

Based UV-A LEDs food disinfection mechatronic system

Sistema mecatrónico de desinfección de alimentos mediante luz LED UV-A

Eduardo Flores-Gallegos¹; Ernesto Olvera-González^{2*}; Nivia Escalante-García²; Daniel Alaniz-Lumbreras¹; Rumen Ivanov-Tsonchev³; Alfredo Lara-Herrera⁴

¹Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, campus UAZ Siglo XXI. Carretera Villanueva-Zacatecas, La Escondida km 6, Zacatecas, Zacatecas, C. P. 98160, MÉXICO.

²Tecnológico Nacional de México, campus Pabellón de Arteaga. Carretera a la Estación de Rincón km 1, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, C. P. 20670, MÉXICO.

³Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Física. Calzada Solidaridad esquina Paseo de la Bufa s/n, Zacatecas, Zacatecas, C. P. 98060, MÉXICO.

⁴Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Agronomía. Carretera Zacatecas-Guadalajara km 15.5, Cieneguillas, Zacatecas, C. P. 98170, MÉXICO.

*Corresponding author: e.olvera.itp@gmail.com, tel. 449 196 1915.

Abstract

Introduction: The recent development of UV LEDs has allowed us to investigate the germicidal effect with different wavelengths in the UV spectrum including type A.

Objective: To develop and evaluate a UV-A LED irradiation system at an emission peak of 374 nm, controlled through an automatic routine, and integrated into a semi-industrial mechatronic system designed for fresh products disinfection

Methodology: Fresh products (garlic, serrano pepper, and tomato) were used to evaluate the benefits and functionality of the System. The irradiation doses established for the experiment were 7.9, 23.7, 47.4 and 71.1 J·cm⁻². The temperature of each product was monitored throughout the treatment.

Results: The maximum germicidal effect in garlic, serrano pepper, and tomato was 1.25, 1.05 and 1.24 Log, respectively with a dose of 71.1 J·cm⁻². The irradiation emission does not present secondary effects on the weight and color of each fresh product. Obtaining maximum values of 40, 41.9 and 38.3 °C in garlic, serrano pepper, and tomato, respectively in temperature.

Study limitations: The high time required for disinfection due to the low efficiency of UV-A LEDs.

Originality: The system was designed and developed for the agro-industrial sector considering that it can be inserted as a process within the production line. Ensuring the safety of food is possible to control the doses and irradiation time of each product.

Conclusions: These results allow us to use UV-A as an alternative method for the disinfection of fresh produce.

Keywords: irradiation, food safety, fresh product, integrated system, aerobic mesophilic.

Resumen

Introducción: El último avance sobre luz LED UV ha permitido investigar el efecto germicida con diferentes longitudes de onda del espectro UV, entre ellas el tipo A.

Objetivo: Desarrollar y evaluar un sistema de irradiación LED UV-A con un pico de emisión de 374 nm, controlado mediante una rutina automática, e integrado en un sistema mecatrónico semi-industrial diseñado para la desinfección de productos frescos.

Metodología: Se utilizaron productos frescos (ajo, chile serrano y jitomate) para evaluar los beneficios y funcionalidad del sistema. Las dosis de irradiación establecidas para el experimento fueron de 7.9, 23.7, 47.4 y 71.1 J·cm⁻². La temperatura de cada producto se monitoreó durante todo el tratamiento.

Resultados: El mayor efecto germicida en ajo, chile serrano y jitomate fue de 1.25, 1.05 y 1.24 Log, respectivamente, con una dosis de 71.1 J·cm⁻². La irradiación no presenta efectos secundarios en el peso y el color de cada producto fresco. Se obtuvieron valores máximos de temperatura de 40, 41.9 y 38.3 °C en ajo, chile serrano y jitomate, respectivamente.

Limitaciones del estudio: Se requiere un tiempo prolongado para la desinfección debido a la escasa eficacia de la luz LED UV-A.

Originalidad: El sistema se diseñó y desarrolló para el sector agroindustrial considerando que se puede implementar en la línea de producción. Para garantizar la seguridad de los alimentos, es posible controlar las dosis y el tiempo de irradiación de cada producto.

Conclusiones: Es posible utilizar la luz UV-A como método alternativo para la desinfección de productos frescos.

Palabras clave: irradiación, inocuidad alimentaria, producto fresco, sistema integrado, aerobico mesófilo.



Introduction

Agriculture is an important activity owing to its response to the nutritional demands of millions of people, preserves natural environments, and stimulates the process to generate a better quality of life (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], Organización Panamericana de la Salud [OPS], Programa Mundial de Alimentos [WFP] & Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia [UNICEF], 2019). Fresh produce is continuously exposed to microbial contamination at every stage of production (growing, transport, packaging, storage and final sale) and accounts for a high percentage of total food expenditures for consumers worldwide. The fresh products that have a great impact worldwide are the tomato, garlic, and serrano peppers.

The demand for quality fresh products (fruits and vegetables) is crucial for a healthy diet from a microbiological point of view. However, when consumed without any disinfection process, fresh products become potentially dangerous for humans. Contamination from pathogen causes substantial losses of food (55 % of fruits and vegetables, 25 % for cereals, 35 % for fish and shellfish, and 20 % for meat and dairy products) during storage, transport, and marketing (FAO, OPS, WFP, & UNICEF, 2019; Nüesch-Inderbinen & Stephan, 2016).

Harmlessness and food-safety are considered the backbone that sustains the food industry and are closely linked with the community's demand for food in good condition and risk-free. More than 200 infections (from small diarrhea to cancer) are referred to due to a lack of safety (World Health Organization [WHO], 2019).

Numerous processing approaches have been established to stop food spoilage and increase safety. Pasteurization (by heat), canning, freezing, refrigeration, and chemical conservatives are considered traditional methods (Ravindran & Jaiswal, 2019). But there are changes in texture, flavor, and modification in the sensory and nutritional qualities of fresh products. Another technology that can be included in the list is irradiation. Irradiation is a food preservation technique used to extend and improve the shelf life of fresh or processed foods. Food irradiation is an energy-efficient method (quantity of particles or rays) that contributes to reducing the enormous losses generated due to spoilage or contamination by harmful bacteria and other parasites (Ashraf et al., 2019). Different countries have recognized the potential of the food irradiation method, because it helps to reduce losses in the post-harvest stage, conforms with quarantine requirements, extends exports, and ensures the hygienic quality of food. Irradiation also offers the

Introducción

La agricultura es una actividad importante debido a que responde a las demandas nutricionales de millones de personas, preserva los ambientes naturales y estimula el proceso para generar una mejor calidad de vida (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], Organización Panamericana de la Salud [OPS], Programa Mundial de Alimentos [WFP] & Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia [UNICEF], 2019). Los productos frescos están expuestos a la contaminación microbiana en cada etapa de producción (cultivo, transporte, envasado, almacenamiento y venta final), y representan un porcentaje elevado del gasto que realizan los consumidores en alimentación en todo el mundo. Los productos frescos con mayor impacto a nivel mundial son el jitomate, el ajo y el chile.

La disponibilidad de productos frescos de calidad (frutas y verduras) es fundamental para una dieta sana desde el punto de vista microbiológico; sin embargo, cuando se consumen sin ningún proceso de desinfección, los productos frescos se vuelven potencialmente peligrosos para el ser humano. La contaminación por patógenos causa pérdidas sustanciales en los alimentos (55 % de frutas y verduras, 25 % de cereales, 35 % de pescados y mariscos, y 20 % de carne y productos lácteos) durante el almacenamiento, el transporte y la comercialización (FAO, OPS, WFP, & UNICEF, 2019; Nüesch-Inderbinen & Stephan, 2016).

La inocuidad y la seguridad alimentaria se consideran la columna vertebral de la industria alimentaria, y están estrechamente relacionadas con la demanda de alimentos en buen estado y sin riesgos. Se reportan más de 200 infecciones (desde pequeñas diarreas hasta cáncer) debidas a la falta de inocuidad (World Health Organization [WHO], 2019).

