

VOLUMEN (2019)

13

# tsia

TEMAS SELECTOS DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS



---

## **TSIA**

### **Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos**

UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS PUEBLA

#### **EDITORIA EN JEFE**

María Teresa Jiménez Munguía

#### **CONSEJO EDITORIAL**

Volumen 13 - 2019

Jocksan Morales Camacho

Milena Ramírez Rodrigues

#### **DISEÑO EDITORIAL**

Angélica Cabañas Ramírez

#### **CORRECCIÓN DE ESTILO**

Andrea Garza Carbajal

Román Esaú Ocotitla Huerta

Beatriz Ramírez Berttolini

TSIA, año 13, volumen 13 (2019), es una publicación anual de la Universidad de las Américas Puebla, realizada y distribuida por el Departamento de Ingeniería Química y Alimentos. Ex hacienda Sta. Catarina Mártir s/n, San Andrés Cholula, Puebla, C. P. 72810. Teléfono: (222) 229 2126, [www.udlap.mx](http://www.udlap.mx), [mariat.jimenez@udlap.mx](mailto:mariat.jimenez@udlap.mx). Editora responsable: María Teresa Jiménez Munguía. Responsable de la última actualización de este número: Servicios Web y Administración de Contenidos. Ex hacienda Santa Catarina Mártir s/n, San Andrés Cholula, Puebla, C. P. 72810. Fecha de la última modificación: 20 de agosto de 2025.

**UDLAP**®

---



# CONTENIDOS

## VOL. 13

- 07.** **Carta editorial**  
Volumen 13
- 
- 08.** **Tratamientos con pulsos de luz de alta intensidad:**  
sus aplicaciones en la industria de los alimentos  
D. González-Albarrán, E. Palou-García y A. López-Malo
- 
- 28.** **Proteínas vegetales: métodos de extracción, propiedades**  
funcionales, bioactivas y aplicaciones en alimentos  
Y. I. Delgado-García y J. I. Morales-Camacho
- 
- 44.** **Compuestos nutritivos y bioactivos del amaranto**  
(*Amaranthus hypochondriacus*)  
A. E. Peláez-Castañeda y M. A. P. Porras-Loaiza
- 
- 60.** **Combinación de luz ultravioleta de onda corta (uvc)**  
con otras tecnologías como tratamientos de  
pasteurización de alimentos líquidos  
D. L. Gómez-Sánchez, N. Ramírez-Corona y A. López-Malo
-





# Carta editorial

## VOL.13

Estimados lectores,

Con gran entusiasmo presentamos el nuevo volumen de nuestra revista, en el que continuamos destacando temas de relevancia y actualidad en el campo de la ciencia y la tecnología de alimentos. Este número recoge una colección de artículos de revisión que ilustran la diversidad y profundidad de investigación en esta disciplina. Cada contribución refleja no solo el compromiso de los autores con la excelencia académica, sino también el impacto potencial que estas investigaciones pueden tener en la industria alimentaria y en la sociedad en general.

El volumen inicia con el artículo titulado «Tratamientos con pulsos de luz de alta intensidad: sus aplicaciones en la industria de alimentos»; en este trabajo, los autores exploran los avances y perspectivas de una tecnología innovadora que promete ser una herramienta efectiva para mejorar la inocuidad y la calidad de los alimentos. Enseguida, el artículo «Proteínas vegetales: métodos de extracción, propiedades funcionales, bioactivas y aplicaciones en alimentos» analiza detalladamente las potencialidades de las proteínas de origen vegetal, un tema cada vez más relevante en el contexto de la sostenibilidad y la nutrición. El artículo «Compuestos nutritivos y bioactivos del amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*)» destaca las propiedades nutricionales y bioactivas de este grano ancestral, así como sus aplicaciones en el diseño de nuevos alimentos funcionales. Finalmente, cerramos con el artículo «Combinación de luz ultravioleta de onda corta (UVC) con otras tecnologías como tratamientos de pasteurización de alimentos líquidos», en donde se analizan estrategias híbridas que integran tecnologías emergentes para garantizar la seguridad y estabilidad de los alimentos líquidos.

Quisiera aprovechar este espacio para expresar mi más sincero agradecimiento a los autores que comparten con nosotros sus investigaciones, y particularmente a los colegas que dedican una parte significativa de su tiempo a la formación y mentoría de nuestros estudiantes, guiándolos en su desarrollo como nuevos investigadores. También extiendo mi gratitud al cuerpo editorial por su dedicación y entusiasmo en la edición y publicación de este número de la revista. La calidad de los artículos publicados en *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos (TSIA)* es un reflejo directo de la entrega y profesionalismo de todos los involucrados.

