A-Tratamiento de desinfección	2	0,022	0,011	3,15	0,057
B-Tiempo de almacenamiento	4	0,274	0,068	19,50	0,000***
AB	8	0,855	0,107	30,45	0,000***
Error	30	0,105	0,004		

*=p<0,05, **=p<0,01 y ***=p<0,001

Tabla A-22: Análisis de varianza de dos vías para sólidos solubles.

Factor	GL	Adj SC	Adj CM	Valor F	Valor p
Modelo	14	100,510	7,179	97,31	0,000***
A-Tratamiento de desinfección	2	33,080	16,540	224,19	0,000***
B-Tiempo de almacenamiento	4	11,123	2,781	37,69	0,000***
AB	8	56,306	7,038	95,40	0,000***
Error	30	2,213	0,074		

*=p<0,05, **=p<0,01 y ***=p<0,001

Tabla A-33: Análisis de varianza de dos vías para acidez titulable.

Factor	GL	Adj SC	Adj CM	Valor F	Valor p
Modelo	14	0,856	0,061	81,07	0,000***
A-Tratamiento de desinfección	2	0,013	0,007	8,84	0,000***
B-Tiempo de almacenamiento	4	0,807	0,202	267,43	0,000***
AB	8	0,036	0,004	5,95	0,000***
Error	30	0,023	0,001		

*=p<0,05, **=p<0,01 y ***=p<0,001

Tabla A-44: Análisis de varianza de dos vías para índice de maduración.

Factor	GL	Adj SC	Adj CM	Valor F	Valor p
Modelo	14	1221,77	87,270	116,47	0,000***
A-Tratamiento de desinfección	2	16,21	8,104	10,82	0,000***
B-Tiempo de almacenamiento	4	1121,81	280,453	374,29	0,000***
AB	8	83,76	10,469	13,97	0,000***
Error	30	22,48	0,749		

*=p<0,05, **=p<0,01 y ***=p<0,001

Tabla A-55: Análisis de varianza de dos vías para firmeza.

Factor	GL	Adj SC	Adj CM	Valor F	Valor p
Modelo	14	78,94	5,639	10,12	0,000***
A-Tratamiento de desinfección	2	12,15	6,076	10,90	0,000***
B-Tiempo de almacenamiento	4	56,13	14,032	25,18	0,000***
AB	8	10,66	1,333	2,39	0,040*
Error	30	16,72	0,557		

*=p<0,05, **=p<0,01 y ***=p<0,001

Tabla A-66: Análisis de varianza de dos vías para L*.

Factor	GL	Adj SC	Adj CM	Valor F	Valor p
Modelo	14	155,158	11,083	31,38	0,000***
A-Tratamiento de desinfección	2	6,986	3,493	9,89	0,001**
B-Tiempo de almacenamiento	4	19,266	4,817	13,64	0,000***
AB	8	128,907	16,113	45,63	0,000***
Error	30	10,594	0,353		

*=p<0,05, **=p<0,01 y ***=p<0,001

Tabla A-77: Análisis de varianza de dos vías para a*.

Factor	GL	Adj SC	Adj CM	Valor F	Valor p
Modelo	14	279,642	19,974	207,33	0,000***
A-Tratamiento de desinfección	2	101,054	50,527	524,45	0,000***
B-Tiempo de almacenamiento	4	92,144	23,036	239,11	0,000***
AB	8	86,444	10,806	112,16	0,000***
Error	30	2,890	0,096		

*=p<0,05, **=p<0,01 y ***=p<0,001

Tabla A-88: Análisis de varianza de dos vías para b*.

Factor	GL	Adj SC	Adj CM	Valor F	Valor p
Modelo	14	1322,38	94,455	47,37	0,000***
A-Tratamiento de desinfección	2	422,96	211,481	106,05	0,000***
B-Tiempo de almacenamiento	4	663,55	165,888	83,19	0,000***
AB	8	235,86	29,483	14,78	0,000***
Error	30	59,82	1,994		

*=p<0,05, **=p<0,01 y ***=p<0,001

Tabla A-99: Análisis de varianza de dos vías para C*.

Factor	GL	Adj SC	Adj CM	Valor F	Valor p
Modelo	14	1436,85	102,632	50,73	0,000***
A-Tratamiento de desinfección	2	468,01	234,003	115,68	0,000***
B-Tiempo de almacenamiento	4	708,20	177,049	87,52	0,000***
AB	8	260,65	32,581	16,11	0,000***
Error	30	60,69	2,023		

*=p<0,05, **=p<0,01 y ***=p<0,001

Tabla A-1010: Análisis de varianza de dos vías para h*.

Factor	GL	Adj SC	Adj CM	Valor F	Valor p
Modelo	14	134,295	9,593	141,74	0,000***
A-Tratamiento de desinfección	2	43,535	21,768	321,64	0,000***
B-Tiempo de almacenamiento	4	43,443	10,861	160,48	0,000***
AB	8	47,316	5,915	87,39	0,000***
Error	30	2,030	0,068		

*=p<0,05, **=p<0,01 y ***=p<0,001

Tabla A-1111: Análisis de varianza de dos vías para mesófilos.

Factor	GL	Adj SC	Adj CM	Valor F	Valor p
Modelo	14	7,950	0,568	59,26	0,000***
A-Tratamiento de desinfección	2	0,512	0,256	26,70	0,000***
B-Tiempo de almacenamiento	4	6,873	1,718	179,35	0,000***
AB	8	0,564	0,071	7,36	0,000***
Error	30	0,287	0,010		

*=p<0,05, **=p<0,01 y ***=p<0,001

Tabla A-1212: Análisis de varianza de dos vías para coliformes totales.

Factor	GL	Adj SC	Adj CM	Valor F	Valor p
Modelo	14	11,471	0,819	24,10	0,000***
A-Tratamiento de desinfección	2	0,436	0,218	6,41	0,005**
B-Tiempo de almacenamiento	4	10,738	2,685	78,97	0,000***
AB	8	0,605	0,076	2,25	0,397
Error	30	1,020	0,034		

*=p<0,05, **=p<0,01 y ***=p<0,001

Tabla A-1313: Análisis de varianza de dos vías para mohos y levaduras.

Factor	GL	Adj SC	Adj CM	Valor F	Valor p
Modelo	14	2,094	0,150	12,92	0,000***
A-Tratamiento de desinfección	2	0,671	0,335	28,96	0,000***
B-Tiempo de almacenamiento	4	1,143	0,286	24,68	0,000***
AB	8	0,280	0,035	3,02	0,013*
Error	30	0,347	0,012		

*=p<0,05, **=p<0,01 y ***=p<0,001

Tabla A-1414: Análisis de varianza de dos vías para psicrófilos.

Factor	GL	Adj SC	Adj CM	Valor F	Valor p
Modelo	14	8,368	0,598	95,03	0,000***
A-Tratamiento de desinfección	2	0,422	0,211	33,58	0,000***
B-Tiempo de almacenamiento	4	7,775	1,944	309,06	0,000***
AB	8	0,170	0,021	3,38	0,007**
Error	30	0,189	0,006		

*=p<0,05, **=p<0,01 y ***=p<0,001

Tabla A-1515: Análisis de varianza de dos vías para carotenoides totales.

Factor	GL	Adj SC	Adj CM	Valor F	Valor p
Modelo	14	2959,54	211,40	189,11	0,000***
A-Tratamiento de desinfección	2	392,86	196,428	175,72	0,000***
B-Tiempo de almacenamiento	4	1585,34	396,335	354,55	0,000***
AB	8	981,34	122,668	109,73	0,000***
Error	30	33,54	1,118		

*=p<0,05, **=p<0,01 y ***=p<0,001

Tabla A-1616: Análisis de varianza de dos vías para fenoles totales.

Factor	GL	Adj SC	Adj CM	Valor F	Valor p
Modelo	14	3194,9	228,21	3,90	0,001**
A-Tratamiento de desinfección	2	1144,7	572,33	9,79	0,001**
B-Tiempo de almacenamiento	4	648,8	162,20	2,77	0,045*
AB	8	1401,4	175,18	3,00	0,014*
Error	30	1754,0	58,47		

*=p<0,05, **=p<0,01 y ***=p<0,001

Tabla A-1717: Análisis de varianza de dos vías para flavonoides.

Factor	GL	Adj SC	Adj CM	Valor F	Valor p
Modelo	14	2,231	0,159	21,38	0,000***
A-Tratamiento de desinfección	2	0,354	0,177	23,76	0,000***
B-Tiempo de almacenamiento	4	0,904	0,226	30,32	0,000***
AB	8	0,973	0,122	16l31	0,000***
Error	30	0,224	0,007		

*=p<0,05, **=p<0,01 y ***=p<0,001

Tabla A-1818: Análisis de varianza de dos vías para capacidad antioxidante por DPPH.

Factor	GL	Adj SC	Adj CM	Valor F	Valor p
Modelo	14	0,486	0,035	8,92	0,000***
A-Tratamiento de desinfección	2	0,205	0,102	26,34	0,000***
B-Tiempo de almacenamiento	4	0,009	0,002	0,58	0,683
AB	8	0,272	0,034	8,73	0,000***
Error	30	0,117	0,004		

*=p<0,05, **=p<0,01 y ***=p<0,001

Tabla A-1919: Análisis de varianza de dos vías para capacidad antioxidante por ABTS.

Factor	GL	Adj SC	Adj CM	Valor F	Valor p
Modelo	14	0,068	0,005	9,77	0,000***
A-Tratamiento de desinfección	2	0,005	0,002	4,60	0,018*
B-Tiempo de almacenamiento	4	0,029	0,007	14,48	0,000***
AB	8	0,035	0,004	8,71	0,000***
Error	30	0,015	0,000		

*=p<0,05, **=p<0,01 y ***=p<0,001

Tabla A-2020: Análisis de varianza de dos vías para capacidad antioxidante por FRAP.

Factor	GL	Adj SC	Adj CM	Valor F	Valor p
Modelo	14	0,109	0,008	21,62	0,000***
A-Tratamiento de desinfección	2	0,018	0,009	25,14	0,000***
B-Tiempo de almacenamiento	4	0,075	0,019	52,13	0,000***
AB	8	0,016	0,002	5,48	0,000***
Error	30	0,011	0,000		

*=p<0,05, **=p<0,01 y ***=p<0,001

Anexo B: Análisis de vida útil sensorial

Tabla B-11: Análisis de varianza de dos vías para grado de satisfacción.

Factor	GL	Adj SC	Adj CM	Valor F	Valor p
A-Tratamiento de desinfección	4	292,6	73,156	28,09	0,000***
B-Tiempo de almacenamiento	3	385,7	128,553	49,37	0,000***
AB	12	228,6	19,051	7,32	0,000***
Error	580	1510,3	2,604		

*=p<0,05, **=p<0,01 y ***=p<0,001

Figura B-1: Prueba de bondad de ajuste Anderson-Darling para los datos de la función de riesgo acumulado obtenidos a partir de las calificaciones del mango mínimamente procesado del tratamiento C almacenado en refrigeración por 12 días.

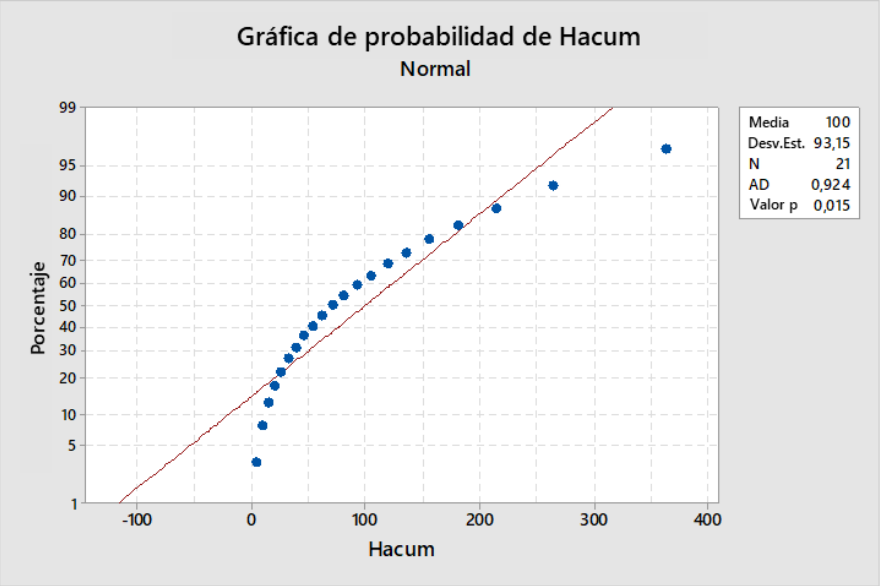


Figura B-2: . Regresión exponencial de la distribución de Weibull para el análisis de vida útil sensorial del mango mínimamente procesado del tratamiento C.