Se han establecido múltiples enfoques de procesamiento para reducir el deterioro de los alimentos y aumentar su seguridad. La pasteurización (por calor), el enlatado, la congelación, la refrigeración y los conservantes químicos se consideran métodos tradicionales (Ravindran & Jaiswal, 2019). No obstante, estos métodos producen cambios en la textura, el sabor, y las cualidades sensoriales y nutricionales de los productos frescos. Otra tecnología que se puede incluir en la lista es la irradiación, la cual contribuye a extender y mejorar la vida útil de los alimentos frescos o procesados. La irradiación de alimentos es un método más económico en cuanto a energía (cantidad de partículas o rayos), que contribuye a reducir las pérdidas generadas debido al deterioro o a la contaminación por bacterias nocivas y otros parásitos (Ashraf et al., 2019). El potencial del método de irradiación de alimentos se ha reconocido en

opportunity to maintain nutrients in foods and replace chemical preservatives, which can be considered risky or harmful to health (Cardello et al., 2007; Frewer et al., 2011; Nayga et al., 2005)

The use of ultraviolet (UV) light in food irradiation is presented as an alternative method to conventional thermal techniques for disinfection. An important issue generated by the thermal methods is the nutritional and organoleptic properties are modified (Fan et al., 2017). Mercury, xenon, and UV-LEDs lamps in recent years have been integrated into these processes. At the beginning of the 20th century, UV irradiation was used in the disinfection of water (Kowalski, 2009), and different foods, like tomato and serrano peppers. Several authors reported that in cherry tomato, eggs, chicken drumsticks, frankfurters, bratwurst, tomato and jalapeño peppers exposed to ultraviolet light C (UV-C at 254 nm) with doses of $0.4 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ and $2 \text{ KJ}\cdot\text{m}^{-2}$ showed a germicidal effect over 90 % (Sommers et al., 2010; Choi et al., 2015).

UV light technology has been proved to be a suitable option for disinfection, although it has several disadvantages such as not penetrating food, that is, decontamination is carried out superficially (Koutchma, 2009). When food goes through a decontamination process, there are shaded areas; that is, irradiation does not contact all flanks of the product, which is considered a challenge for the design and development of new disinfection systems.

A proposal by Stoops et al. (2003) was a UV disinfection system for granulated or powdered foods (Brésilienne nuts, meringue Chunks, cacao powder, small ground Hazelnuts, large ground hazelnuts, and a hazelnut-with-waffle-mixture), irradiation was established with UV at 254 nm ($2.88 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$) during 1 h and showing results over 90 % in two of the six irradiated foods. The authors did not indicate the irradiation area, and the height of the lamps. Hosseini et al. (2019) developed a rotational UV system for the decontamination of pistachio using mercury lamps. The dose is emitted at 2.1 and $4.5 \text{ KJ}\cdot\text{m}^{-2}$ for 7 and 15 min while the product receives the rays in all flanks, obtaining germicidal effects superior to 99.9 %.

The current UV-LEDs developments have advantages over conventional mercury lamps such as longer life, better temperature control, greater energy efficiency, better drive voltage, flexibility in design, no risk of mercury release, and versatility to generate different wavelengths (Muramoto et al., 2014; Chen et al., 2017). Green et al. (2018) used the germicidal effect of the UV-LEDs (A, B, and C) at 259, 268, 275, 289 and 370 nm versus a mercury lamp at 253.7 nm. The obtained results showed that UV-LEDs at 259 y 268 nm were the best.

diferentes países, ya que ayuda a reducir las pérdidas en poscosecha, se ajusta a los requisitos de exportación y de cuarentena, y garantiza la inocuidad de los alimentos. Asimismo, la irradiación ofrece la oportunidad de mantener los nutrientes en los alimentos y sustituir los conservadores químicos, que se pueden considerar de riesgo o perjudiciales para la salud (Cardello et al., 2007; Frewer et al., 2011; Nayga et al., 2005).

El uso de luz ultravioleta (UV) en la irradiación de alimentos se presenta como un método alternativo a las técnicas convencionales para la desinfección. Un problema importante que generan los métodos térmicos es que modifican las propiedades nutricionales y organolépticas de los alimentos (Fan et al., 2017). En los últimos años, las lámparas de mercurio, xenón y UV-LED se han integrado en los procesos de conservación y desinfección de alimentos. A principios del siglo XX, la irradiación UV se utilizó en la desinfección de agua (Kowalski, 2009) y de diferentes alimentos, como el jitomate y el chile. Diversos autores han señalado que los tomates cherry, los huevos, los muslos de pollo, las salchichas, *bratwurst*, el jitomate y el chile jalapeño expuestos a luz ultravioleta C (UV-C a 254 nm), con dosis de $0.4 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ y $2 \text{ KJ}\cdot\text{m}^{-2}$, mostraron un efecto germicida superior al 90 % (Sommers et al., 2010; Choi et al., 2015).

La luz UV ha demostrado ser una opción adecuada para la desinfección, aunque presenta varias desventajas, como la baja penetración en los alimentos; es decir, la descontaminación se realiza de forma superficial (Koutchma, 2009). Cuando los alimentos pasan por un proceso de descontaminación quedan zonas sombreadas, ya que la irradiación no entra en contacto con todo el producto, lo cual se considera un reto para el diseño y desarrollo de nuevos sistemas de desinfección.

Stoops et al. (2003) propusieron un sistema de desinfección UV a 254 nm ($2.88 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$) durante 1 h para alimentos granulados o en polvo (nueces de Brasil, trozos de merengue, cacao en polvo, avellanas pequeñas molidas, avellanas grandes molidas y harina para *waffles* con avellanas), y obtuvieron resultados superiores al 90 % en dos de los seis alimentos irradiados. No obstante, los autores no indicaron el área de irradiación, ni la altura de las lámparas. Hosseini et al. (2019) desarrollaron un sistema UV rotacional para la descontaminación de pistachos utilizando lámparas de mercurio. La dosis empleada por estos autores fue de 2.1 y $4.5 \text{ KJ}\cdot\text{m}^{-2}$ durante 7 y 15 min, donde el producto recibió la irradiación en todos los flancos y los efectos germicidas fueron superiores al 99.9 %.

Los desarrollos actuales en materia de LED-UV presentan ventajas frente a las lámparas de mercurio convencionales, como una vida útil más larga, mejor control de la temperatura, mayor eficiencia energética,

Additionally, the authors combined the UV-LEDs at 259 and 289 nm with dose to $7 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ and they were potent to *Escherichia coli* and *Listeria*.

Yagi et al. (2007) used UV-A light in sterilization for the inactivation of *E. coli* with a dose of $54 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ and *Vibrio parahaemolyticus* with $27 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$, achieving a germicidal effect of 100 and 85 % for 30 and 10 min, correspondingly. The bacteria reduction was determined according to those that appeared on the agar. Malik et al. (2017) applied $57.6 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ of UV-A to *E. coli* ATCC 11229 and had a germicidal effect of 99.9 %. Though the germicidal effect is high, the experiment was carried out on agar. Food in real conditions is totally contaminated and not on agar, therefore the information from these investigations is only a guide.

According to the literature, the use of UV light emitted diodes has shown germicidal power in food, higher energy efficiency, a longer lifetime, constant light intensity, management in heat up, and temperature, including the application of light in specific bands (λ) of the UV spectrum (210 to 400 nm). Therefore, the objective of this study was to improve knowledge and the use of UV-A LED technology in an automatic routine through a semi-industrial mechatronic system for the agro-industrial sector in the disinfection of fresh products. The integrated system allows us to act accurately in the irradiation dose (controlling the exposure time), because one of the problems of this technology is the non-irradiated area or part of the products, which can be solved by applying some strategies associated with the mechatronic system (steps, vibrations, stop/start techniques, among others).