Invitamos a nuestra comunidad de lectores a reflexionar sobre los desafíos y oportunidades que plantea el desarrollo de tecnologías y productos innovadores en el sector alimentario. Confiamos en que esta edición sea de gran interés y utilidad para ustedes, y los alentamos a seguir participando activamente con nosotros. Sus comentarios y sugerencias son siempre bienvenidos.

Reciban un cordial saludo,

**Aurelio López Malo**

Profesor investigador

Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental

UDLAP



# Tratamientos con pulsos de luz de alta intensidad:

sus aplicaciones en la industria de los alimentos

---

D. González-Albarrán\*, E. Palou-García y A. López-Malo

\*Programa de Doctorado en Ciencia de Alimentos  
Correo electrónico: [david.gonzalezan@udlap.mx](mailto:david.gonzalezan@udlap.mx) • [aurelio.lopezm@udlap.mx](mailto:aurelio.lopezm@udlap.mx)

## RESUMEN

Los pulsos de luz de alta intensidad (PLAI) son una tecnología emergente para la inactivación de microorganismos patógenos y causantes del deterioro de los alimentos. Esta tecnología surge a raíz de la demanda de los consumidores por productos con mayor valor nutricional, con una «etiqueta limpia» (al eliminar aditivos) y, en general, lo más similar posible a un producto fresco. Los tratamientos con PLAI se basan en la aplicación de pulsos de luz de amplio espectro (que incluye longitudes de onda desde el infrarrojo hasta el ultravioleta), de alta energía y corta duración.

En este artículo de revisión, se tratan los aspectos fundamentales para la comprensión de los tratamientos con PLAI, con el objetivo de facilitar el diseño y estudio de procesos utilizando esta tecnología. Se presentan sus distintas aplicaciones en la industria de alimentos y se explora la viabilidad de incorporarlos a las líneas de producción.

**Palabras clave:** luz pulsada, tecnologías emergentes, tecnologías no térmicas, desinfección de alimentos.

## ABSTRACT

High intensity light pulses (HILP) are an emerging technology for the inactivation of pathogenic and spoilage microorganisms in food. This technology arises from consumer demand for products with better nutritional value, “clean label” (by eliminating food additives), and, in general, with sensory and nutritional characteristics as close as possible to those of a fresh product. Treatments with HILP are based in the application of short duration, high energy, broad-spectrum light on food. This broad-spectrum light includes wavelengths from infrared to ultraviolet.

This review paper will deal with the fundamental aspects for the comprehension of treatments with HILP with the objective to make the design and study of processes using them more accessible. Their applications in the food industry will be presented and the viability of incorporating them into manufacturing lines will be analyzed.

**Keywords:** pulsed light, emerging technologies, non-thermal technologies, food safety.

## INTRODUCCIÓN

Los pulsos de luz de alta intensidad (PLAI) son una tecnología no-térmica emergente para el control de microorganismos en alimentos. La tecnología se fundamenta en la inactivación microbiana utilizando luz pulsada de amplio espectro, mediante la cual se dañan estructuras y procesos vitales de los microorganismos deterioradores y patógenos presentes en el alimento con muy poco daño a sus características sensoriales y nutritivas. El efecto microbicida de los PLAI se deriva de los efectos foto-térmicos y fotoquímicos sobre las células y sus componentes, y requiere que el espectro de la luz pulsada contenga un componente importante de luz ultravioleta (UV). Entre los microorganismos contra los que se ha demostrado la efectividad de los PLAI se encuentran bacterias como *Listeria innocua*, *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli*, *Bacillus cereus* y *Salmonella enteritidis* (Agüero, Jagus, Martín-Belloso y Soliva-Fortuny, 2016; Anderson, Rowan, MacGregor, Fouracre y Farish, 2000; Can, Demirici, Puri y Gourama, 2014), mohos como *Aspergillus niger*, *Fusarium culmorum* y *Penicillium roqueforti* (Anderson *et al.*, 2000; Can *et al.*, 2014; Chaine, Levy, Lacour, Riedel y Carlin, 2012) y levaduras como *Saccharmyces cerevisiae* (Chaine *et al.*, 2012; Aguil.-Aguayo, Charles, Renard, Page y Carlin, 2013).