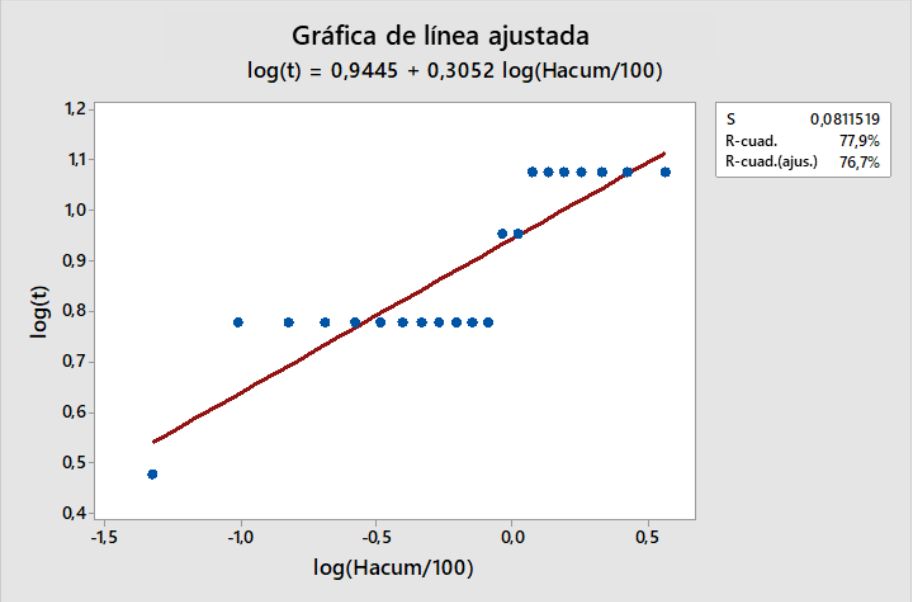


Figura B-3: Prueba de bondad de ajuste Anderson-Darling para los datos de la función de riesgo acumulado obtenidos a partir de las calificaciones del mango mínimamente procesado del tratamiento H almacenado en refrigeración por 12 días.

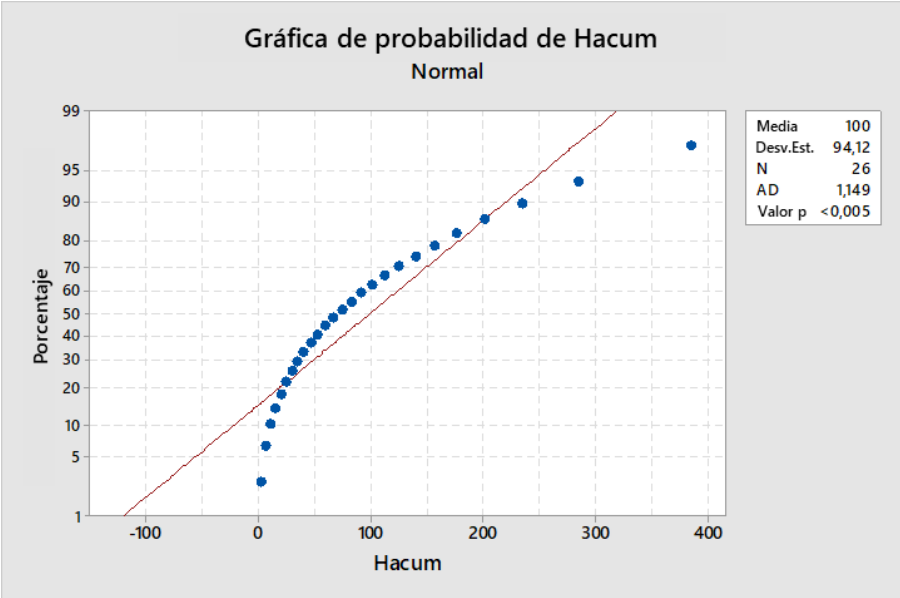


Figura B-4: . Regresión exponencial de la distribución de Weibull para el análisis de vida útil sensorial del mango mínimamente procesado del tratamiento H.

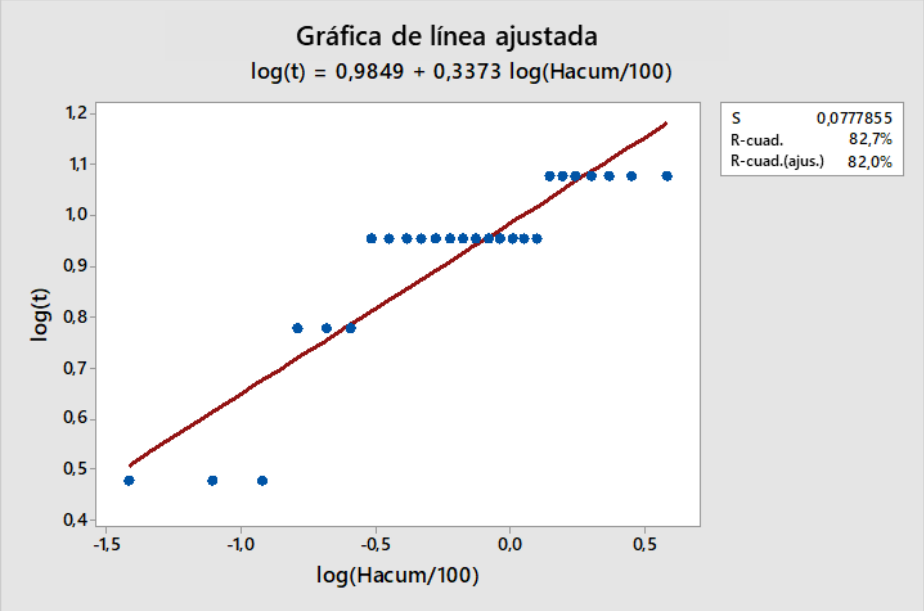


Figura B-5: Prueba de bondad de ajuste Anderson-Darling para los datos de la función de riesgo acumulado obtenidos a partir de las calificaciones del mango mínimamente procesado del tratamiento UV almacenado en refrigeración por 12 días.

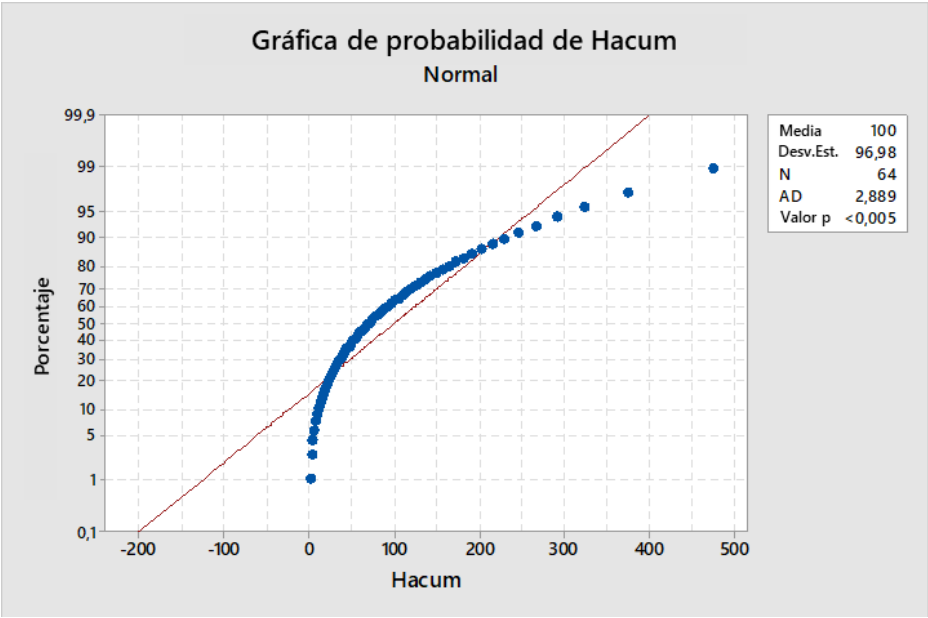
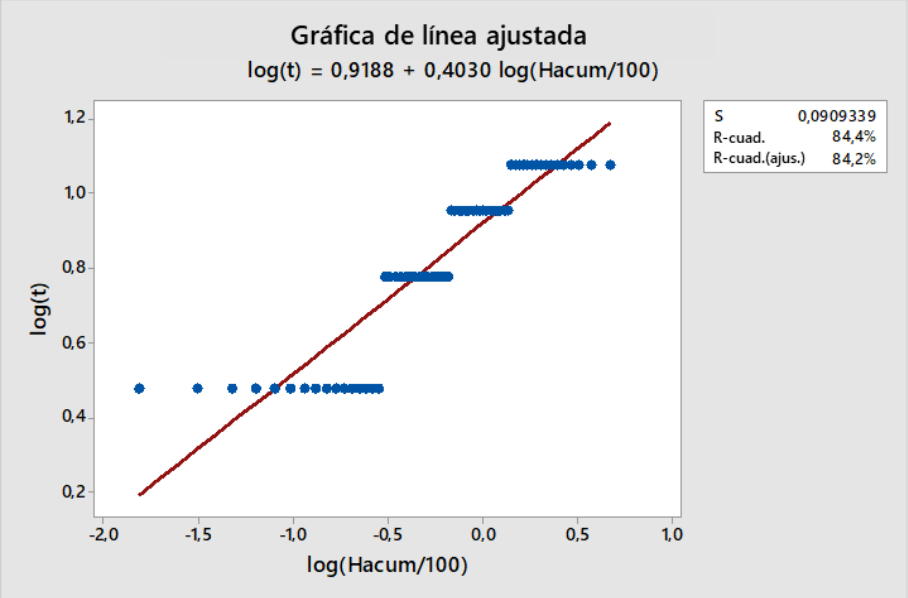


Figura B-6: . Regresión exponencial de la distribución de Weibull para el análisis de vida útil sensorial del mango mínimamente procesado del tratamiento UV.



Referencias

Abdel-Fattah, A. ., Hegazy, E. A., & Ezz El-Din, H. (2000). Thymol-blue dyed poly(vinyl butyral) films for monitoring ultraviolet radiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, *137*(1), 37–43. https://doi.org/10.1016/S1010-6030(00)00355-5

Adhikari, A., Syamaladevi, R. M., Killinger, K., & Sablani, S. S. (2015). Ultraviolet-C light inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes* on organic fruit surfaces. *International Journal of Food Microbiology*, *210*, 136–142. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2015.06.018

Agronet. (2018). *CORPOICA identifica los mejores mangos criollos para mercado interno y exportación*. http://www.agronet.gov.co/Noticias/Paginas/Noticia171.aspx

Alfano, O. M., Romero, R. L., & Cassano, A. E. (1986). Radiation field modelling in photoreactors-I. homogeneous media. *Chemical Engineering Science*, *41*(3), 421–444. https://doi.org/10.1016/0009-2509(86)87025-7

Ali, A., Yeoh, W. K., Forney, C., & Siddiqui, M. W. (2018). Advances in postharvest technologies to extend the storage life of minimally processed fruits and vegetables. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *58*(15), 2632–2649. https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1339180

Allende, A., Tomás-Barberán, F. A., & Gil, M. I. (2006). Minimal processing for healthy traditional foods. *Trends in Food Science & Technology*, *17*(9), 513–519. https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2006.04.005

Almeida-Miguel, A. C., Durigan, J. F., Marques, K. M., Ascari-Morgado, C. M., & Ferraudo, A. S. (2016). Prevention of chilling injury in “Tommy Atkins” mangoes previously stored at 5 °C, using heat tratment and radiation UV (UV-C). *Revista Brasileira de Fruticultura*, *38*(1), 53–63. https://doi.org/10.1590/0100-2945-123/14

Alothman, M., Bhat, R., & Karim, A. A. (2009). UV radiation-induced changes of antioxidant

capacity of fresh-cut tropical fruits. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *10*(4), 512–516. https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2009.03.004

Anandharamakrishnan, C. (2013). *Computational fluid dynamics applications in food processing*. Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7990-1_1

ANSYS Inc. (2006). *8.8.3 Refractive index*. https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/node359.htm

ANSYS Inc. (2009a). *5.3.2 Radiative transfer equation*. https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node111.htm

ANSYS Inc. (2009b). *5.3.6 Discrete ordinates (DO) radiation model theory*. http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node115.htm

AOAC International. (2012). *Official Methods of Analysis of AOAC International* (G. W. Latimer (Ed.); 19th Edition). AOAC International.