Materials and methods

Based UV-A LED food disinfection mechatronic system

The design and manufacture of the Based UV-A LEDs food disinfection mechatronic system were developed by the Artificial Lighting Laboratory (LIA) at Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga in Aguascalientes, México (Figure 1). The mechatronic system for food disinfection has a conveyor belt where the fresh product is moved to the different stages of the process. In the first stage there is a hopper where the product is selected (garlic, serrano peppers, and tomato). The second stage, the fresh product is moved to the irradiation area where there are three UV-A of 374 nm (Figure 2a) of 25 watts each. The lamps are mounted on a platform of variable height. Controlling the height of the platform allows us to have better control over the irradiation dose to which the fresh product is exposed.

The irradiation zone is shown in Figure 2b and has an effective irradiation area of 800 cm^2 (approximately

mejor voltaje de accionamiento, flexibilidad en el diseño, ausencia de riesgo de liberación de mercurio y versatilidad para generar diferentes longitudes de onda (Muramoto et al., 2014; Chen et al., 2017). Green et al. (2018) compararon el efecto germicida de luz LED UV (A, B y C) a 259, 268, 275, 289 y 370 nm con una lámpara de mercurio a 253.7 nm. Los resultados obtenidos mostraron que la luz LED UV a 259 y 289 nm con dosis de $7 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ fueron potentes para *Escherichia coli* y *Listeria*.

Yagi et al. (2007) utilizaron luz UV-A para inactivar *E. coli* (con una dosis de $54 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$) y *Vibrio parahaemolyticus* (con $27 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$), y obtuvieron un efecto germicida de 100 y 85 % durante 30 y 10 min, respectivamente. La reducción de bacterias se determinó en función de su aparición en agar. Malik et al. (2017) aplicaron $57.6 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ de UV-A a *E. coli* ATCC 11229 y obtuvieron un efecto germicida de 99.9 %. Aunque el efecto germicida es elevado, el experimento se realizó en agar y los alimentos en condiciones reales están totalmente contaminados, por lo que la información de estas investigaciones es sólo un indicador.

De acuerdo con la literatura, el uso de diodos emisores de luz UV ha mostrado tener poder germicida en alimentos, mayor eficiencia energética, mayor vida útil, intensidad luminosa constante, control del calentamiento y la temperatura, y aplicación de luz en bandas específicas (λ) del espectro UV (210 a 400 nm). Por ello, el objetivo de este trabajo fue consolidar el conocimiento y el uso de la tecnología LED UV-A en una rutina automática a través de un sistema mecatrónico semi-industrial para el sector agroindustrial en la desinfección de productos frescos. El sistema integrado permite proporcionar con precisión la dosis de irradiación (controlando el tiempo de exposición), ya que una problemática de esta tecnología es la zona o parte no irradiada de los productos, lo cual se puede resolver si se aplican algunas estrategias asociadas con el sistema mecatrónico (pasos, vibraciones, técnicas de parada/arranque, entre otras).

Materiales y métodos

Sistema mecatrónico de desinfección de alimentos mediante luz LED UV-A

El diseño y fabricación del sistema mecatrónico de desinfección de alimentos mediante luz LED UV-A se desarrollaron en el Laboratorio de Iluminación Artificial (LIA) del Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga en Aguascalientes, México (Figura 1). El sistema mecatrónico cuenta con una banda transportadora donde se traslada el producto fresco a las diferentes etapas del proceso. En la primera etapa hay un contenedor donde se selecciona el producto (ajo, chile serrano y jitomate). En la segunda etapa, el producto fresco se traslada a la zona de irradiación, donde se

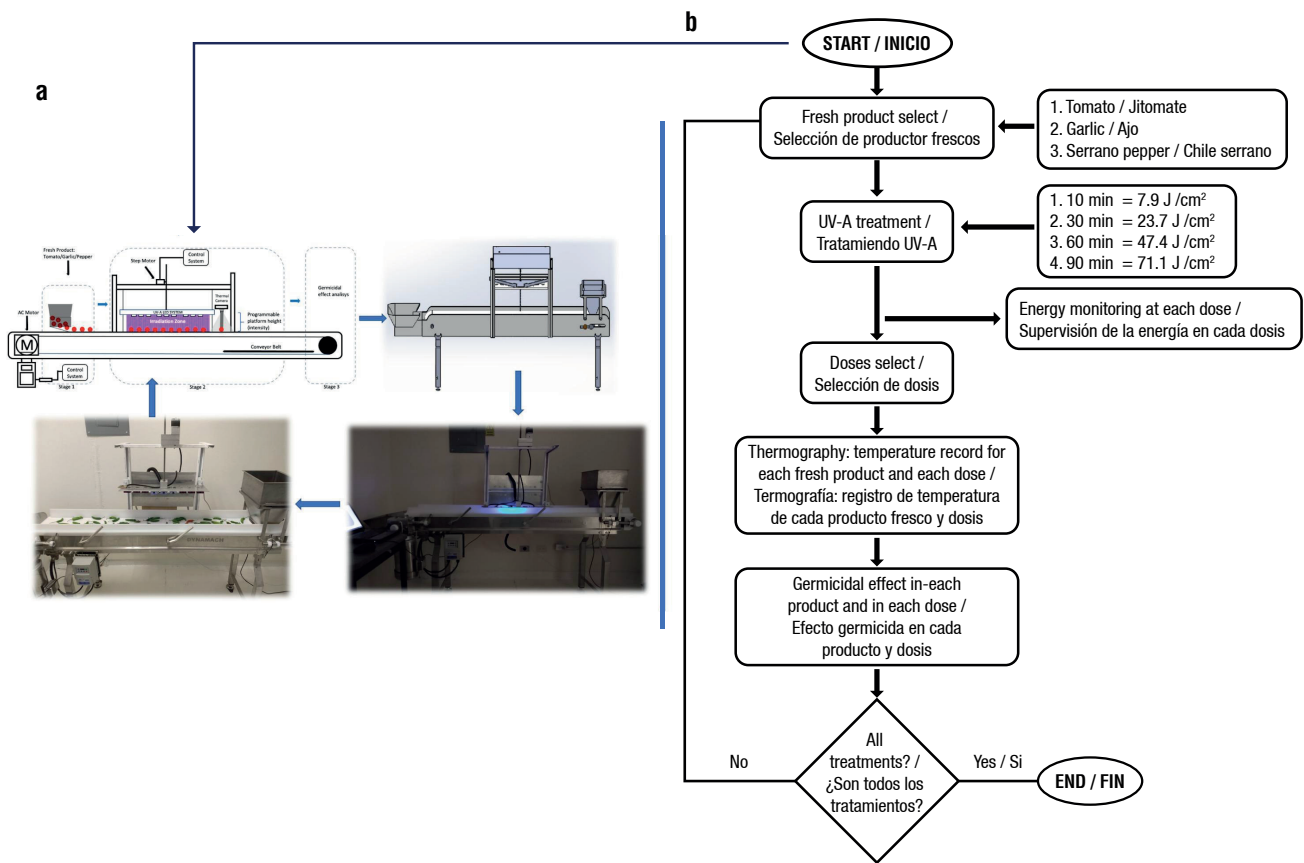


Figure 1. General scheme of UV-A LEDs Mechatronic system: a) design, implementation and validation, and b) sequence of the disinfection process.

Figura 1. Esquema general del sistema mecatrónico LED UV-A: a) diseño, implementación y validación y b) secuencia del proceso de desinfección.