Esta tecnología (de manera similar a otras tecnologías emergentes) surge dada la demanda de los consumidores por alimentos «menos procesados», lo cual se ha interpretado como productos que se encuentren en el estado más cercano posible al alimento fresco cuando son comprados o consumidos por las personas. La tecnología comenzó a desarrollarse comercialmente en los años noventa del siglo pasado (Chen, Lung, Yang y Wang, 2015; Elmnasser *et al.*, 2007), pero sus aplicaciones aún son limitadas. En general, los fabricantes de sistemas de luz pulsada recomiendan utilizar la tecnología para la esterilización de empaques alimenticios y esta es la principal aplicación comercial de los PLAI en la actualidad. A pesar de esto, se han explorado otras opciones para su utilización, como su aplicación en alimentos líquidos como bebidas, agua potable, leche y jugos de frutas. Sus aplicaciones en alimentos sólidos son aún inciertas, aunque algunos estudios han explorado su uso en quesos, carnes, nueces, semillas y especias. El principal reto para la aplicación de la luz pulsada en esta clase de alimentos es que la desinfección se li-

mita a la superficie del producto. En productos cuya superficie es irregular, las irregularidades producen un efecto de «sombra», el cual protege a los microorganismos de la luz desinfectante. En ese sentido, los tratamientos con luz pulsada se comportan de manera similar a otros métodos de desinfección que sólo actúan sobre la superficie de los alimentos, como la desinfección con soluciones microbicidas.

En este contexto, el propósito de esta revisión es explorar los fundamentos tecnológicos de los tratamientos por PLAI, así como presentar sus actuales aplicaciones industriales, sus aplicaciones emergentes y perspectivas de sus aplicaciones futuras. Se explorarán también parámetros operacionales de los tratamientos y consideraciones para el diseño de estos, así como los posibles efectos no deseados sobre las características nutricionales, químicas y organolépticas de los alimentos. Finalmente, se evaluará el potencial de la tecnología como una alternativa para el tratamiento térmico u otros métodos de inactivación microbiana.

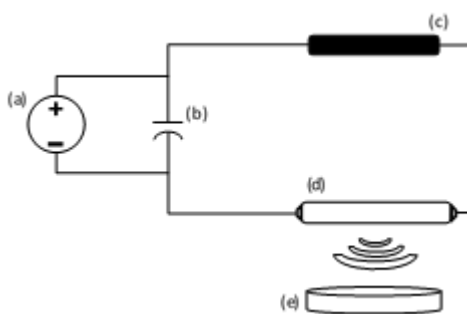
## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 1. Fundamentos de los pulsos de luz de alta intensidad

La investigación sobre el uso de pulsos luminosos de alta intensidad (PLAI), también llamados simplemente *luz pulsada* (LP), *luz blanca pulsada* o *luz pulsada de amplio espectro de alta intensidad* para la desinfección de alimentos comenzó en la década de los setenta en Japón, con la primera patente apareciendo en el año de 1984. Los derechos de dicha patente fueron comprados por la empresa PurePulse Technologies®, lo cual derivó en el primer sistema comercial para desinfección de fármacos, equipo médico, material de empaque y agua, denominado PureBright®. Sin embargo, no fue sino hasta los años noventa, cuando el proceso fue aprobado por la FDA para su uso en alimentos, que el desarrollo de aplicaciones en la industria alimentaria comenzó a acelerarse (Gómez-López, Ragaert, Debevere y Devlieghere, 2007; Heinrich, Zunabovic, Varzakas, Bergmair y Kneifel, 2016; Oms-Oliu, Martín-Belloso y Soliva-Fortuny, 2010).

En la figura 1 se puede apreciar un esquema generalizado de un sistema PLAI. El principal componente de estos sistemas

de desinfección es una lámpara de luz de amplio espectro y con alta intensidad luminosa (figura 1, d). Estas lámparas generalmente contienen xenón dentro de una cámara de cuarzo, al cual se le suministran pulsos de energía eléctrica de corta duración, pero alta energía, generando pulsos de luz con un espectro entre los 180 y los 1,100 nm de longitud de onda, el cual incluye luz en el espectro ultravioleta (UV-C, UV-A y UV-B), visible e infrarrojo (Elmnasser *et al.*, 2007). El sistema genera los pulsos de luz por medio de la combinación de un condensador (figura 1, b) y un inductor (figura 1, c). El condensador almacena energía eléctrica y posteriormente la libera de manera súbita (en solo unos pocos nanosegundos) hacia la lámpara, la cual produce en ese momento el pulso luminoso (Elmnasser *et al.*, 2007; Oms-Oliu *et al.*, 2010). El inductor permite configurar algunas características de los pulsos de luz, como su amplitud y el espectro de la luz producida (Abida, Rayees y Masoodi, 2014; Elmnasser *et al.*, 2007).