Ares, G., Giménez, A., & Gámbaro, A. (2008). Sensory shelf life estimation of minimally processed lettuce considering two stages of consumers’ decision-making process. *Appetite*, *50*(2–3), 529–535. https://doi.org/10.1016/J.APPET.2007.11.002

Artés-Hernández, F., Escalona, V. H., Robles, P. A., Martínez-Hernández, G. B., & Artés, F. (2009). Effect of UV-C radiation on quality of minimally processed spinach leaves. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *89*(3), 414–421. https://doi.org/10.1002/JSFA.3460

Artés-Hernández, F., Martínez-Hernández, G. B., Aguayo, E., Gómez, P. A., & Artés, F. (2017). Fresh-cut fruit and vegetables: Emerging eco-friendly techniques for sanitation and preserving safety. In I. Kahramanoglu (Ed.), *Postharvest handling*. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.69476

Artés-Hernández, F., Robles, P. A., Gómez, P. A., Tomás-Callejas, A., Artés, F., & Martínez-Hernández, G. B. (2021). Quality changes of fresh-cut watermelon during storage as affected by cut intensity and UV-C pre-treatment. *Food and Bioprocess Technology*, *14*(3), 505–517. https://doi.org/10.1007/S11947-021-02587-1/TABLES/2

Artés, F., & Allende, A. (2015). Minimal processing of fresh fruit, vegetables, and juices. In D. W. Sun (Ed.), *Emerging technologies for food processing* (pp. 583–597). Academic Press.

Artés, Francisco, & Allende, A. (2014). Minimal processing of fresh fruit, vegetables, and juices. In D.-W. Sun (Ed.), *Emerging technologies for food processing* (Second

Edition, pp. 583–597). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-411479-1.00031-0

Aryal, s., baniya, m. k., danekhu, k., kunwar, p., gurung, r., & koirala, n. (2019). total phenolic content, flavonoid content and antioxidant potential of wild vegetables from Western Nepal. *Plants*, *8*(4). https://doi.org/10.3390/PLANTS8040096

Asohofrucol. (2016a). *Información Hortofrutícola*. http://www.asohofrucol.com.co/interna.php?cat=3&scat=45&act=1

Asohofrucol. (2016b). *Principales líneas productivas 2016*. http://www.asohofrucol.com.co/imagenes/Principales_lineas_productivas_2016.pdf

Atilgan, M. R., Yildiz, S., Kaya, Z., & Unluturk, S. (2021). Kinetic and process modeling of uv-c irradiation of foods. In K. Knoerzer & K. Muthukumarappan (Eds.), *Innovative food processing technologies: A Comprehensive Review* (Vol. 2, pp. 227–255). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.22972-7

Azeredo, H. M. C. de. (2004). *Fundamentos de estabilidade de alimentos*. Embrapa Agroindústria Tropical.

Bachmann, R. (1978). *Apparatus for automatic low-bacteria to aseptic filling and packing of foodstuffs* (Patent No. 4,121,107). Oblon, Fisher, Spivak, McClelland & Maier. https://patentimages.storage.googleapis.com/1b/fa/e9/22350344d707cf/US4121107.pdf

Bachmann, R., & Sturm, W. (1979). *Method for automatic low-bacteria to aseptic filling and packing of foodstuffs employing ultraviolet radiation* (Patent No. 4,175,140). Oblon, Fisher, Spivak, McClelland & Maier. https://patentimages.storage.googleapis.com/cd/25/70/bc4d84f94eac0c/US4175140.pdf

Baeza, A., Silveira, A. C., & Escalona, V. (2015). Empleo de radiación UV-C como método de desinfección para la elaboración de rúcula (*Eruca sativa* Mill.) mínimamente procesada. *Agrociencia (Uruguay)*, *19*(2), 26–35. http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2301-15482015000200004

Baka, M., Mercier, J., Corcuff, R., Castaigne, F., & Arul, J. (1999). Photochemical treatment to improve storability of fresh strawberries. *Journal of Food Science*, *64*(6), 1068–1072. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1999.tb12284.x

Balaguera-López, H. E., & Arévalo, A. H. (2012). Estudio de algunos cambios bioquímicos

durante el crecimiento y hasta la cosecha del fruto de champa (*Campomanesia lineatifolia* R. & P. familia myrtaceae). *Revista Brasileira de Fruticultura*, *34*(2), 460–468. https://doi.org/10.1590/S0100-29452012000200019

Barreto, C. F., Navroski, R., Duarte-Marques, L. O., dos Santos, R. F., Barbosa-Malgarim, M., & Martins, C. R. (2021). Influência da radiação ultravioleta e aditivos na conservação de kiwis minimamente processados. *Brazilian Journal of Food Technology*, *24*, e2020024. https://doi.org/10.1590/1981-6723.02420

Barreto, M., Castillo-Ruiz, M., & Retamal, P. (2016). *Salmonella enterica*: una revisión de la trilogía agente, hospedero y ambiente, y su trascendencia en Chile. *Revista Chilena de Infectología*, *33*(5), 547–557. https://doi.org/10.4067/S0716-10182016000500010

Beltrán, A., Ramos, M., & Alvarez, M. (2010). Estudio de la vida útil de fresas (Fragaria vesca) mediante tratamiento con radiación ultravioleta de onda corta (UV-C). *Revista Tecnológica ESPOL*, *23*(2), 17–24. http://www.rte.espol.edu.ec/index.php/tecnologica/article/view/51/22

Benjamin, B., Uba, A., Yusha’u, M., Maikaje, D. B., Nyakaat, N. N., & Daniel, A. M. (2018). Isolation of *Escheria Coli* from fruits and vegetables in Kaduna metropolis. *International Journal of Engineering Science and Computing*, *8*(7), 18598–18601. http://ijesc.org/upload/938bc913555306cae8ae43345c8c1f23.Isolation of Escheria Coli from Fruits and Vegetables in Kaduna Metropolis.pdf

Bevilacqua, A., Speranza, B., Sinigaglia, M., & Corbo, M. R. (2015). A focus on the death kinetics in predictive microbiology: benefits and limits of the most important models and some tools dealing with their application in foods. *Foods*, *4*(4), 565–580. https://doi.org/10.3390/foods4040565

Bhagat, B., & Chakraborty, S. (2022). Potential of pulsed light treatment to pasteurize pomegranate juice: Microbial safety, enzyme inactivation, and phytochemical retention. *LWT*, *159*, 113215. https://doi.org/10.1016/J.LWT.2022.113215

Brandl, M. T. (2006). Fitness of human enteric pathogens on plants and implications for food safety. *Annual Review of Phytopathology*, *44*, 367–392. https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.44.070505.143359

Buosi, D. T. M., de Moraes, J. O., Cheng, Y., Cheng, R. A., Moraru, C. I., & Carciofi, B. A. M. (2022). Effective pulsed light treatments for inactivating *Salmonella enterica* serotypes. *Food Control*, *135*, 108776.

https://doi.org/10.1016/J.FOODCONT.2021.108776

Butson, E. T., Cheung, T., Yu, P. K. N., & Butson, M. J. (2010). Measuring solar UV radiation with EBT radiochromic film. *Physics in Medicine and Biology*, *55*(20), N487–N493. https://doi.org/10.1088/0031-9155/55/20/N01

Butson, M. J., Yu, P. K. N., Cheung, T., & Metcalfe, P. (2003). Radiochromic film for medical radiation dosimetry. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, *41*(3–5), 61–120. https://doi.org/10.1016/S0927-796X(03)00034-2

Cao, M., Wang, D., Qiu, L., Ren, X., & Ma, H. (2021). Shelf life prediction of 'royal gala' apples based on quality attributes and storage temperature. *Horticultural Science and Technology*, *39*(3), 343–355. https://doi.org/10.7235/HORT.20210031

Cardelli, C., & Labuza, T. P. (2001). Application of Weibull hazard analysis to the determination of the shelf life of roasted and ground coffee. *LWT*, *34*(5), 273–278. https://doi.org/10.1006/FSTL.2000.0732

Castañeda-Ruelas, G., Eslava-Campos, C., Castro-del Campo, N., León-Félix, J., & Chaidez-Quiroz, C. (2014). Listeriosis en México: importancia clínica y epidemiológica. *Salud Pública de México*, *56*(6), 654–659. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0036-36342014000600016

Castillejo, N., Martínez-Zamora, L., & Artés-Hernández, F. (2022). Postharvest UV radiation enhanced biosynthesis of flavonoids and carotenes in bell peppers. *Postharvest Biology and Technology*, *184*, 111774. https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2021.111774

Chang, J. C. H., Ossoff, S. F., Lobe, D. C., Dorfman, M. H., Dumais, C. M., Qualls, R. G., & Johnson, J. D. (1985). UV inactivation of pathogenic and indicator microorganisms. *Applied and Environmental Microbiology*, *49*(6), 1361–1365.

Charles, F., Vidal, V., Olive, F., Filgueiras, H., & Sallanon, H. (2013). Pulsed light treatment as new method to maintain physical and nutritional quality of fresh-cut mangoes. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *18*, 190–195. https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2013.02.004

Chisari, M., Barbagallo, R. N., Spagna, G., & Artes, F. (2011). Improving the quality of fresh-cut melon through inactivation of degradative oxidase and pectinase enzymatic activities by UV-C treatment. *International Journal of Food Science & Technology*, *46*(3), 463–468. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2010.02466.x

Chlebicz, A., & Śliżewska, K. (2018). Campylobacteriosis, salmonellosis, yersiniosis, and listeriosis as zoonotic foodborne diseases: A review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *15*(5), 863. https://doi.org/10.3390/ijerph15050863

Chun, H. H., Kim, H. J., Won, M., Chung, K. S., & Song, K. Bin. (2010). A comparison of kinetic models of foodborne pathogen inactivation by aqueous chlorine dioxide, fumaric acid, and ultraviolet-C. *Journal of Applied Biological Chemistry*, *53*(2), 243–248. https://doi.org/10.3839/jksabc.2010.038

Coello-Torres, A., Fernández-Galván, D., & Galán-Saúco, V. (1997). *Guía Descriptiva de Cultivares de Mango* (P. y A. Consejería de Agricultura (Ed.)). Litografía Gráficas Sabater. https://www.icia.es/icia/download/fruticulturatropical/Guia descriptiva de cultivares de mango_optimized.pdf

Corpas-Iguarán, E. J., & Tapasco-Alzate, O. A. (2014). Hallazgos de la biosíntesis del etileno en frutas climatéricas y de los factores que afectan la ruta metabólica. *Alimentos Hoy*, *22*(31), 46–63. http://www.alimentoshoy.acta.org.co/index.php/hoy/article/view/255/239

Cossart, P., & Sansonetti, P. J. (2004). Bacterial invasion: The paradigms of enteroinvasive pathogens. *Science*, *304*(5668), 242–248. https://doi.org/10.1126/science.1090124

Costa, L., Vicente, A. R., Civello, P. M., Chaves, A. R., & Martínez, G. A. (2006). UV-C treatment delays postharvest senescence in broccoli florets. *Postharvest Biology and Technology*, *39*(2), 204–210. https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2005.10.012

Courraud, J., Berger, J., Cristol, J., & Avallone, S. (2013). Stability and bioaccessibility of different forms of carotenoids and vitamin A during in vitro digestion. *Food Chemistry*, *136*(2), 871–877. https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2012.08.076

Dandekar, T., Fieselmann, A., Fischer, E., Popp, J., Hensel, M., & Noster, J. (2015). *Salmonella*-how a metabolic generalist adopts an intracellular lifestyle during infection. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, *4*, 191. https://doi.org/10.3389/fcimb.2014.00191

de Almeida-Lopes, M. M., de Lucena, H. H., Souza da Silveira, M. R., dos Santos Garruti, D., Feitosa Machado, T., Souza de Aragão, F. A., & de Oliveira Silva, E. (2021). The use of electrolyzed water as a disinfectant for fresh cut mango. *Scientia Horticulturae*, *287*, 110227. https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2021.110227

De Almeida-Melo, E., & Rodrigues De Araújo, C. (2011). Mangas das variedades espada, rosa e tommy atkins : compostos bioativos e potencial antioxidante. *CIÊNCIAS AGRÁRIAS*, *32*(4), 1451–1460. https://doi.org/10.5433/1679-0359.2011v32n4p1451