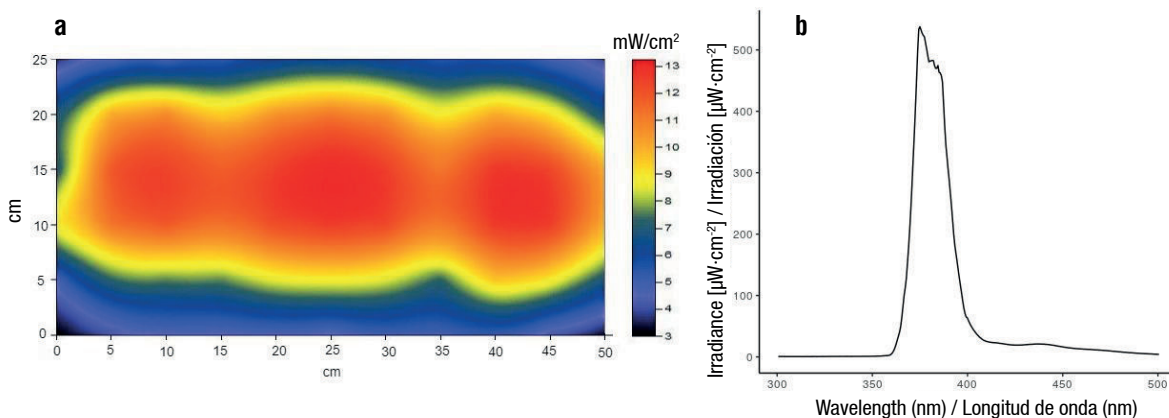


Figure 2. Irradiation of UV-A LEDs: a) maximum irradiation emitted by the lamps and b) the irradiated area by UV-A LEDs.

Figura 2. Irradiación LED UV-A: a) irradiación máxima emitida por lámparas y b) zona irradiada por luz LED UV-A.

50 x 16 cm). The conveyor belt is controlled by an external system that allows to program the speed of advance of the product and thus control the exposure time. Immediately after the product leaves the irradiation zone, a thermal camera takes the image for

encuentran tres lámparas UV-A de 374 nm (Figura 2a) y 25 watts. Las lámparas están montadas sobre una plataforma de altura variable, donde la regulación permite controlar la dosis de irradiación a la que se expone el producto fresco.

temperature monitoring. In the third stage, a bacterial count is performed to analyze the germicidal effect. All material in the system is sanitary grade.

Characterization of the irradiation zone

We used UV-LEDs type A installed in an aluminum lamp with fans to dissipate the heat. The UV-A LEDs reached a maximum power of $0.544 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ at 374 nm wavelength. We applied a configuration with three lamps on the system. The irradiated zone and characterization were determined by an ILT950 spectroradiometer (ILT950, International Light Technologies, USA) (Figure 2).

Doses experimental setup

The dose programming includes the values of the time and the height of the lamps. The doses are determined by the Equation (1):

$$D = I \times t \quad (1)$$

where D refers to the doses applied ($\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$), I is the irradiance ($\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$), and t is the time (s). Four doses were established: 7.9, 23.7, 47.4, and $71.1 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$.

Experimental design

Three types of fresh products (garlic, serrano peppers, and tomato) were used to validate the mechatronic system. The fresh products were from the same harvest and were purchased from a local retailer or farmers market. From the fresh products was determined the initial number of bacteria before the irradiation process. After the irradiation process, 10 g of garlic, serrano peppers, and tomato were selected to evaluate the germicidal effect. Triplicate experiments for all conditions were carried out with all doses.

Organism and counting approach

The microorganisms analyzed for the experimentation were aerobic mesophilic (AM) to verify the sanitary quality of food, the handling conditions, and hygienic conditions (Gould, 1988). The same procedure was used for the three fresh products. 10 g of product were aseptically transferred to a sterile bottle with 90 mL of Peptone and the samples were homogenized for 2 min. Subsequently, 15 mL of agar for standard methods were poured into petri dishes and 1 mL of the dilution was inoculated in duplicate. The samples were left 48 h in an oven at $35 \text{ }^\circ\text{C}$. Colony-forming unit (CFU) were counted per plate.

Temperature monitoring of fresh products

An infrared camera (One Pro LT, FLIR®, USA) was used to monitor the temperature of the fresh

En la Figura 2b se muestra la zona de irradiación, con un área efectiva de 800 cm^2 (aproximadamente $50 \times 16 \text{ cm}$). La cinta transportadora está controlada por un sistema externo que permite programar la velocidad de avance del producto y, con ello, el tiempo de exposición. Inmediatamente después de que el producto abandona la zona de irradiación, una cámara térmica toma una imagen para controlar la temperatura. En la tercera etapa del proceso, se realiza un recuento bacteriano para analizar el efecto germicida. Todo el material del sistema es de calidad sanitaria.

Caracterización de la zona de irradiación

Se utilizó luz LED UV-A instalada en una lámpara de aluminio con ventiladores para disipar el calor. La luz LED UV-A alcanzó una potencia máxima de $0.544 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$, a una longitud de onda de 374 nm. La configuración se realizó con tres lámparas en el sistema. La zona irradiada y la caracterización se determinaron mediante un espectroradiómetro (ILT950, International Light Technologies, EUA) (Figura 2).

Ajuste experimental de las dosis

La programación de las dosis incluyó los valores de tiempo y la altura de las lámparas. Las dosis se determinaron mediante la siguiente Ecuación (1):

$$D = I \times t \quad (1)$$

donde D es la dosis aplicada ($\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$), I es la irradiancia ($\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$) y t es el tiempo (s). Considerando lo anterior, se establecieron cuatro dosis: 7.9, 23.7, 47.4 y $71.1 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$.

Diseño experimental

Se utilizaron tres productos frescos (ajo, chile serrano y tomate) para validar el sistema mecatrónico, los cuales procedían de la misma cosecha y se adquirieron en un establecimiento minorista local o en un mercado de agricultores. A partir de los productos frescos, se determinó la cantidad de bacterias antes del proceso de irradiación. Una vez finalizado el proceso, se seleccionaron 10 g de ajo, chile serrano y tomate para evaluar el efecto germicida. Los experimentos se realizaron por triplicado para todas las condiciones con todas las dosis.

Organismo y método de recuento

Los microorganismos analizados fueron aeróbicos mesófilos (AM), con el fin de verificar la calidad sanitaria de los alimentos, las condiciones de manipulación y las condiciones higiénicas (Gould, 1988). Los tres productos frescos se analizaron con el mismo procedimiento. Se vertieron de manera aséptica 10 g de producto en un frasco estéril con 90 mL de Peptona y se homogenizaron las muestras durante 2 min. Posteriormente, se vertieron

product. The camera was mounted on the system and measurements were taken at the same point of the product every 10 min for 90 min. Weight and color were measured before and after each treatment to determine product change.

Statistical analysis

The experiments were based on a completely randomized design, and results are expressed as mean \pm standard deviation or \pm standard error. The experiments were performed twice in triplicate. A Shapiro-Wilks test was performed to determine the normality of the data. Subsequently, for the validation of the germicidal effect, one analysis of variance was performed ($P < 0.05$) to determine if there are significant germicidal differences between doses or techniques. Statistical tests were performed in R software.

Results and discussion

In LIA, the disinfection process with UV-A LED irradiation was carried out. The system was configured and programmed to irradiate every one of the products under the same conditions (7.9, 23.7, 47.4 and 71.1 J·cm⁻² for 10, 30, 60 and 90 min), correspondingly calculated in the methodology section. About 95 % of the germicidal effect was achieved during the irradiation process. Also, our system takes advantages such as it can be irradiated with different products, variables like the range of treatments, doses, on/off time, the conveyor belt speed, the height of the lamps are controlled through an automatic routine. Can be incorporated into a production line; besides shall be scalable; that is, higher production capacity, irradiation area, among others (Figure 1).

Stoops et al. (2013) proposed a rotating system, but with several disadvantages, such as the inability to adjust height, irradiation zone and dose. Therefore, this system is not suitable for integration into a production line. Hosseini et al. (2019) also designed a system for equivalent products and no adjustment of height, irradiation zone or rotational speed.