**Figura 1.**

Diagrama simplificado de un sistema de tratamiento con PLAI. (a) Fuente de energía de alto voltaje de corriente directa (DC), (b) condensador, (c) inductor, (d) lámpara, (e) objeto a desinfectar.

Para el tratamiento del material de empaque y alimentos se han desarrollado sistemas de desinfección tanto por lotes (*batch*) como continuos. Los sistemas por lotes por lo general consisten en una cámara en donde se puede colocar el alimento o material de empaque para que incida la luz sobre este. La cámara puede estar hecha de cristal o de acero inoxidable. Las primeras son más comúnmente utilizadas para fines de investigación, mientras que las segundas son más efectivas para la desinfección de alimentos, ya que el acero inoxidable actúa como material reflejante, permitiendo que

la luz incida sobre el alimento o material de empaque desde múltiples ángulos y no sólo desde la lámpara misma.

Los sistemas continuos por lo general logran la desinfección de materiales sólidos por medio de bandas transportadoras que permiten la incidencia de luz sobre el material. También se pueden fabricar sistemas para la desinfección de fluidos, en los que el alimento líquido fluye a través de una tubería dentro de la que se coloca la lámpara de luz pulsada. El alimento fluye alrededor de la lámpara a una velocidad determinada dependiendo de la dosis necesaria para la desinfección.

Recientemente se han comenzado a explorar algunas alternativas para la desinfección de polvos y granos por medio de sistemas PLAI. Algunos autores han experimentado con sistemas generadores de vórtices neumáticos para mejorar la efectividad en el tratamiento de polvos y semillas, sin embargo, se han encontrado con algunos contratiempos (Hwang, Cheigh y Chung, 2017, 2018). Más adelante se discutirán estos contratiempos con mayor detalle, junto con las clases de consideraciones que se deben hacer al diseñar un sistema de tratamiento con PLAI.

## 2. Modo de acción para la inactivación microbiana

La acción antimicrobiana de los PLAI se debe principalmente al componente ultravioleta (UV) de los pulsos luminosos. En estudios realizados por algunos autores, se logró comprobar que, si se bloquea el componente UV de la lámpara por medio de filtros, la actividad antimicrobiana se reduce significativamente. Por ejemplo, Anderson y colaboradores (2000) lograron una inactivación de 6 ciclos logarítmicos sobre *E. coli* O157:H7 por medio de PLAI. Sin embargo, utilizando lámparas modificadas para bloquear la luz UV, lograron una inactivación de tan sólo 1 ciclo logarítmico sobre la misma bacteria. Takeshita y colaboradores (2003) también mencionan que el uso de filtros para bloquear el espectro UV reduce o elimina por completo la capacidad microbicida de los PLAI.

La inactivación microbiana por medio de los PLAI actúa de manera similar a la inactivación por medio de luz UV. De acuerdo con Wuytack y colaboradores (2003), los tratamientos antimicrobianos se pueden clasificar de acuerdo con la forma en la que producen lesiones subletales en los microorganismos. Dichos autores proponen las siguientes tres clasificaciones:

1. El tratamiento daña una única estructura vital del microorganismo sin la cual no puede subsistir. En estos casos, si el tratamiento no es suficiente para matar al microorganismo, este tampoco presentará lesiones subletales, por lo que los autores los denominan tratamientos de «todo o nada». Como ejemplos de esta clase de tratamientos, los autores proponen los campos eléctricos pulsados y los tratamientos por homogeneización a alta presión.
2. El tratamiento daña una estructura vital del microorganismo, pero este cuenta con copias redundantes de dicha estructura. En estos casos, el microorganismo solo morirá si se logran destruir todas las copias de esta estructura mediante el tratamiento, de lo contrario presentará una lesión subletal.
3. El tratamiento daña múltiples estructuras vitales del microorganismo, algunas redundantes y otras únicas. En estos casos, el microorganismo morirá si se logra destruir la estructura única o todas las copias de la estructura redundante. La mayoría de los tratamientos antimicrobianos convencionales, como el tratamiento térmico y el tratamiento por alta presión, caen dentro de esta categoría.