De Corato, U. (2020). Improving the shelf-life and quality of fresh and minimally-processed fruits and vegetables for a modern food industry: A comprehensive critical review from the traditional technologies into the most promising advancements. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *60*(6), 940–975. https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1553025

de Curtis, M. L., Franceschi, O., & De Castro, N. (2002). *Listeria monocytogenes* en vegetales mínimamente procesados. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, *52*(3), 282–288. http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-06222002000300009

de Morais, P. L. D., Filgueiras, H. A., de Pinho, J. L. N., Alves, R. E., & de Assis, J. S. (2003). Vida útil de mangos cv. Tommy atkins recolectados en el estadio de maduración comercial. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, *5*(1), 26–32. http://www.redalyc.org/html/813/81350104/

de Siqueira-Oliveira, L., Eça, K. S., de Aquino, A. C., & Vasconcelos, L. B. (2018). Hydrogen peroxide (H_2O_2) for postharvest fruit and vegetable disinfection. In M. Wasim-Siddiqui (Ed.), *Postharvest disinfection of fruits and vegetables* (First Edition, pp. 91–99). Academic Press. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812698-1.00004-2

Devic, S. (2011). Radiochromic film dosimetry: Past, present, and future. *Physica Medica*, *27*(3), 122–134. https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2010.10.001

Díaz-Sobac, R., & Vernon-Carter, J. (2009). Inocuidad microbiológica de frutas frescas y mínimamente procesadas. *CYTA-Journal of Food*, *2*(3), 133–136. https://doi.org/10.1080/11358129909487594

Djioua, T., Charles, F., Freire, M., Filgueiras, H., Ducamp-Collin, M. N., & Sallanon, H. (2010). Combined effects of postharvest heat treatment and chitosan coating on quality of fresh-cut mangoes (*Mangifera indica* L.). *International Journal of Food Science & Technology*, *45*(4), 849–855. https://doi.org/10.1111/J.1365-2621.2010.02209.X

Dussán-Sarria, S., Perea-Camayo, M. A., & Hleap-Zapata, J. I. (2019). Efecto de diferentes antioxidantes y envases en atributos físico-químicos y sensoriales de orellana refrigerada. *Información Tecnológica*, *30*(6), 55–62. https://doi.org/10.4067/S0718-

07642019000600055

Dussán-Sarria, S., Ramírez-Yela, J. I., & Hleap-Zapata, J. I. (2017). Conservación de mango mínimamente procesado usando un recubrimiento comestible a base de aceite de aguacate. *Información Tecnológica*, *28*(3), 67–74. https://doi.org/10.4067/S0718-07642017000300008

Dussán-Sarria, S., Torres-León, C., & Hleap-Zapata, J. I. (2014). Efecto de un recubrimiento comestible y de diferentes empaques durante el almacenamiento refrigerado de mango Tommy Atkins mínimamente procesado. *Información Tecnológica*, *25*(4), 123–130. https://doi.org/10.4067/S0718-07642014000400014

Dussán-Sarria, S., Torres-León, C., & Reyes-Calvache, P. M. (2014). Efecto del recubrimiento comestible sobre los atributos físicoquímicos de mango “Tommy Atkins” mínimamente procesado y refrigerado. *Acta Agronómica*, *63*(3), 212–221. https://doi.org/10.15446/acag.v63n3.40973

Ediriweera, M. K., Tennekoon, K. H., & Samarakoon, S. R. (2017). A review on ethnopharmacological applications, pharmacological activities, and bioactive compounds of *Mangifera indica* (Mango). *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, *2017*. https://doi.org/10.1155/2017/6949835

Escobar-Hernández, A., Márquez-Cardozo, C. J., Restrepo-Florez, C. E., & Cordoba-Pérez, L. J. (2014). Aplicación de tecnología de barreras para la conservación de mezclas de vegetales mínimamente procesados. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, *67*(1), 7237–7245. https://doi.org/10.15446/rfnam.v67n1.42652

Falguera, V., Pagán, J., Garza, S., Garvín, A., & Ibarz, A. (2012). Inactivation of polyphenol oxidase by ultraviolet irradiation: Protective effect of melanins. *Journal of Food Engineering*, *110*(2), 305–309. https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2011.04.005

Feliziani, E., Lichter, A., Smilanick, J. L., & Ippolito, A. (2016). Disinfecting agents for controlling fruit and vegetable diseases after harvest. *Postharvest Biology and Technology*, *122*, 53–69. https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2016.04.016

Fenoglio, D., Ferrario, M., Schenk, M., & Guerrero, S. (2020). Effect of pilot-scale UV-C light treatment assisted by mild heat on *E. coli*, *L. plantarum* and *S. cerevisiae* inactivation in clear and turbid fruit juices. Storage study of surviving populations. *International Journal of Food Microbiology*, *332*, 108767. https://doi.org/10.1016/J.IJFOODMICRO.2020.108767

Franco-Vega, A., Reyes-Jurado, F., González-Albarrán, D., Ramírez-Corona, N., Palou, E., & López-Malo, A. (2021). Developments and advances of high intensity pulsed light and its combination with other treatments for microbial inactivation in food products. *Food Engineering Reviews*, *13*(4), 741–768. https://doi.org/10.1007/S12393-021-09280-1

Fratianni, A., Adiletta, G., Matteo, M. Di, Panfili, G., Niro, S., Gentile, C., Farina, V., Cinquanta, L., & Corona, O. (2020). Evolution of carotenoid content, antioxidant activity and volatiles compounds in dried mango fruits (*Mangifera Indica* L.). *Foods 2020, 9*(10), 1424. https://doi.org/10.3390/FOODS9101424

García-Mogollón, C., Cury-Regno, K. I., & Dussán-Sarria, S. (2010). Evaluación poscosecha y estimación de vida útil de guayaba fresca utilizando el modelo de Weibull. *Acta Agronómica*, *59*(3), 347–355. https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/17664/18534

Gardner, D. W. M., & Shama, G. (1998). The kinetics of *Bacillus subtilis* spore inactivation on filter paper by u.v. light and u.v. light in combination with hydrogen peroxide. *Journal of Applied Microbiology*, *84*(4), 633–641. https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.1998.00391.x

Gardner, D. W. M., & Shama, G. (1999). UV intensity measurement and modelling and disinfection performance prediction for irradiation of solid surfaces with UV light. *Food and Bioproducts Processing*, *77*(3), 232–242. https://doi.org/10.1205/096030899532510

Gardner, D. W. M., & Shama, G. (2000). Modeling UV-Induced Inactivation of Microorganisms on Surfaces. *Journal of Food Protection*, *63*(1), 63–70. https://doi.org/10.4315/0362-028X-63.1.63

Garzón-García, A. M., Ruiz-Cruz, S., Márquez-Ríos, E., Dussán-Sarria, S., Hleap-Zapata, J. I., & Lobatón, H. F. (2020). Computational fluid dynamics as a technique for the UV-C light dose determination in horticultural products. *Biotecnia*, *22*(1), 84–92. https://doi.org/10.18633/BIOTECNIA.V22I1.1128

Geeraerd, A. H., Valdramidis, V. P., & Van Impe, J. F. (2005). GInaFiT, a freeware tool to assess non-log-linear microbial survivor curves. *International Journal of Food Microbiology*, *102*(1), 95–105. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2004.11.038

George, D. S., Razali, Z., Santhirasegaram, V., & Somasundram, C. (2015). Effects of ultraviolet light (UV-C) and heat treatment on the quality of fresh-cut Chokanan mango

and Josephine pineapple. *Journal of Food Science*, *80*(2), S426–S434. https://doi.org/10.1111/1750-3841.12762

George, D. S., Razali, Z., Santhirasegaram, V., & Somasundram, C. (2016). Effect of postharvest ultraviolet-C treatment on the proteome changes in fresh cut mango (*Mangifera indica* L. cv. Chokanan). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *96*(8), 2851–2860. https://doi.org/10.1002/JSFA.7454

Gil, M. I., Gómez-López, V. M., Hung, Y. C., & Allende, A. (2015). Potential of electrolyzed water as an alternative disinfectant agent in the fresh-cut industry. *Food and Bioprocess Technology*, *8*(6), 1336–1348. https://doi.org/10.1007/s11947-014-1444-1

Gil, M. I., Selma, M. V., López-Gálvez, F., & Allende, A. (2009). Fresh-cut product sanitation and wash water disinfection: Problems and solutions. *International Journal of Food Microbiology*, *134*(1–2), 37–45. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2009.05.021

Giménez, A., Ares, F., & Ares, G. (2012). Sensory shelf-life estimation: A review of current methodological approaches. *Food Research International*, *49*(1), 311–325. https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2012.07.008

Giménez, A., & Ares, G. (2019). Sensory shelf life estimation. In C. M. Galanakis (Ed.), *Food Quality and Shelf Life* (pp. 333–357). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817190-5.00011-2

Gómez, P. L., Alzamora, S. M., Castro, M. A., & Salvatori, D. M. (2010). Effect of ultraviolet-C light dose on quality of cut-apple: Microorganism, color and compression behavior. *Journal of Food Engineering*, *98*(1), 60–70. https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2009.12.008

González-Aguilar, G. A., Villegas-Ochoa, M. A., Martínez-Téllez, M. A., Gardea, A. A., & Ayala-Zavala, J. F. (2007). Improving antioxidant capacity of fresh-cut mangoes treated with UV-C. *Journal of Food Science*, *72*(3), S197–S202. https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00295.x

González-Aguilar, G. A., Zavaleta-Gatica, R., & Tiznado-Hernández, M. E. (2007). Improving postharvest quality of mango ‘Haden’ by UV-C treatment. *Postharvest Biology and Technology*, *45*(1), 108–116. https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2007.01.012

González-Mendoza, D., Torrentera-Olivera, N. G., Ceceña Duran, C., & Grimaldo-Juarez, O. (2017). Water as contamination source of *Salmonella* and *Escherichia coli* in

vegetable production in Mexico: A review. *Revista Bio Ciencias*, *3*(3), 156–162. https://doi.org/10.15741/revbio.edit.04.06

González-Vega, R. I., Cárdenas-López, J. L., López-Elías, J. A., Ruiz-Cruz, S., Reyes-Díaz, A., Perez-Perez, L. M., Cinco-Moroyoqui, F. J., Robles-Zepeda, R. E., Borboa-Flores, J., & Del-Toro-Sánchez, C. L. (2021). Optimization of growing conditions for pigments production from microalga *Navicula incerta* using response surface methodology and its antioxidant capacity. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *28*(2), 1401–1416. https://doi.org/10.1016/J.SJBS.2020.11.076

Graça, A., Santo, D., Quintas, C., & Nunes, C. (2017). Growth of *Escherichia coli*, *Salmonella enterica* and *Listeria* spp., and their inactivation using ultraviolet energy and electrolyzed water, on 'Rocha' fresh-cut pears. *Food Control*, *77*, 41–49. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.01.017

Grasso, C., Forniti, R., & Botondi, R. (2022). Post-harvest quality evaluation of "Soreli" kiwifruit at two ripening °Brix values from vineyards of different age under hail nets. *Foods*, *11*(3), 431. https://doi.org/10.3390/FOODS11030431

Guerrero-Beltrán, J. A., & Barbosa-Cánovas, G. V. (2004). Advantages and limitations on processing foods by UV light. *Food Science and Technology International*, *10*(3), 137–147. https://doi.org/10.1177/1082013204044359

Güler, S. K., Bostan, S. Z., & Çon, A. H. (2017). Effects of gamma irradiation on chemical and sensory characteristics of natural hazelnut kernels. *Postharvest Biology and Technology*, *123*, 12–21. https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2016.08.007

Gutiérrez, D., Ruiz-López, G., Sgroppo, S., & Rodríguez, S. (2016). Uso de la radiación UV-C en el proceso de elaboración de hortalizas de IV gama. *Agrociencia Uruguay*, *20*(2), 7–13. http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2301-15482016000200002

Han, R.-M., Zhang, J.-P., & Skibsted, L. H. (2012). Reaction dynamics of flavonoids and carotenoids as antioxidants. *Molecules*, *17*(2), 2140. https://doi.org/10.3390/MOLECULES17022140

Harris, L. J., Zagory, D., & Gorny, J. R. (2011). Factores de seguridad. In A. A. Kader (Ed.), *Tecnología postcosecha de cultivos hortofrutícolas* (pp. 342–345). Universidad de California. Centro de Información e Investigación en Tecnología Postcosecha.