Temperature monitoring of fresh products

Figure 3 shows the results obtained in the temperature monitoring during 90 min of treatment for fresh products (tomato, serrano peppers, and garlic). Figure 3a displays the thermograms obtained with the thermal camera, assuming the same reference point for all. The initial temperatures of tomato (Figure 3a1), serrano peppers (Figure 3a3), and garlic (Figure 3a5) were 19.9, 21.9 and 22.0 °C, respectively. Figures 3a2, 3a4, and 3a6 show the final temperatures 38.3, 41.9 and 40 °C correspondingly to each product (tomato, serrano

15 mL de agar para métodos estándar en placas de Petri y se inoculó 1 mL de la dilución. Las pruebas se realizaron por duplicado. Las muestras se dejaron 48 h en una estufa a 35 °C y las unidades formadoras de colonias (UFC) se contaron por placa.

Control de temperatura de los productos frescos

Se utilizó una cámara de infrarrojos (One Pro LT, FLIR®, EUA) para controlar la temperatura del producto fresco. La cámara se montó en el sistema y se realizaron mediciones en el mismo punto del producto cada 10 min durante 90 min. Para determinar el cambio en los productos se midió el peso y el color, antes y después de cada tratamiento.

Análisis estadístico

Los experimentos se basaron en un diseño completamente aleatorio, y los resultados se expresan como la media \pm desviación estándar o \pm error estándar. Los experimentos se realizaron dos veces por triplicado. Se realizó una prueba de Shapiro-Wilks para determinar la normalidad de los datos. Posteriormente, para validar el efecto germicida, se realizó un análisis de varianza ($P < 0.05$) con el fin de determinar si existían diferencias germicidas significativas entre dosis o técnicas. Las pruebas estadísticas se realizaron con el programa informático R.

Resultados y discusión

En el LIA se llevó a cabo el proceso de desinfección con irradiación LED UV-A. El sistema se configuró y programó para irradiar cada producto fresco con las mismas condiciones (7.9, 23.7, 47.4 y 71.1 J·cm⁻², durante 10, 30, 60 y 90 min), obtenidas mediante los cálculos señalados en la metodología. Con las irradiaciones realizadas, se alcanzó un efecto germicida de 95 %. Además, la ventaja del sistema radica en que se pueden irradiar diferentes productos, ya que variables como el rango de tratamientos, las dosis, el tiempo de encendido/apagado, la velocidad de la cinta transportadora y la altura de las lámparas se controlan a través de una rutina automática, la cual se puede incorporar a una línea de producción. Otra ventaja es la escalabilidad a una mayor capacidad de producción, área de irradiación, entre otros (Figura 1).

Stoops et al. (2013) propusieron un sistema rotativo, aunque con diversas desventajas, como la incapacidad de ajustar la altura, la zona de irradiación y la dosis. Por ello, dicho sistema no es adecuado para ser integrado en una línea de producción. Hosseini et al. (2019) también diseñaron un sistema para productos equivalentes y sin ajuste de altura, zona de irradiación ni velocidad de rotación.

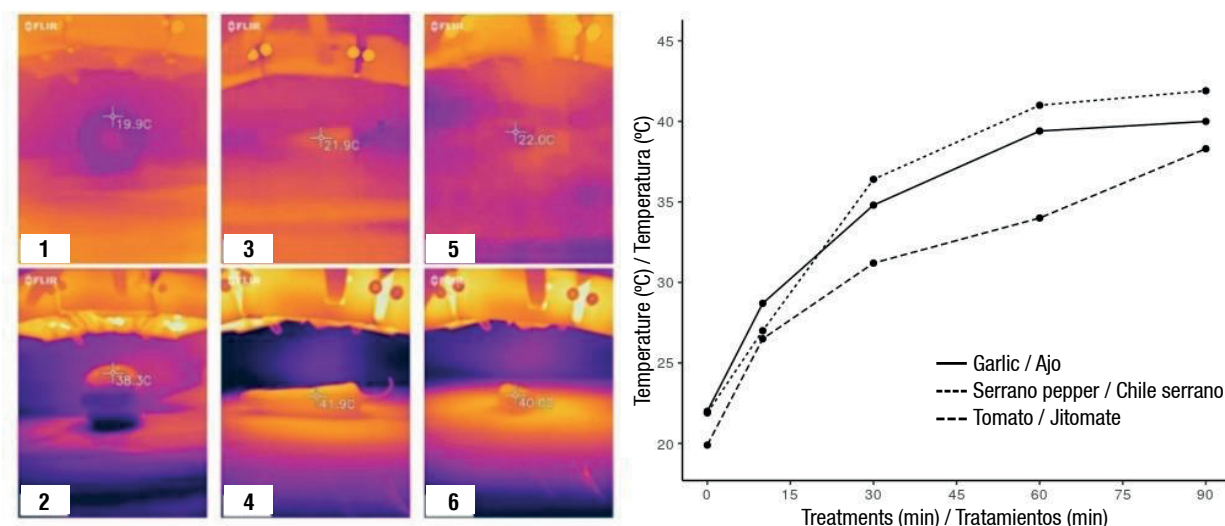


Figure 3. a) Thermographic images at the beginning and end of the experiment: tomato (a1 and a2), serrano peppers (a3 and a4) and garlic (a5 and a6), and b) temperature behavior during fresh product treatments.

Figura 3. a) Imágenes termográficas al inicio y al final del experimento: jitomate (a1 y a2), chile serrano (a3 y a4) y ajo (a5 y a6), y b) comportamiento de la temperatura durante los tratamientos de los producto fresco.

peppers, and garlic, respectively). According to the data obtained, the irradiation time and the heat generated by the UV-A LED system are factors of the temperature increase in tomato, serrano peppers, and garlic. The weight and color of each product were measured, obtaining as results that there are no significant changes.

The research reported have emphasized the product temperature when it is submitted to a disinfection process hence an excessive increase would cause changes in the physical and chemical properties. For this reason, it is essential to monitor during the treatment. Disinfection systems developed with mercury lamps in comparison with those with UV-LED light can cause dehydration if exposure is prolonged, this being one of the main challenges for the development of new strategies for disinfection of fresh products (Fan et al., 2017; Mandal et al., 2020).

Germicidal efficiency

Table 1 shows the number of CFU in each product (garlic, serrano peppers and tomato) at the beginning of the experiment, and garlic had the highest number of CFU.

The germicidal effect by treatment and dose is shown in Table 2. At a dose of 7.9 and 23.7 J·cm⁻², tomato had the highest germicidal effect (41.0 and 71.4 %), followed by serrano peppers (35.6 and 67.2 %) and garlic (19.4 and 67.6 %), while at 47.4 J·cm⁻², the germicidal efficacy was highest in garlic (92.7 %), and was similar for serrano peppers (85.4 %) and tomato (83.2 %). The maximum cumulative germicidal effects (90 min)

Control de temperatura en los productos frescos

La Figura 3 muestra los resultados obtenidos en cuanto al monitoreo de temperatura durante 90 min de tratamiento en productos frescos (jitomate, chile serrano y ajo). La figura 3a muestra los termogramas obtenidos con la cámara térmica, asumiendo el mismo punto de referencia para todos. Las temperaturas iniciales del jitomate (Figura 3a1), chile serrano (Figura 3a3) y ajo (Figura 3a5) fueron de 19.9, 21.9 y 22.0 °C, respectivamente. Las Figuras 3a2, 3a4 y 3a6 muestran las temperaturas finales de 38.3, 41.9 y 40 °C correspondientes a cada producto (tomate, chile serrano y ajo, respectivamente). De acuerdo con los datos obtenidos, el tiempo de irradiación y el calor generado por el sistema LED UV-A incrementan la temperatura en los productos frescos. No se observaron cambios significativos en el peso y el color de cada producto.

Los estudios reportados han hecho énfasis en la temperatura del producto cuando se somete a un proceso de desinfección, ya que un incremento excesivo podría provocar cambios en las propiedades físicas y químicas. Por esta razón, es esencial monitorear este parámetro durante el tratamiento. Los sistemas de desinfección elaborados con lámparas de mercurio, en comparación con los de luz LED-UV, pueden causar deshidratación si la exposición es prolongada, lo cual representa un reto para el desarrollo de nuevas estrategias para la desinfección de productos frescos (Fan et al., 2017; Mandal et al., 2020).