Hashemabadi, S. H., Ghaderzadeh, F., & Taghipour, F. (2014). CFD simulation of UV disinfection reactor for applesauce with a low UV absorption coefficient. *Journal of*

Chemical and Petroleum Engineering, *48*(2), 103–116. https://doi.org/10.22059/JCHPE.2014.7561

He, X., Wang, J., Guo, S., Zhang, J., Wei, B., Sun, J., & Shu, S. (2018). Ventilation optimization of solar greenhouse with removable back walls based on CFD. *Computers and Electronics in Agriculture*, *149*, 16–25. https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.10.001

Hinojosa, A., Silveira, A. C., Ospina, M., Char, C., Sáenz, C., & Escalona, V. H. (2013). Safety of ready-to-eat watercress using environmentally friendly sanitization methods. *Journal of Food Quality*, *36*(1), 66–76. https://doi.org/10.1111/jfq.12016

Ho, C. K. (2009). Evaluation of reflection and refraction in simulations of ultraviolet disinfection using the discrete ordinates radiation model. *Water Science and Technology*, *59*(12), 2421–2428. https://doi.org/10.2166/wst.2009.260

Hough, G., Langohr, K., Gomez, G., & Curia, A. (2003). Survival analysis applied to sensory shelf life of foods. *Journal of Food Science*, *68*(1), 359–362. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2003.tb14165.x

Hough, Guillermo, & Garitta, L. (2012). Methodology for sensory shelf-life estimation: a review. *Journal of Sensory Studies*, *27*(3), 137–147. https://doi.org/10.1111/J.1745-459X.2012.00383.X

Hough, Guillermo, Puglieso, M. L., Sanchez, R., & da Silva, O. M. (1999). Sensory and microbiological shelf-life of a commercial Ricotta cheese. *Journal of Dairy Science*, *82*(3), 454–459. https://doi.org/10.3168/JDS.S0022-0302(99)75253-7

Hu, H. H. (2012). Computational fluid dynamics. In P. K. Kundu, C. I. M., & D. R. Dowling (Eds.), *Fluid mechanics* (pp. 421–472). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382100-3.10010-1

Huang, H., Ge, Z., Limwachiranon, J., Li, L., Li, W., & Luo, Z. (2017). UV-C treatment affects browning and starch metabolism of minimally processed lily bulb. *Postharvest Biology and Technology*, *128*, 105–111. https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2017.02.010

Imaizumi, T., Yamauchi, M., Sekiya, M., Shimonishi, Y., & Tanaka, F. (2018). Responses of phytonutrients and tissue condition in persimmon and cucumber to postharvest UV-C irradiation. *Postharvest Biology and Technology*, *145*, 33–40. https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2018.06.003

Incropera, F. P., & De Witt, D. P. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. Prentice Hall.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2013). *NTC 6005: Alimentos Mínimamente Procesados* (pp. 1–13).

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2018). *Nueva edicion de la norma ISO 22000*. http://www.icontec.org/Paginas/Nueva-edicion-de-la-norma-ISO-22000.aspx

Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos. (1997). *Decreto 3075 de 1997*. https://www.invima.gov.co/images/stories/aliementos/decreto_3075_1997.pdf

Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos. (2013). *Resolución 2674 de 2013*. https://www.invima.gov.co/resoluciones-en-alimentos/resolucion-2674-2013-pdf/detail.html

Instituto Tecnológico del Plástico. (2012). *Guía del usuario del envase plástico*. https://www.sena-sa.com/wp-content/uploads/2020/04/elenvaseplastico.pdf

Jaimez-Suarez, S., & Gómez-Álvarez, L. M. (2013). Evaluación de un producto a base de ácidos orgánicos frente a *E. coli* y *Salmonella* spp. en la desinfección de lechuga fresca. *Alimentos Hoy*, *22*(29), 20–32. https://alimentoshoy.acta.org.co/index.php/hoy/article/view/229/222

Jeon, M.-J., & Ha, J.-W. (2018). Efficacy of UV-A, UV-B, and UV-C irradiation on inactivation of foodborne pathogens in different neutralizing buffer solutions. *LWT*, *98*(14), 591–597. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.09.030

John, D., & Ramaswamy, H. S. (2020). Comparison of pulsed light inactivation kinetics and modeling of *Escherichia coli* (ATCC-29055), *Clostridium sporogenes* (ATCC-7955) and *Geobacillus stearothermophilus* (ATCC-10149). *Current Research in Food Science*, *3*, 82–91. https://doi.org/10.1016/J.CRFS.2020.03.005

Kader, A. A. (2008). *Parámetros de calidad y estándares de clasificación en mango. Revisión de información disponible y futuras necesidades de investigación*. https://www.mango.org/wp-content/uploads/2018/03/Mango_Grade_Standards_Final_Report_Spn.pdf

Kan, J., Hui, Y., Lin, X., Liu, Y., & Jin, C. (2021). Postharvest ultraviolet-C treatment of peach fruit: Changes in transcriptome profile focusing on genes involved in softening and senescence. *Journal of Food Processing and Preservation*, *45*(10), e15813. https://doi.org/10.1111/JFPP.15813

Karpiński, T. M., & Adamczak, A. (2019). Fucoxanthin-an antibacterial carotenoid. *antioxidants*, *8*, 239. https://doi.org/10.3390/ANTIOX8080239

Kaushal, P., & Sharma, H. K. (2011). Concept of computational fluid dynamics (CFD) and its applications in food processing equipment design. *Journal of Food Processing & Technology*, *3*(1), 1–7. https://doi.org/10.4172/2157-7110.1000138

Kavakli, I. H., Ozturk, N., & Gul, S. (2019). DNA repair by photolyases. *Advances in Protein Chemistry and Structural Biology*, *115*, 1–19. https://doi.org/10.1016/BS.APCSB.2018.10.003

Kaya, Z., Unluturk, S., Martin-Belloso, O., & Soliva-Fortuny, R. (2020). Effectiveness of pulsed light treatments assisted by mild heat on *Saccharomyces cerevisiae* inactivation in verjuice and evaluation of its quality during storage. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *66*, 102517. https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2020.102517

Khubone, L. W., & Mditshwa, A. (2018). The effects of UV-C irradiation on postharvest quality of tomatoes (*Solanum lycopersicum*). *Acta Horticulturae*, *1201*, 75–82. https://doi.org/10.17660/ACTAHORTIC.2018.1201.11

Kim, H. G., & Song, K. Bin. (2017). Combined treatment with chlorine dioxide gas, fumaric acid, and ultraviolet-C light for inactivating *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes* inoculated on plums. *Food Control*, *71*, 371–375. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.07.022

Kingwascharapong, P., Iida, Y., Tanaka, F., & Tanaka, F. (2020). Simulation of a UV-C conveyor system using computational fluid dynamics techniques on the uniformity of the incident UV-C dose distribution to strawberry. *Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University*, *65*(2), 371–378. https://doi.org/10.5109/4103903

Koutchma, T., Forney, L., & Moraru, C. (2009). *Ultraviolet light in food technology: principles and applications* (T. Koutchma (Ed.)). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781420059519.ch4

Kumar, M., Saurabh, V., Tomar, M., Hasan, M., Changan, S., Sasi, M., Maheshwari, C., Prajapati, U., Singh, S., Prajapat, R. K., Dhumal, S., Punia, S., Amarowicz, R., & Mekhemar, M. (2021). Mango (*Mangifera indica* L.) leaves: Nutritional composition, phytochemical profile, and health-promoting bioactivities. *Antioxidants*, *10*(2), 299. https://doi.org/10.3390/ANTIOX10020299

Lamikanra, O., Kueneman, D., Ukuku, D., & Bett-Garber, K. L. (2005). Effect of processing under ultraviolet light on the shelf life of fresh-cut cantaloupe melon. *Journal of Food Science*, *70*(9), C534–C539. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.tb08301.x

Lasagabaster, A., & Martínez de Marañón, I. (2017). Comparative study on the inactivation and photoreactivation response of *Listeria monocytogenes* seafood isolates and a *Listeria innocua* surrogate after pulsed light treatment. *Food and Bioprocess Technology*, *10*, 1931–1935. https://doi.org/10.1007/S11947-017-1972-6

Law, J. W.-F., Ab Mutalib, N.-S., Chan, K.-G., & Lee, L.-H. (2015). An insight into the isolation, enumeration, and molecular detection of *Listeria monocytogenes* in food. *Frontiers in Microbiology*, *6*, 1227. https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01227

Lázaro, A., & Lorenzo, C. de. (2015). Texture analysis in melon landraces through instrumental and sensory methods. *International Journal of Food Properties*, *18*(7), 1575–1583. https://doi.org/10.1080/10942912.2014.923441

Li, P., Yu, X., & Xu, B. (2017). Effects of UV-C light exposure and refrigeration on phenolic and antioxidant profiles of subtropical fruits (litchi, longan, and rambutan) in different fruit forms. *Journal of Food Quality*, *2017*. https://doi.org/10.1155/2017/8785121

Liu, C., Zheng, H., Sheng, K., Liu, W., & Zheng, L. (2018). Effects of postharvest UV-C irradiation on phenolic acids, flavonoids, and key phenylpropanoid pathway genes in tomato fruit. *Scientia Horticulturae*, *241*, 107–114. https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2018.06.075

Liu, J., Stevens, C., Khan, V. A., Lu, J. Y., Wilson, C. L., Adeyeye', O., Kabwe', M. K., Pusey, P. L., Chalutz, E., Sultana, T., & Droby, S. (1993). Application of ultraviolet-C light on storage rots and ripening of tomatoes. *Journal of Food Protection*, *56*(10), 868–872. https://doi.org/10.4315/0362-028X-56.10.868

Liu, Z., Hu, S., Soteyome, T., Bai, C., Liu, J., Wang, Z., Kjellerup, B. V., & Xu, Z. (2021). Intense pulsed light for inactivation of foodborne gram-positive bacteria in planktonic cultures and bacterial biofilms. *LWT*, *152*, 112374. https://doi.org/10.1016/J.LWT.2021.112374

Londoño-Londoño, J. (2012). Antioxidantes: importancia biológica y métodos para medir su actividad. In *Desarrollo y transversalidad* (pp. 129–162). Corporación Universitaria Lasallista. http://repository.lasallista.edu.co/dspace/handle/10567/133

Luna-Guevara, J. J., Arenas-Hernandez, M. M. P., Martínez De La Peña, C., Silva, J. L., & Luna-Guevara, M. L. (2019). The role of pathogenic *E. coli* in fresh vegetables:

behavior, contamination factors, and preventive measures. *International Journal of Microbiology*, *2019*, 1–10. https://doi.org/10.1155/2019/2894328

Ma, X., Zheng, B., Ma, Y., Xu, W., Wu, H., & Wang, S. (2018). Carotenoid accumulation and expression of carotenoid biosynthesis genes in mango flesh during fruit development and ripening. *Scientia Horticulturae*, *237*, 201–206. https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2018.04.009

Mahecha, G., De Civetta, L. A., & Rodríguez, C. (1991). Normas de calidad para las variedades de mango “Tommy Atkins” y “común” (hilacha). *Revista Colombiana de Química*, *20*(2), 10–17. https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim

Maherani, B., Hossain, F., Criado, P., Ben-Fadhel, Y., Salmieri, S., & Lacroix, M. (2016). World market development and consumer acceptance of irradiation technology. *Foods*, *5*(4), 79. https://doi.org/10.3390/FOODS5040079

Maldonado-Celis, M. E., Yahia, E. M., Bedoya, R., Landázuri, P., Loango, N., Aguillón, J., Restrepo, B., & Guerrero Ospina, J. C. (2019). Chemical composition of mango (*Mangifera indica* L.) fruit: Nutritional and phytochemical compounds. *Frontiers in Plant Science*, *10*, 1073. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01073

Marques, A., Chicaybam, G., Araujo, M. T., Manhães, L. R. T., & Sabaa-Srur, A. U. O. (2010). Composição centesimal e de minerais de casca e polpa de manga (*Mangifera indica* L.) cv. Tommy Atkins. *Revista Brasileira de Fruticultura*, *32*(4), 1206–1210. https://doi.org/10.1590/S0100-29452010005000117

Márquez-Villacorta, L., Pretell-Vásquez, C., & Minchón-Medina, C. (2011). Efecto del tratamiento desinfectante y tiempo de almacenamiento sobre las características fisicoquímicas, microbiológicas y sensoriales de rebanadas de mango (*Mangifera indica*) Kent mínimamente procesado. *Pueblo Continente*, *22*(2), 385–403. http://journal.upao.edu.pe/PuebloContinente/article/view/432

Márquez-Villacorta, L., & Pretell-Vásquez, C. P. (2013). Irradiación UV-C en frutas tropicales mínimamente procesadas. *Scientia Agropecuaria*, *4*(3), 147–161. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=357633706001

Martínez-González, M. E., Balois-Morales, R., Alia-Tejacal, I., Cortes-Cruz, M. A., Palomino-Hermosillo, Y. A., & López-Gúzman, G. G. (2010). Poscosecha de frutos: maduración y cambios bioquímicos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *Extra 19*, 4075–4087. https://doi.org/10.29312/remexca.v0i19.674

Martínez-Hernández, G. B., Artés-Hernández, F., Gómez, P. A., Formica, A. C., & Artés, F. (2013). Combination of electrolysed water, UV-C and superatmospheric O_2 packaging for improving fresh-cut broccoli quality. *Postharvest Biology and Technology*, *76*, 125–134. https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2012.09.013

Mathew, E. N., Muyyarikkandy, M. S., Kuttappan, D., & Amalaradjou, M. A. (2018). Attachment of *Salmonella enterica* on mangoes and survival under conditions simulating commercial mango packing house and importer facility. *Frontiers in Microbiology*, *9*, 1519. https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01519

Maurer, L. H., Bersch, A. M., Santos, R. O., Trindade, S. C., Costa, E. L., Peres, M. M., Malmann, C. A., Schneider, M., Bochi, V. C., Sautter, C. K., & Emanuelli, T. (2017). Postharvest UV-C irradiation stimulates the non-enzymatic and enzymatic antioxidant system of 'Isabel' hybrid grapes *(Vitis labrusca* × *Vitis vinifera* L.). *Food Research International*, *102*, 738–747. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.09.053

Michailidis, M., Karagiannis, E., Polychroniadou, C., Tanou, G., Karamanoli, K., & Molassiotis, A. (2019). Metabolic features underlying the response of sweet cherry fruit to postharvest UV-C irradiation. *Plant Physiology and Biochemistry*, *144*, 49–57. https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2019.09.030

Millán-Villarroel, D., Romero-González, L., Brito, M., & Ramos-Villarroel, A. Y. (2015). Luz ultravioleta: inactivación microbiana en frutas. *Saber*, *27*(3), 454–469. http://www.ojs.udo.edu.ve/index.php/saber/article/view/1897

Ministerio de Salud y Protección Social. (2013a). *La inocuidad de alimentos y su importancia en la cadena agroalimentaria*. https://www.minsalud.gov.co/Documents/Archivos-temporal-jd/alimentos-temporal.pdf

Ministerio de Salud y Protección Social. (2013b). *Resolución 3929 de 2013*. https://www.invima.gov.co/images/pdf/normatividad/alimentos/resoluciones/resoluciones/2013/Resolucion-3929-2013.pdf

Modest, M. F. (2013). The radiative transfer equation in participating media (RTE). In M. F. Modest (Ed.), *Radiative Heat Transfer* (pp. 279–302). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386944-9.50010-8

Mohamed, N. T. S., Ding, P., Kadir, J., & Ghazali, H. M. (2017). Potential of UVC germicidal irradiation in suppressing crown rot disease, retaining postharvest quality and antioxidant capacity of Musa AAA "Berangan" during fruit ripening. *Food Science &*

Nutrition, *5*, 967–980. https://doi.org/10.1002/FSN3.482

Moharram, H. A., & Youssef, M. M. (2014). Methods for determining the antioxidant activity: A review. *Alexandria Journal of Food Science and Technology*, *11*(1), 31–42.

Monroy, C. A., Marin-Arango, Z. T., & Giraldo, G. A. (2017). Efecto de diferentes cortes en lechuga Batavia (*Lactuca sativa* L). *Alimentos Hoy*, *25*(40), 77–86. https://alimentoshoy.acta.org.co/index.php/hoy/article/view/434/358

Morales, M., Soledad Hernández-, M., Cabezas, M., Barrera, J., & Martínez, O. (2001). Caracterización de la maduración del fruto de pina nativa (*Ananas comosus* L. Merrill) CV. India. *Agronomía Colombiana*, *18*(1–3), 63–69. https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/21706

Moreno, B. L., & Deaquiz-Oyola, Y. A. (2015). Caracterización de parámetros fisicoquímicos en frutos de mora (*Rubus alpinus* Macfad). *Acta Agronómica*, *65*(2), 130–136. https://doi.org/10.15446/acag.v65n2.45587

Moreno, C., Andrade-Cuvi, M. J., Zaro, M. J., Darre, M., Vicente, A. R., & Concellón, A. (2017). Short UV-C treatment prevents browning and extends the shelf-life of fresh-cut carambola. *Journal of Food Quality*, *2017*. https://doi.org/10.1155/2017/2548791

Mukherjee, S. K., & Litz, R. E. (2009). 1 Introduction: Botany and importance. In R. E. Litz (Ed.), *The mango: Botany, production and uses* (pp. 1–18). CAB International.

Muoki, P. N., Makokha, A. O., Onyango, C. A., & Ojijo, N. K. O. (2009). Potential contribution of mangoes to reduction of vitamin A deficiency in Kenya. *Ecology of Food and Nutrition*, *48*(6), 482–498. https://doi.org/10.1080/03670240903308604

Nigro, F., & Ippolito, A. (2016). UV-C light to reduce decay and improve quality of stored fruit and vegetables: a short review. *Acta Horticulturae*, *1144*, 293–298. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1144.43

Nigro, F., Ippolito, A., & Lima, G. (1998). Use of UV-C light to reduce *Botrytis* storage rot of table grapes. *Postharvest Biology and Technology*, *13*(3), 171–181. https://doi.org/10.1016/S0925-5214(98)00009-X

Norton, T., & Sun, D.-W. (2006). Computational fluid dynamics (CFD) - an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: A review. *Trends in Food Science and Technology*, *17*(11), 600–620. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2006.05.004

Norton, T., & Sun, D.-W. (2007). An overview of CFD applications in the food industry. In D.-W. Sun (Ed.), *Computational fluids dynamics in food processing* (pp. 1–41). CRC

Press. https://doi.org/10.1201/9781420009217.ch1

Norton, T., & Sun, D.-W. (2010). CFD: An innovative and effective design tool for the food industry. In J. Aguilera, R. Simpson, J. Welti-Chanes, D. Bermudez-Aguirre, & G. Barbosa-Canovas (Eds.), *Food Engineering Interfaces* (pp. 45–68). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7475-4_3

Ntsoane, M. L., Zude-Sasse, M., Mahajan, P., & Sivakumar, D. (2019). Quality assesment and postharvest technology of mango: A review of its current status and future perspectives. *Scientia Horticulturae*, *249*, 77–85. https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2019.01.033

Obande, M. A., & Shama, G. (2011). The use of biodosimetry to measure the UV-C dose delivered to a sphere, and implications for the commercial treatment of fruit. *Journal of Food Engineering*, *104*(1), 1–5. https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2010.11.017

Obande, M. A., Tucker, G. A., & Shama, G. (2011). Effect of preharvest UV-C treatment of tomatoes (*Solanum lycopersicon* Mill.) on ripening and pathogen resistance. *Postharvest Biology and Technology*, *62*(2), 188–192. https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2011.06.001

Ordoñez-Santos, L. E., Martínez-Girón, J., Villamizar-Vargas, R. H., & Villamizar-Vargas, R. H. (2018). Encapsulation of β-carotene extracted from peach palm residues: a stability study using two spray-dried processes. *DYNA*, *85*(206), 128–134. https://doi.org/10.15446/dyna.v85n206.68089

Ortega, V. G., Ramírez, J. A., Velázquez, G., Tovar, B., Mata, M., & Montalvo, E. (2013). Effect of high hydrostatic pressure on antioxidant content of “Ataulfo” mango during postharvest maturation. *Food Science and Technology*, *33*(3), 561–568. https://doi.org/10.1590/S0101-20612013005000062

Ostos, S. L., Díaz, A. C., & Suarez, H. (2012). Evaluación de diferentes condiciones de proceso en la fortificación de mango (Tommy Atkins) con calcio mediante impregnación a vacío. *Revista Chilena de Nutrición*, *39*(2), 181–190. https://doi.org/10.4067/S0717-75182012000200007

Pan, Y.-G., & Zu, H. (2012). Effect of UV-C Radiation on the Quality of Fresh-cut Pineapples. *Procedia Engineering*, *37*, 113–119. https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2012.04.212

Parish, M. E., Beuchat, L. R., Suslow, T. V., Harris, L. J., Garrett, E. H., Farber, J. N., & Busta, F. F. (2003). Methods to reduce/eliminate pathogens from fresh and fresh-cut

produce. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *2*(s1), 161–173. https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2003.tb00033.x

Park, M.-H., & Kim, J.-G. (2015). Low-dose UV-C irradiation reduces the microbial population and preserves antioxidant levels in peeled garlic (*Allium sativum* L.) during storage. *Postharvest Biology and Technology*, *100*, 109–112. https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2014.09.013

Pataro, G., Sinik, M., Capitoli, M. M., Donsì, G., & Ferrari, G. (2015). The influence of post-harvest UV-C and pulsed light treatments on quality and antioxidant properties of tomato fruits during storage. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *30*, 103–111. https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2015.06.003

Pathare, P. B., Opara, U. L., & Al-Said, F. A.-J. (2013). Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: A review. *Food and Bioprocess Technology*, *6*(1), 36–60. https://doi.org/10.1007/s11947-012-0867-9

Penteado, A. L., de Castro, M. F. P. M., & Rezende, A. C. B. (2014). *Salmonella enterica* serovar Enteritidis and *Listeria monocytogenes* in mango (*Mangifera indica* L.) pulp: growth, survival and cross-contamination. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *94*(13), 2746–2751. https://doi.org/10.1002/jsfa.6619

Pérez-Gálvez, A., Viera, I., & Roca, M. (2020). Carotenoids and chlorophylls as antioxidants. *Antioxidants*, *9*(6), 1–39. https://doi.org/10.3390/ANTIOX9060505

Pérez-Pérez, E. P., & López-Malo, A. (2011). Tecnologías involucradas en el procesamiento mínimo de frutas y hortalizas. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, *5*(2), 13–27. https://www.udlap.mx/WP/tsia/files/No5-Vol-2/TSIA-5(2)-Pérez-Perez-et-al-2011.pdf

Pérez-Perez, L. M., Del-Toro-Sánchez, C. L., Sánchez-Chavez, E., González-Vega, R. I., Reyes-Díaz, A., Borboa-Flores, J., Soto-Parra, J. M., & Flores-Cordova, M. A. (2020). Bioaccesibilidad de compuestos antioxidantes de diferentes variedades de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en México, mediante un sistema gastrointestinal *in vitro*. *Biotecnia*, *22*(1), 117–125. https://doi.org/10.18633/BIOTECNIA.V22I1.1159

Pinela, J., & Ferreira, I. C. F. R. (2017). Nonthermal physical technologies to decontaminate and extend the shelf-life of fruits and vegetables: Trends aiming at quality and safety. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *57*(10), 2095–2111. https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1046547

Pinzón, I. M. del P., Fischer, G., & Corredor, G. (2007). Determinación de los estados de madurez del fruto de la gulupa (*Passiflora edulis* Sims.). *Agronomía Colombiana*, *25*(1), 83–95. http://www.scielo.org.co/pdf/agc/v25n1/v25n1a10.pdf

Prajapati, U., Asrey, R., Varghese, E., Singh, A. K., & Pal Singh, M. (2021). Effects of postharvest ultraviolet-C treatment on shelf-life and quality of bitter gourd fruit during storage. *Food Packaging and Shelf Life*, *28*, 100665. https://doi.org/10.1016/J.FPSL.2021.100665

Prasanna, V., Prabha, T. N., & Tharanathan, R. N. (2007). Fruit ripening phenomena–an overview. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *47*(1), 1–19. https://doi.org/10.1080/10408390600976841

Preetha, P., Pandiselvam, R., Varadharaju, N., Kennedy, Z. J., Balakrishnan, M., & Kothakota, A. (2021). Effect of pulsed light treatment on inactivation kinetics of *Escherichia coli* (MTCC 433) in fruit juices. *Food Control*, *121*, 107547. https://doi.org/10.1016/J.FOODCONT.2020.107547

Pretell-Vásquez, C., Márquez-Villacorta, L., Siche, R., & Hayayumi-Valdivia, M. (2020). Efecto del ozono y tiempo de almacenamiento sobre las características fisicoquímicas de espárrago verde (*Asparagus officinalis* L.) mínimamente procesado. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, *21*(3), 2–16. https://doi.org/10.21930/RCTA.VOL21_NUM3_ART:1506

Pristijono, P., Bowyer, M. C., Papoutsis, K., Scarlett, C. J., Vuong, Q. V., Stathopoulos, C. E., & Golding, J. B. (2019). Improving the storage quality of Tahitian limes (*Citrus latifolia*) by pre-storage UV-C irradiation. *Journal of Food Science and Technology*, *56*, 1–7. https://doi.org/10.1007/s13197-019-03623-x