Eficacia germicida

En el Cuadro 1 se muestra la cantidad de UFC obtenidas en cada producto (ajo, chile serrano y jitomate) al

Table 1. Initial count of aerobic mesophilic in fresh products.**Cuadro 1. Recuento inicial de aerobios mesófilos en productos frescos.**

Product / Producto	Initial count / Conteo inicial	
	CFU·g ⁻¹ / UFC·g ⁻¹	Log N ₀ (N ₀ = CFU·g ⁻¹) / Logaritmo N ₀ (N ₀ = UFC·g ⁻¹)
Garlic / Ajo	10 622 000	7.03
Serrano peppers / Chile serrano	39 333	4.59
Tomato / Jitomate	150	2.17

Table 2. The germicidal effect of UV-A LEDs irradiation.**Cuadro 2. Efecto germicida por irradiación con luz LED UV-A.**

Product / Producto	Dose (J·cm ⁻²) / Dosis (J·cm ⁻²)	Germicidal effect (%) / Efecto germicida (%)	Log (N/N ₀) / Logaritmo (N/N ₀)
Garlic	7.9	19.4 ± 5.6	0.09 ± 0.03
	23.7	67.6 ± 1.9	0.49 ± 0.03
	47.4	92.7 ± 0.4	1.13 ± 0.04
	71.1	94.4 ± 0.7	1.25 ± 0.05
Serrano peppers	7.9	35.6 ± 13.8	0.20 ± 0.09
	23.7	67.2 ± 4.0	0.47 ± 0.09
	47.4	85.4 ± 1.4	0.79 ± 0.10
	71.1	90.6 ± 2.9	1.05 ± 0.16
Tomato	7.9	41.0 ± 9.9	0.23 ± 0.08
	23.7	71.4 ± 12.4	0.58 ± 0.18
	47.4	83.2 ± 5.2	0.79 ± 0.14
	71.1	93.8 ± 2.0	1.24 ± 0.18

were 94.4, 90.6 and 93.8 % for garlic, serrano chili and tomato, respectively, at a concentration of 71.1 J·cm⁻².

The development of the mechatronic disinfection system using UV LED light allowed the study of different wavelengths with UV-C light, while the proposals with UV-A mentioned in the literature were carried out on agar inoculated with bacteria.

In comparison with the experiment reported by Yagi et al. (2007) and Malik et al. (2017), where they found germicidal rates of 100 and 99.9 %, were obtained respectively. The highest germicidal effect achieved in this research was 94.4 % in garlic. Different factors can influence the germicidal effect, the two most important are bacteria and the contamination origin of the samples. AM represent a wide range of microorganisms with different resistance to UV light, as reported by Yagi et al. (2007), who with the same doses achieved different germicidal effects on *Salmonella* (20 %) and *Vibrio parahaemolyticus* (100 %). Birmpa et al. (2013) reached reductions of 1.75 and 1.27 Log in *E. coli* and *L. innocua*, respectively using UV-C light. In this case, the products were irradiated for up to 60 min,

inicio del experimento, y se puede observar que el ajo presentó el mayor número de UFC.

El efecto germicida por tratamiento y dosis se presenta en el Cuadro 2. Con una dosis de 7.9 y 23.7 J·cm⁻², el jitomate presentó el mayor efecto germicida (41.0 y 71.4 %), seguido del chile serrano (35.6 y 67.2 %) y el ajo (19.4 y 67.6 %), mientras que con 47.4 J·cm⁻², la eficacia germicida fue mayor en el ajo (92.7 %), y fue similar para el chile serrano (85.4 %) y el jitomate (83.2 %). Los máximos efectos germicidas acumulativos (90 min) fueron de 94.4, 90.6 y 93.8 % para el ajo, el chile serrano y el jitomate, respectivamente, con una concentración de 71.1 J·cm⁻².

El desarrollo del sistema mecatrónico de desinfección mediante luz LED UV permitió estudiar diferentes longitudes de onda con luz UV-C, mientras que las propuestas con UV-A mencionadas en la literatura se llevaron a cabo en agar inoculado con bacterias.

En comparación con el experimento reportado por Yagi et al. (2007) y Malik et al. (2017), donde obtuvieron índices germicidas de 100 y 99.9 %, respectivamente, el mayor efecto germicida alcanzado en esta investigación fue de

and no significant changes in organoleptic properties were found. Compared to our proposal, we achieved a similar germicidal effect but with a higher UV-A dose. Choi et al. (2015) applied doses of $10 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ to cherry tomatoes inoculated with *S. typhimurium*. The results showed reductions of 1.28 Log.

Germicidal effect performance

Germicidal Effect Performance is defined as the difference in germicidal efficacy between periods, this means, the difference in the percentages of germicidal effect in treatments. Figure 4 represents the effective germicidal effects though the time of each treatment, the behavior of the germicidal effect in each fresh product was indicated, specifically showing what percentage was obtained by period (from 0 to 90 min). The first column in Figure 4 shows the percentages obtained in each period of the treatments.

The shaded area reflects the maximum germicidal efficacy at the intervals for each product, i.e., the interval in which irradiation with LED UV-A light was most potent. The figures on the right-hand side show the percentage values for each period, and it can be seen whether the germicidal effect increases or decreases over time. In the 10 to 30 min interval, the highest germicidal percentage was produced in garlic, with 48.1 %, while at 60 min it decreased 25.1 % and at 90 min it was only 1.7 %. With serrano peppers, the highest germicidal efficacy was obtained in the first 10 min (35.6 %); subsequently, the value began to decrease until reaching 5.6 % at 90 min (Figure 4).

The tomato achieved 41.0 % in the first 10 min of treatment, subsequently decreased in 30 min to 30.4 %, 11.8 % to 60 min, and in 90 min to 10.7 %. The maximum germicidal effect between intervals was obtained in 30 min on garlic, 10 min on serrano peppers, and 10 min on tomato; inactivating a large number of AM. The germicidal effect represents an important parameter when establishing new strategies for food disinfection, because it is important to know the time in which there is synergy with the different wavelengths to obtain the most effective irradiation treatments to reduce AM and energy consumption. A large number of jobs reported with UV-C, but there are very few UV-A for disinfection.

Compared to food disinfection work with UV-C emitted with mercury lamps, the work presented shows a lower germicidal effect, however, for those products that require a decrease in their microbial load it may be a viable option. Also, UV-A LEDs have a greater coverage area, an advantage that can lower the cost of disinfection systems. No changes in weight were observed with the treatments, nor color changes with the naked eye, although it would be interesting

94.4 % para ajo. Existen diferentes factores que pueden influir en la eficacia germicida, los dos más importantes son las bacterias y el origen de contaminación de las muestras. Los AM representan una amplia gama de microorganismos con diferente resistencia a la luz UV, como lo reportan Yagi et al. (2007), quienes con las mismas dosis consiguieron diferentes efectos germicidas en *Salmonella* (20 %) y *Vibrio parahaemolyticus* (100 %). Birmpa et al. (2013) alcanzaron reducciones de 1.75 y 1.27 Log en *E. coli* y *L. innocua*, respectivamente, con luz UV-C. En este caso, los productos se irradiaron hasta por 60 min, y no encontraron cambios significativos en las propiedades organolépticas. En comparación con la propuesta del presente trabajo, se obtuvo un efecto germicida similar, pero con una dosis de UV-A mayor. Choi et al. (2015) aplicaron $10 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ a tomates cherry inoculados con *S. typhimurium* y obtuvieron reducciones de 1.28 Log.

Rendimiento del efecto germicida

El rendimiento del efecto germicida se define como la diferencia de la eficacia germicida entre periodos; es decir, la diferencia de los porcentajes de efecto germicida en los tratamientos. La Figure 4 representa los efectos germicidas efectivos a través del tiempo de cada tratamiento. En dicha figura, se indicó el comportamiento del efecto germicida en cada producto y se mostró, específicamente, qué porcentaje se obtuvo para cada periodo (de 0 a 90 min). Las figuras del lado izquierdo muestran los porcentajes obtenidos en cada período de los tratamientos.

La zona sombreada refleja la eficacia germicida máxima en los intervalos de cada producto; es decir, el intervalo en el cual la irradiación con luz LED UV-A fue más potente. Las figuras del lado derecho muestran los valores porcentuales de cada periodo, y se puede apreciar si el efecto germicida aumenta o disminuye a través del tiempo. En el intervalo de 10 a 30 min, el mayor porcentaje germicida se produjo en ajo, con 48.1 %, mientras que a los 60 min se redujo 25.1 % y a los 90 min fue solo de 1.7 %. Con el chile serrano, la mayor eficacia germicida se obtuvo los primeros 10 min (35.6 %); posteriormente, el valor comienza a disminuir hasta alcanzar 5.6 % en 90 min (Figure 4).

El jitomate alcanzó 41.0 % en los primeros 10 min de tratamiento, disminuyendo a 30.4 % en 30 min, 11.8 % en 60 min y 10.7 % en 90 min. El máximo efecto germicida entre intervalos se obtuvo en ajo a los 30 min, y 10 min sobre el chile serrano y el jitomate, inactivando un gran número de AM. El efecto germicida representa un parámetro importante a la hora de establecer nuevas estrategias para la desinfección de alimentos, ya que es importante conocer el tiempo en que existe sinergia con las diferentes longitudes de onda para obtener los tratamientos de irradiación más eficaces para reducir los AM y el consumo energético.

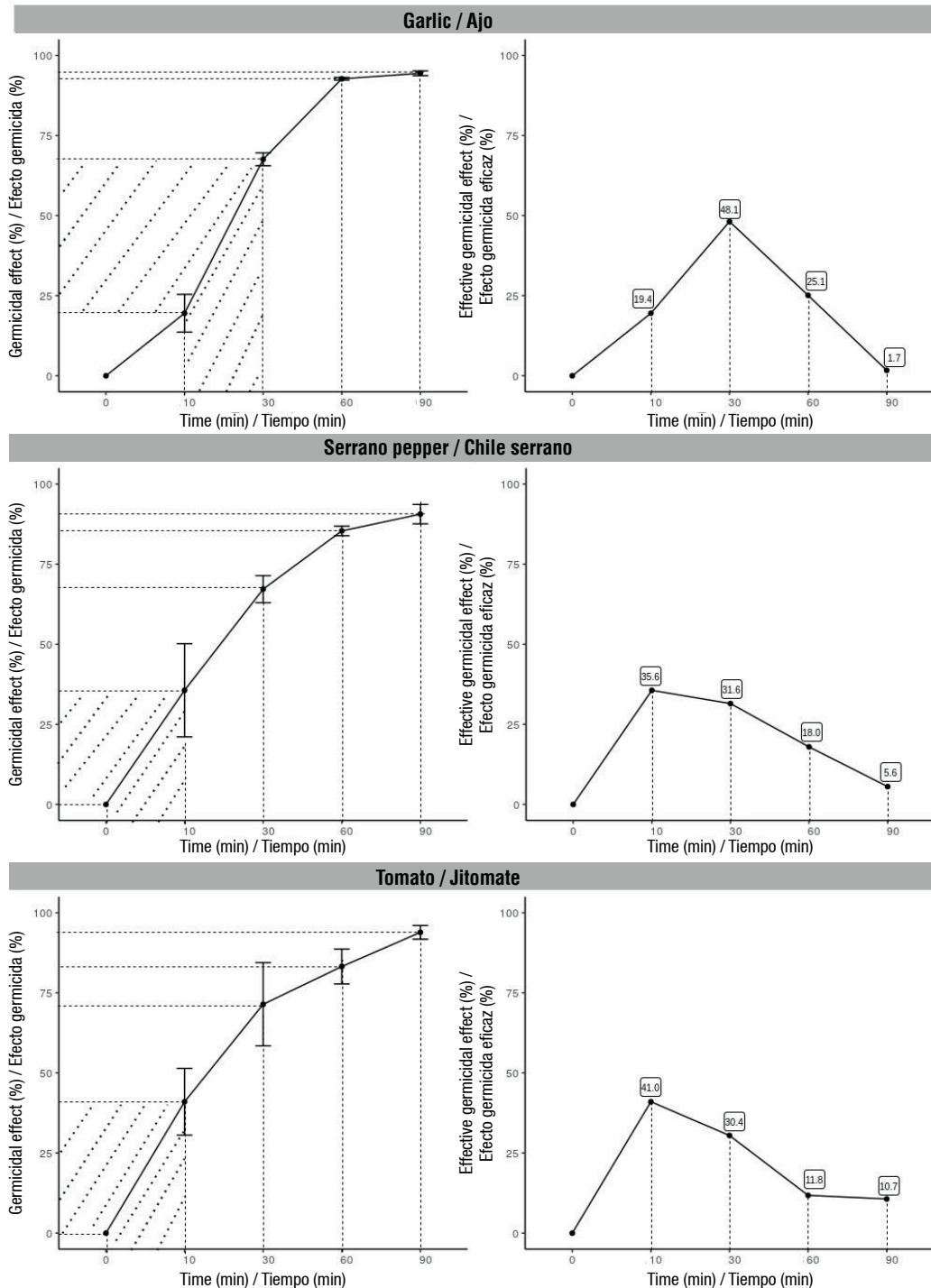


Figure 4. The figures on the left side show the zone of maximum germicidal effect in the treatments, and the figures on the right side show the performance of the germicidal effect over time.

Figure 4. Las figuras del lado izquierdo muestran la zona de máximo efecto germicida en los tratamientos, y las figuras del lado derecho muestran el rendimiento del efecto germicida a lo largo del tiempo.

to perform an analysis of the chemical compounds to characterize tomato properties.

Conclusions

The mechatronic system using UV-A LED light designed to disinfect food proved to be suitable for fresh food,

Existe un gran número de trabajos reportados con UV-C, pero muy pocos con UV-A para desinfección.

Comparado con los trabajos de desinfección de alimentos con UV-C emitidos con lámparas de mercurio, el trabajo presentado muestra un menor efecto germicida; sin embargo, puede ser una opción viable para los productos

because significant bacterial reductions were observed. The system was designed and developed for the agro-industrial sector considering that it can be inserted as a process within the production line. Ensuring the food safety is possible to control the doses and irradiation time of each product. According to needs, the irradiation area will be extended along a conveyor belt establishing more arrays of UV-A LEDs.

For this experiment did not cause secondary effects but is a variable that should be examined as a part of the application when used this kind of technology. For the food disinfection such as garlic, serrano peppers, and tomato, UV-A LEDs irradiation proved to be a versatile instrument, also could be configured for different foods.

Germicidal efficacy can be influenced by bacterial resistance due to the great variety of mesophilic aerobic bacteria and food infection process (production line, packaging, touching the surface, among others). These are real conditions of the products and must be taken into account.

Finally, few studies have assessed the efficacy of UV-A LEDs directly in food. The presented technique opens a gap in the microbiological processes in preservation and decontamination, intending to provide nutritional and safe food.

Acknowledgements

We acknowledge the support of the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) in Mexico for supporting this work through funds for projects number INFRA-2016-01, 270665, CB-2016-01, and 287818.