Pristijono, P., Golding, J. B., & Bowyer, M. C. (2019). Postharvest UV-C treatment, followed by storage in a continuous low-level ethylene atmosphere, maintains the quality of 'Kensington pride' mango fruit stored at 20 °C. *Horticulturae*, *5*(1), 1–12. https://doi.org/10.3390/horticulturae5010001

Puig-Peña, Y., Leyva-Castillo, V., Rodríguez-Suárez, A., Carrera-Vara, J., Molejón, P. L., Pérez-Muñoz, Y., & Dueñas-Moreira, O. (2002). Calidad microbiológica de las hortalizas y factores asociados a la contaminación en áreas de cultivo en La Habana. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, *13*(1), 111–119. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1729-519X2014000100013

Quek, P. H., & Hu, J. (2008a). Influence of photoreactivating light intensity and incubation

temperature on photoreactivation of *Escherichia coli* following LP and MP UV disinfection. *Journal of Applied Microbiology*, *105*(1), 124–133. https://doi.org/10.1111/J.1365-2672.2008.03723.X

Quek, P. H., & Hu, J. (2008b). Indicators for photoreactivation and dark repair studies following ultraviolet disinfection. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, *35*(6), 533–533. https://doi.org/10.1007/S10295-008-0314-0

Quintero-Cerón, J. P., Bohorquez-Pérez, Y., Valenzuela-Real, C., & Solanilla-Duque, J. F. (2013). Avances en la aplicación de luz ultravioleta de onda corta (UVC) en frutas y vegetales enteros y mínimamente procesados: revisión. *Revista Tumbaga*, *1*(8), 29–60. http://revistas.ut.edu.co/index.php/tumbaga/article/view/294/349

Ramírez-Méndez, R., Quijada, O., Castellano, G., Burgos, M. E., Camacho, R., & Marin R., C. (2010). Características físicas y químicas de frutos de trece cultivares de mango (*Mangifera indica* L) en el municipio Mara en la planicie de Maracaibo. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, *10*(2), 65–72. http://www.redalyc.org/html/813/81315091002/

Rangel-Marrón, M., & López-Malo, A. (2012). Cambios en frutas tropicales frescas, cortadas y empacadas en atmósfera modificada durante su almacenamiento en refrigeración. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, *6*(2), 94–109. http://web.udlap.mx/tsia/files/2013/12/TSIA-62Rangel-Marron-et-al-2012.pdf

Rani, K., Manasa, C. B., Jagadeesh, S., & Thammaiah, N. (2019). Colour measurement of ripening mango fruits as influenced by pre-harvest treatments using L* a* b* coordinates. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, *8*(1), 2466–2470.

Raybaudi-Massilia, R., Calderón-Gabaldón, M. I., Mosqueda-Melgar, J., & Tapia, M. S. (2013). Inactivation of *Salmonella enterica* ser. Poona and *Listeria monocytogenes* on fresh-cut “Maradol” red papaya (*Carica papaya* L) treated with UV-C light and malic acid. *Journal Fur Verbraucherschutz Und Lebensmittelsicherheit*, *8*(1–2), 37–44. https://doi.org/10.1007/s00003-013-0808-1

Razali, Z., Somasundram, C., Nurulain, S. Z., Kunasekaran, W., & Alias, M. R. (2021). Postharvest quality of cherry tomatoes coated with mucilage from dragon fruit and irradiated with UV-C. *Polymers*, *13*(17), 2919. https://doi.org/10.3390/POLYM13172919

Rees, C. E. D., Doyle, L., & Taylor, C. M. (2017). *Listeria monocytogenes*. In C. E. R. Dodd,

T. Aldsworth, R. A. Stein, D. O. Cliver, & H. P. Riemann (Eds.), *Foodborne diseases* (pp. 253–276). Academic Press. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385007-2.00012-7

Ren, H. W., & Zhang, Y. (2011). Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the Food Industry. *Advanced Materials Research*, *236–238*, 2273–2278. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.236-238.2273

Ribeiro, S. M. R., Queiroz, J. H., Lopes de Queiroz, M. E., Campos, F. M., & Sant'Ana, H. M. P. (2007). Antioxidant in mango (*Mangifera indica* L.) pulp. *Plant Foods for Human Nutrition*, *62*(1), 13–17. https://doi.org/10.1007/s11130-006-0035-3

Rivera-Pastrana, D. M., Gardea, A. A., Yahia, E. M., Martínez-Téllez, M. A., & González-Aguilar, G. A. (2014). Effect of UV-C irradiation and low temperature storage on bioactive compounds, antioxidant enzymes and radical scavenging activity of papaya fruit. *Journal of Food Science and Technology*, *51*(12), 3821–3829. https://doi.org/10.1007/S13197-013-0942-X

Rivera-Pastrana, Dulce M., Béjar, A. A. G., Martínez-Téllez, M. Á., Rivera-Domínguez, M., & González-Aguilar, G. A. (2007). Efectos bioquímicos postcosecha de la irradiación UV-C en frutas y hortalizas. *Revista Fitotecnia Mexicana*, *30*(4), 361–372. http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61030403

Robles-Sánchez, R. M., Rojas-Graü, M. A., Odriozola-Serrano, I., González-Aguilar, G. A., & Martín-Belloso, O. (2009). Effect of minimal processing on bioactive compounds and antioxidant activity of fresh-cut 'Kent' mango (*Mangifera indica* L.). *Postharvest Biology and Technology*, *51*(3), 384–390. https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2008.09.003

Rodriguez-Amaya, D. B. (2019). Update on natural food pigments - A mini-review on carotenoids, anthocyanins, and betalains. *Food Research International*, *124*, 200–205. https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2018.05.028

Rodríguez-Mijangos, R., Gonzalez-Boué, G., Barffuson-Dominguez, F., López-Vargas, J. M., & Gómez-Yépiz, M. S. (2014). Cámara de irradiación UV-C económica y sus potenciales aplicaciones en la desinfección de alimentos. *EPISTEMUS*, *16*, 72–78. https://biblat.unam.mx/hevila/EpistemusCienciatecnologiaysalud/2014/no16/10.pdf

Romero, L., Colivet, J., Aron, N. M., & Ramos-Villarroel, A. (2017). Impact of ultraviolet light on quality attributes of stored fresh-cut mango. *The Annals of the University Dunarea de Jos of Galati Fascicle VI – Food Technology*, *41*(1), 62–80.

http://eds.a.ebscohost.com/eds/detail/detail?vid=0&sid=7221daa0-c4ff-44c6-aa97-f4f0446caa61%40sessionmgr4008&bdata=Jmxhbmc9ZXMmc2l0ZT1lZHMtbGl2ZQ%3D%3D#AN=125098472&db=fsr

Rosalie, R., Léchaudel, M., Dhuique-Mayer, C., Dufossé, L., & Joas, J. (2018). Antioxidant and enzymatic responses to oxidative stress induced by cold temperature storage and ripening in mango (*Mangifera indica* L. cv. ‘Cogshall’) in relation to carotenoid content. *Journal of Plant Physiology*, *224–225*, 75–85. https://doi.org/10.1016/J.JPLPH.2018.03.011

Ruales, J., Baenas, N., Moreno, D. A., Stinco, C. M., Meléndez-Martínez, A. J., & García-Ruiz, A. (2018). Biological Active Ecuadorian Mango ‘Tommy Atkins’ Ingredients—An Opportunity to Reduce Agrowaste. *Nutrients*, *10*(9). https://doi.org/10.3390/nu10091138

Ruelas-Chacón, X., De La, M., Reyes-Vega, L., Valdivia-Urdiales, B., Carlos Contreras-Esquivel, J., César Montañez-Saenz, J., Aguilera-Carbó, A. F., & Darío Peralta-Rodríguez, R. (2013). Conservación de Frutas y Hortalizas Frescas y Mínimamente Procesadas con Recubrimientos Comestibles. *Revista Científica de La Universidad Autónoma de Coahuila*, *5*(9), 31–37.

Ruiz-Cruz, S., Acedo-Félix, E., Díaz-Cinco, M., Islas-Osuna, M. A., & González-Aguilar, G. A. (2007). Efficacy of sanitizers in reducing *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella* spp. and *Listeria monocytogenes* populations on fresh-cut carrots. *Food Control*, *18*(11), 1383–1390. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2006.09.008

Ruiz-Cruz, S., Alvarez-Parrilla, E., de la Rosa, L. A., Martinez-Gonzalez, A. I., de Jesus Ornelas-Paz, J., Mendoza-Wilson, A. M., & Gonzalez-Aguilar, G. A. (2010). Effect of different sanitizers on microbial, sensory and nutritional quality of fresh-cut jalapeno peppers. *American Journal of Agricultural and Biological Science*, *5*(3), 331–341. https://doi.org/10.3844/ajabssp.2010.331.341

Rybak, K., Wiktor, A., Pobiega, K., Witrowa-Rajchert, D., & Nowacka, M. (2021). Impact of pulsed light treatment on the quality properties and microbiological aspects of red bell pepper fresh-cuts. *LWT*, *149*, 111906. https://doi.org/10.1016/J.LWT.2021.111906

Saini, R. K., & Keum, Y. S. (2018). Significance of genetic, environmental, and pre- and postharvest factors affecting carotenoid contents in crops: A review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *66*(21), 5310–5325.

https://doi.org/10.1021/ACS.JAFC.8B01613/ASSET/IMAGES/ACS.JAFC.8B01613.SOCIAL.JPEG_V03

Salinas-Roca, B., Guerreiro, A., Welti-Chanes, J., Antunes, M. D. C., & Martín-Belloso, O. (2018). Improving quality of fresh-cut mango using polysaccharide-based edible coatings. *International Journal of Food Science & Technology*, *53*(4), 938–945. https://doi.org/10.1111/IJFS.13666

Sandia National Laboratories. (2007). *UV disinfection*. https://www.sandia.gov/cfd-water/uvdisinfection.htm

Santo, D., Graça, A., Nunes, C., & Quintas, C. (2018). *Escherichia coli* and *Cronobacter sakazakii* in 'Tommy Atkins' minimally processed mangos: Survival, growth and effect of UV-C and electrolyzed water. *Food Microbiology*, *70*, 49–54. https://doi.org/10.1016/j.fm.2017.09.008

Sastry, S. K., Datta, A. K., & Worobo, R. W. (2000). Ultraviolet light. *Journal of Food Science*, *65*, 90–92. https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2000.tb00623.x

Scott, G., & Richardson, P. (1997). The application of computational fluid dynamics in the food industry. *Trends in Food Science & Technology*, *8*(4), 119–124. https://doi.org/10.1016/S0924-2244(97)01028-5

Sgroppo, S. C., & Sosa, C. A. (2009). Zapallo anco (*Cucurbita moschata* D.) fresco cortado tratado con luz UV-C. *FACENA*, *25*, 7–19. https://revistas.unne.edu.ar/index.php/fce/article/view/5474

Shama, G. (2005). Ultraviolet Light. In Y. H. Hui (Ed.), *Handbook of Food Science, Technology, and Engineering* (pp. 122-1–122–14). CRC Press.