End of English version

References / Referencias

- Ashraf, S., Sood, M., Bandral, J., Meenakshi, T., & Manzoor, M. (2019). Food irradiation: A review. *International Journal of Chemical Studies*, 7(2), 131-136. <https://www.chemijournal.com/archives/2019/vol7issue2/PartC/7-1-217-820.pdf>
- Birmpa, A., Sfika, V., & Vantarakis, A. (2013). Ultraviolet light and ultrasound as non-thermal treatments for the inactivation of microorganisms in fresh ready-to-eat foods. *International Journal of Food Microbiology*, 167(1), 96-102. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2013.06.005>
- Cardello, A. V., Schutz, H. G., & Leshner, L. L. (2007). Consumer perceptions of foods processed by innovative and emerging technologies: A conjoint analytic study. *Innovative Food*

que requieren una disminución de su carga microbiana. Además, la luz LED UV-A tiene mayor área de cobertura, una ventaja que puede abaratar el costo de los sistemas de desinfección. No se observaron cambios en el peso con los tratamientos, ni cambios de color a simple vista, aunque sería interesante realizar un análisis de los compuestos químicos para caracterizar las propiedades en el jitomate.

Conclusiones

El sistema mecatrónico mediante luz LED UV-A diseñado para desinfectar alimentos demostró ser adecuado para alimentos frescos, ya que se observaron reducciones significativas de bacterias. El sistema se diseñó y desarrolló para el sector agroindustrial considerando su inserción como un proceso dentro de la línea de producción. Al garantizar la seguridad alimentaria, es posible controlar las dosis y el tiempo de irradiación de cada producto. De acuerdo con las necesidades, el área de irradiación se puede ampliar a lo largo de la cinta transportadora, estableciendo más matrices de luz LED UV-A.

En este experimento, no se produjeron efectos secundarios, pero es una variable que se debe analizar al utilizar este tipo de tecnología. Para la desinfección de alimentos como el ajo, el chile serrano y el tomate, la irradiación LED UV-A demostró ser un instrumento versátil, que se puede adaptar a diferentes alimentos.

La eficacia germicida se puede ver influenciada por la resistencia bacteriana debido a la gran variedad que existe de aeróbicos mesofílicos y al proceso de infección del alimento (línea de producción, embalaje, al tocar la superficie, entre otros). Lo anterior, son condiciones reales de los productos, y se deben tomar en cuenta.

Finalmente, pocos estudios han evaluado la eficacia de la luz LED UV-A directamente en los alimentos. La técnica presentada abre una brecha en los procesos microbiológicos de conservación y descontaminación, con la intención de proporcionar alimentos nutritivos y seguros.

Agradecimientos

Agradecemos el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por apoyar este trabajo a través de los proyectos número INFRA-2016-01, 270665, CB-2016-01 y 287818.

Fin de la versión en español

- Science & Emerging Technologies*, 8(1), 73-83. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2006.07.002>
- Chen, J., Loeb, S., & Kim, J. H. (2017). LED revolution: fundamentals and prospects for UV disinfection applications. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 3(2), 188-202. <https://doi.org/10.1039/C6EW00241B>
- Choi, D. S., Park, S. H., Choi, S. R., Kim, J. S., & Chun, H. H. (2015). The combined effects of ultraviolet-C irradiation and modified atmosphere packaging for inactivating *Salmonella enterica* serovar Typhimurium and extending the shelf life of cherry tomatoes during cold storage. *Food Packaging and Shelf Life*, 3, 19-30. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2014.10.005>
- Fan, X., Huang, R., & Chen, H. (2017). Application of ultraviolet C technology for surface decontamination of fresh produce. *Trends in Food Science & Technology*, 70, 9-19. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.10.004>
- Frewer, L. J., Bergmann, K., Brennan, M., Lion, R., Meertens, R., Rowe, G., Siegrist, M., & Vereijken, C. (2011). Consumer response to novel agri-food technologies: Implications for predicting consumer acceptance of emerging food technologies. *Trends in Food Science & Technology*, 22(8), 442-456. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2011.05.005>
- Gould, G. W. (1988). *Micro-Organisms in foods 4. Application of the Hazard Analysis Critical Control Point (HACCP) system to ensure microbiological safety and quality*. *Food Control*, 1(4), 246-247. [https://doi.org/10.1016/0956-7135\(90\)90080-V](https://doi.org/10.1016/0956-7135(90)90080-V)
- Green, A., Popović, V., Pierscianowski, J., Biancaniello, M., Warriner, K., & Koutchma, T. (2018). Inactivation of *Escherichia Coli*, *Listeria* and *Salmonella* by single and multiple wavelength ultraviolet-light emitting diodes. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 47, 353-361. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.03.019>
- Hosseini, F. S., Akhavan, H. R., Maghsoudi, H., Hajimohammadi-Farimani, R., & Balvardi, M. (2019). Effects of a rotational UV-C irradiation system and packaging on the shelf life of fresh pistachio. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(11), 5229-5238. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9763>
- Koutchma, T. (2009). Advances in ultraviolet light technology for non-thermal processing of liquid foods. *Food and Bioprocess Technology*, 2(2), 138-155. <https://doi.org/10.1007/s11947-008-0178-3>
- Kowalski, W. (2009). *Ultraviolet germicidal irradiation handbook: UVGI for air and surface disinfection*. Springer science & business media. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01999-9>
- Malik, S. A., Swee, T. T., Malek, N. A., & Abdul, M. R. (2017). Effects of ultraviolet light-emitting diodes (UVA-LEDs) irradiation on *Escherichia coli* for inactivation of microorganisms. *International Medical Device and Technology Conference*, 207-210. https://www.utm.my/imeditec2017/files/2017/10/P56_Effects-of-Ultraviolet-Light-Emitting-Diodes-UVA-Leds-Irradiation-on-Escherichia-Coli-for-Inactivation-of-Microorganisms.pdf
- Mandal, R., Mohammadi, X., Wiktor, A., Singh, A., & Pratap-Singh, A., (2020). Applications of pulsed light decontamination technology in food processing: An overview. *Applied Sciences*, 10(10), 3606. <https://doi.org/10.3390/app10103606>
- Muramoto, Y., Kimura, M., & Nouda, S. (2014). Development and future of ultraviolet light-emitting diodes: UV-LED will replace the UV lamp. *Semiconductor Science and Technology*, 29(8), 084004. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/29/8/084004>
- Nayga, R. M., Aiew, W., & Nichols, J. P. (2005). Information effects on consumers' willingness to purchase irradiated food products. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 27(1), 37-48. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9353.2004.00206.x>
- Nüesch-Inderbinnen, M., & Stephan, R. (2016). Fresh fruit and vegetables as vehicles of bacterial foodborne disease: A review and analysis of outbreaks registered by proMED-mail associated with fresh produce. *Journal of Food Safety and Food Quality*, 67(2), 32-39. <https://doi.org/10.2376/0003-925X-67-32>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Organización Panamericana de la Salud (OPS), Programa Mundial de Alimentos (WFP) & Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF). (2019). *Panorama de la seguridad alimentaria y nutricional en América Latina y el Caribe*. FAO, OPS, WFP and UNICEF. <http://www.fao.org/3/ca6979es/ca6979es.pdf>
- Ravindran, R., & Jaiswal, A. K. (2019). Wholesomeness and safety aspects of irradiated foods. *Food chemistry*, 285, 363-368. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.02.002>
- Sommers, C. H., Sites, J. E., & Musgrove, M. (2010). Ultraviolet light (254 nm) inactivation of pathogens on foods and stainless-steel surfaces. *Journal of food safety*, 30(2), 470-479. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4565.2010.00220.x>
- Stoops, J., Jansen, M., Claes, J., & Van Campenhout, L., (2013). Decontamination of powdery and granular foods using continuous wave UV radiation in a dynamic process. *Journal of Food Engineering*, 119, 254-259. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.05.021>
- World Health Organization (WHO). (2019). *The WHO special initiative for mental health (2019-2023): universal health coverage for mental health*. World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/310981>
- Yagi, N., Mori, M., Hamamoto, A., Nakano, M., Akutagawa, M., Tachibana, S., Takahashi, A., Ikehara, T., & Kinouchi, Y., (2007). Sterilization using 365 nm UV-LED. *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 29, 5841-5844. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2007.4353676>