Shama, G. (2007). Process challenges in applying low doses of ultraviolet light to fresh produce for eliciting beneficial hormetic responses. *Postharvest Biology and Technology*, *44*(1), 1–8. https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2006.11.004

Sharifi-Yazdi, M. K., & Darghahi, H. (2006). Inactivation of pathogenic bacteria using pulsed UV-light and its application in water disinfection and quality control. *Acta Medica Iranica*, *44*(5), 305–308. https://acta.tums.ac.ir/index.php/acta/article/view/3205

Shehata, S. A., Abdeldaym, E. A., Ali, M. R., Mohamed, R. M., Bob, R. I., & Abdelgawad, K. F. (2020). Effect of some citrus essential oils on post-harvest shelf life and physicochemical quality of strawberries during cold storage. *Agronomy, 10*(10), 1466. https://doi.org/10.3390/AGRONOMY10101466

Shen, Y., Sun, Y., Qiao, L., Chen, J., Liu, D., & Ye, X. (2013). Effect of UV-C treatments on

phenolic compounds and antioxidant capacity of minimally processed Satsuma mandarin during refrigerated storage. *Postharvest Biology and Technology*, *76*, 50–57. https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2012.09.006

Silveira, A. C., Conesa, A., Aguayo, E., & Artés, F. (2008). Alternative sanitizers to chlorine for use on fresh-cut “Galia” (*Cucumis melo* var. catalupensis) melon. *Journal of Food Science*, *73*(9), M405–M411. https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2008.00939.x

Sivapalasingam, S., Barrett, E., Kimura, A., Van Duyne, S., De Witt, W., Ying, M., Frisch, A., Phan, Q., Gould, E., Shillam, P., Reddy, V., Cooper, T., Hoekstra, M., Higgins, C., Sanders, J. P., Tauxe, R. V., & Slutsker, L. (2003). A multistate outbreak of *Salmonella enterica* Serotype Newport infection linked to mango consumption: Impact of water-dip disinfestation technology. *Clinical Infectious Diseases*, *37*(12), 1585–1590. https://doi.org/10.1086/379710

Soto-Varela, Z., Pérez-Lavalle, L., & Estrada-Alvarado, D. (2016). Bacterias causantes de enfermedades transmitidas por alimentos: una mirada en Colombia. *Salud Uninorte*, *32*(1), 105–122. http://www.scielo.org.co/pdf/sun/v32n1/v32n1a10.pdf

Sripong, K., Jitareerat, P., & Uthairatanakij, A. (2019). UV irradiation induces resistance against fruit rot disease and improves the quality of harvested mangosteen. *Postharvest Biology and Technology*, *149*, 187–194. https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2018.12.001

Stannard, C. J., Abbiss, J. S., & Wood, J. M. (1983). Combined Treatment with hydrogen peroxide and ultraviolet irradiation to reduce microbial contamination levels in pre-formed food packaging cartons. *Journal of Food Protection*, *46*(12), 1060–1064. https://doi.org/10.4315/0362-028X-46.12.1060

Stannard, C. J., Abbiss, J. S., & Wood, J. M. (1985). Efficiency of treatments involving ultraviolet irradiation for decontaminating packaging board of different surface compositions. *Journal of Food Protection*, *48*(9), 786–789. https://doi.org/10.4315/0362-028X-48.9.786

Stevens, C., Khan, V. A., Tang, A. Y., & Lu, J. Y. (1990). The effect of ultraviolet radiation on mold rots and nutrients of stored sweet potatoes. *Journal of Food Protection*, *53*(3), 223–226. https://doi.org/10.4315/0362-028X-53.3.223

Stevens, C., Khan, V. A., Wilson, C. L., Lu, J. Y., Chalutz, E., & Droby, S. (2005). The effect of fruit orientation of postharvest commodities following low dose ultraviolet light-C

treatment on host induced resistance to decay. *Crop Protection*, *24*(8), 756–759. https://doi.org/10.1016/J.CROPRO.2004.12.008

Strawn, L. K., & Danyluk, M. D. (2010). Fate of *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella* spp. on fresh and frozen cut mangoes and papayas. *International Journal of Food Microbiology*, *138*(1–2), 78–84. https://doi.org/10.1016/J.IJFOODMICRO.2009.12.002

Sultan, T. (2016). Numerical study of the effects of lamp configuration and reactor wall roughness in an open channel water disinfection UV reactor. *Chemosphere*, *155*, 170–179. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.04.050

Syamaladevi, R. M., Lu, X., Sablani, S. S., Insan, S. K., Adhikari, A., Killinger, K., Rasco, B., Dhingra, A., Bandyopadhyay, A., & Annapure, U. (2013). Inactivation of *Escherichia coli* population on fruit surfaces using ultraviolet-C light: Influence of fruit surface characteristics. *Food and Bioprocess Technology*, *6*(11), 2959–2973. https://doi.org/10.1007/s11947-012-0989-0

Tafur-Garzón, M. allister. (2009). La inocuidad de alimentos y el comercio internacional. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, *22*(3), 330–338. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-06902009000300009

Tanaka, F., Nashiro, K., Trivittayasil, V., & Uchino, T. (2016). Simulation of UV-C dose distribution and inactivation of mold spore on strawberries in a conveyor system. *Food Science and Technology Research*, *22*(4), 461–466. https://doi.org/10.3136/fstr.22.461

Taze, B. H., & Unluturk, S. (2018). Effect of postharvest UV-C treatment on the microbial quality of 'Şalak' apricot. *Scientia Horticulturae*, *233*, 370–377. https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2018.02.012

Terry, L. A., & Joyce, D. C. (2004). Elicitors of induced disease resistance in postharvest horticultural crops: a brief review. *Postharvest Biology and Technology*, *32*(1), 1–13. https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2003.09.016

Tharanathan, R. N., Yashoda, H. M., & Prabha, T. N. (2006). Mango (*Mangifera indica* L.), "the king of fruits"—an overview. *Food Reviews International*, *22*(2), 95–123. https://doi.org/10.1080/87559120600574493

Thompson, C. L., & Sancar, A. (2002). Photolyase/cryptochrome blue-light photoreceptors use photon energy to repair DNA and reset the circadian clock. *Oncogene*, *21*(58),

9043–9056. https://doi.org/10.1038/sj.onc.1205958

Trivittayasil, V., Nashiro, K., Tanaka, F., Hamanaka, D., & Uchino, T. (2015). Inactivation characteristics and modeling of mold spores by UV-C radiation based on irradiation dose. *Food Science and Technology Research*, *21*(3), 365–370. https://doi.org/10.3136/fstr.21.365

Trivittayasil, V., Tanaka, F., & Uchino, T. (2016). Simulation of UV-C intensity distribution and inactivation of mold spores on strawberries. *Food Science and Technology Research*, *22*(2), 185–192. https://doi.org/10.3136/fstr.22.185

U.S. Food and Drugs Administration. (2020, October 3). *Country fresh expands voluntary recall*. https://www.fda.gov/safety/recalls-market-withdrawals-safety-alerts/country-fresh-expands-voluntary-recall

van Boekel, M. A. J. S. (2002). On the use of the Weibull model to describe thermal inactivation of microbial vegetative cells. *International Journal of Food Microbiology*, *74*(1–2), 139–159. https://doi.org/10.1016/S0168-1605(01)00742-5

van Boekel, M. A. J. S. (2008). Kinetic modeling of food quality: A critical review. *comprehensive reviews in food science and food safety*, *7*(1), 144–158. https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2007.00036.x

Velderrain-Rodríguez, G. R., Salmerón-Ruiz, M. L., González-Aguilar, G. A., Martín-Belloso, O., & Soliva-Fortuny, R. (2021). Ultraviolet/visible intense pulsed light irradiation of fresh-cut avocado enhances its phytochemicals content and preserves quality attributes. *Journal of Food Processing and Preservation*, *45*(3), e15289. https://doi.org/10.1111/JFPP.15289

Villamizar-Vargas, R., Quiceno-Gómez, C., & Giraldo-Giraldo, G. (2019). Cambios fisicoquímicos durante la maduración del mango Tommy Atkins en la poscosecha. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, *22*(1). https://doi.org/10.31910/RUDCA.V22.N1.2019.1159

Virto, R., Sanz, D., Álvarez, I., Condón, S., & Raso, J. (2006). Application of the Weibull model to describe inactivation of *Listeria monocytogenes* and *Escherichia coli* by citric and lactic acid at different temperatures. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *86*(6), 865–870. https://doi.org/10.1002/jsfa.2424

Wang, C. Y., Chen, C.-T., & Wang, S. Y. (2009). Changes of flavonoid content and antioxidant capacity in blueberries after illumination with UV-C. *Food Chemistry*,

117(3), 426–431. https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2009.04.037

Wang, D., Chen, L., Ma, Y., Zhang, M., Zhao, Y., & Zhao, X. (2019). Effect of UV-C treatment on the quality of fresh-cut lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) root. *Food Chemistry*, *278*, 659–664. https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2018.11.102

WHO. (2018a). *E. coli*. http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/e-coli

WHO. (2018b). *Inocuidad de los alimentos*. http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/food-safety

WHO. (2018c). *Listeriosis*. World Health Organization. https://www.who.int/mediacentre/factsheets/listeriosis/es/

WHO. (2018d). *Salmonella (no tifoidea)*. http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/salmonella-(non-typhoidal)

WHO. (2020). *Foodborne diseases*. https://www.who.int/health-topics/foodborne-diseases#tab=tab_1

Wiley, R. C., & Yildiz, F. (2017). Introduction to minimally processed refrigerated (MPR) fruits and vegetables. In R. C. Wiley & F. Yildiz (Eds.), *Minimally processed refrigerated fruits and vegetables* (Second Edition, pp. 3–15). Springer Science+Business Media LLC. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7018-6

Wilson, C. L., Upchurch, B., El Ghaouth, A., Stevens, C., Khan, V., Droby, S., & Chalutz, E. (1997). Using an on-line UV-C apparatus to treat harvested fruit for controlling postharvest decay. *HortTechnology*, *7*(3), 278–282. http://horttech.ashspublications.org/content/7/3/278.abstract

Wu, J., Liu, W., Yuan, L., Guan, W.-Q., Brennan, C. S., Zhang, Y.-Y., Zhang, J., & Wang, Z.-D. (2017). The influence of postharvest UV-C treatment on anthocyanin biosynthesis in fresh-cut red cabbage. *Scientific Reports*, *7*(1), 5232. https://doi.org/10.1038/s41598-017-04778-3

Xia, B., & Sun, D.-W. (2002). Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*, *34*(1–3), 5–24. https://doi.org/10.1016/S0168-1699(01)00177-6

Xiang, Q., Fan, L., Zhang, R., Ma, Y., Liu, S., & Bai, Y. (2020). Effect of UVC light-emitting diodes on apple juice: Inactivation of *Zygosaccharomyces rouxii* and determination of quality. *Food Control*, *111*, 107082. https://doi.org/10.1016/J.FOODCONT.2019.107082

Xu, L., Tian, C., Lu, X., Ling, L., Lv, J., Wu, M., & Zhu, G. (2015). Photoreactivation of *Escherichia coli* is impaired at high growth temperatures. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, *147*, 37–46. https://doi.org/10.1016/J.JPHOTOBIOL.2015.03.012

Yan, R., Yun, J., Gurtler, J., & Fan, X. (2017). Radiochromic film dosimetry for UV-C treatments of apple fruit. *Postharvest Biology and Technology*, *127*, 14–20. https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2017.01.003

Yang, X., Wu, Q., Huang, J., Wu, S., Zhang, J., Chen, L., Wei, X., Ye, Y., Li, Y., Wang, J., Lei, T., Xue, L., Pang, R., & Zhang, Y. (2020). Prevalence and characterization of *Salmonella* isolated from raw vegetables in China. *Food Control*, *109*, 106915. https://doi.org/10.1016/J.FOODCONT.2019.106915

Yoon, J. H., Han, A., Paek, J., & Lee, S. Y. (2019). Evaluation of non-isothermal inactivation on survivals of pathogenic bacteria by predictive models. *LWT*, *101*, 366–373. https://doi.org/10.1016/J.LWT.2018.11.023

Zafar, T. A., & Sidhu, J. S. (2017). Composition and Nutritional Properties of Mangoes. In M. Siddiq, J. K. Brecht, & J. S. Sidhu (Eds.), *Handbook of Mango Fruit: Production, Postharvest Science, Processing Technology and Nutrition* (pp. 217–236). Wiley-Blackwell.

Zambrano-Zaragoza, M. L., Quintanar-Guerrero, D., González-Reza, R. M., Cornejo-Villegas, M. A., Leyva-Gómez, G., & Urbán-Morlán, Z. (2021). Effects of UV-C and edible nano-coating as a combined strategy to preserve fresh-cut cucumber. *Polymers*, *13*(21), 3705. https://doi.org/10.3390/POLYM13213705

Zambrano, J., Valera, A., Maffei, M., Materano, W., Quintero, I., & Graterol, K. (2017). Efecto de un recubrimiento comestible formulado con mucílago del cactus (*Opuntia elatior* Mill.) sobre la calidad de frutos de piña mínimamente procesados. *Bioagro*, *29*(2), 129–136. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612017000200007&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Zeng, J. K., Jiang, Z. T., Li, W., Zhang, L. B., & Shao, Y. Z. (2020). Effects of UV-C irradiation on postharvest quality and antioxidant properties of wampee fruit [*Clausena lansium* [Lour.) Skeels) during cold storage. *Fruits*, *75*(1), 36–43. https://doi.org/10.17660/TH2020/75.1.4

Zhou, X., Li, Z., Lan, J., Yan, Y., & Zhu, N. (2017). Kinetics of inactivation and

photoreactivation of *Escherichia coli* using ultrasound-enhanced UV-C light-emitting diodes disinfection. *Ultrasonics Sonochemistry*, *35*, 471–477. https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2016.10.028