Con base en estas clasificaciones, los autores consideran que los tratamientos con PLAI deberían clasificarse en la tercera categoría. Esto concuerda con estudios en los que se han evaluado los efectos de los PLAI sobre los microorganismos. Aguirre y colaboradores (2015) observaron que el tratamiento aplicado a *Bacillus cereus* con PLAI provoca la extensión de la fase lag y disminuye la velocidad máxima de crecimiento de las bacterias sobrevivientes al tratamiento, lo cual se debe a que los microorganismos deben reparar el daño a sus ácidos nucleicos antes de comenzar a reproducirse, al mismo tiempo que sugiere que el daño al ADN de los microorganismos se transmite a través de las generaciones. También se ha encon-

trado que los tratamientos con PLAI provocan la inducción de genes de respuesta al estrés en *Lysteria monocytogenes*, los cuales también son inducidos por factores de estrés como infección por bacteriófagos, calor, estrés osmótico y presencia de etanol en altas concentraciones (Uesugi, Hsu, Worobo y Moraru, 2016). Por otro lado, Takeshita y colaboradores (2003) encontraron que los PLAI provocan la expulsión de material citoplásmico en las células de *Saccharomyces cerevisiae*, lo cual se debe a un sobrecalentamiento del interior de la célula provocado por el efecto fototérmico de los componentes visibles e infrarrojos de los PLAI (Elmnasser *et al.*, 2007). Wekhof, Trompeter y Franken (2001) observaron un efecto similar en esporas de *Aspergillus niger* tratadas con PLAI, las cuales pudieron alcanzar temperaturas internas de hasta 120 °C, suficientes para que se observara, mediante microscopía electrónica, la fusión del medio de cultivo alrededor de las esporas destruidas. Estos efectos no siempre están presentes; por ejemplo, Levy, Aubert, Lacour y Carlin (2012) no observaron diferencias entre las estructuras de las esporas de *B. subtilis* y *A. niger* antes y después de los tratamientos con PLAI.

El hecho de que los PLAI sean capaces de dañar múltiples estructuras en los microorganismos los vuelve adecuados para desinfectar alimentos contaminados con una gran variedad de bacterias, mohos, levaduras y virus. En la tabla I se presenta una recopilación de distintos estudios en los que se ha evaluado la efectividad de los PLAI sobre distintos microorganismos.

En diversos estudios se ha observado que los PLAI son efectivos para destruir bacterias, levaduras, mohos y virus, sin embargo, la efectividad de los tratamientos es afectada por la clase de microorganismo presente en la superficie. En algunos estudios se ha reportado que los mohos son más resistentes a los tratamientos con PLAI que levaduras y bacterias (Anderson *et al.*, 2000; Chaine *et al.*, 2012). En el caso de *A. niger*, por ejemplo, se cree que la mayor resistencia se debe a la presencia de pigmentos melanoideos capaces de absorber las longitudes de onda más

dañinas para el ADN (Anderson *et al.*, 2000). Por otro lado, se cree que las bacterias también presentan diferencias en su susceptibilidad. Por ejemplo, las bacterias gramnegativas (como *S. enterica* y *E. coli*) parecen ser más susceptibles a los tratamientos con PLAI que las grampositivas, posiblemente debido a las diferencias en la estructura de sus paredes celulares (Ramos-Villaroel, Aron-Maftei, Martín-Belloso y Soliva-Fortuny, 2012). Estas diferencias en la resistencia no resultan evidentes cuando se comparan los diversos estudios que han tratado con distintos microorganismos, como se

puede apreciar en la tabla I. Es posible que las diferencias en la resistencia entre mohos, levaduras y bacterias se deban más a las condiciones de proceso, el tamaño del inóculo y el tipo de medio (o alimento), que a la resistencia intrínseca de los diferentes microorganismos (Ramos-Villaroel *et al.*, 2012). A pesar de esta controversia, es necesario considerar el tipo y cantidad de microorganismos que se encuentran comúnmente en el alimento a tratar cuando se está diseñando un tratamiento con PLAI, como se discutirá más adelante.

**Tabla I.** Estudios sobre la efectividad de tratamientos con PLAI en distintos microorganismos

Microorganismo	Carga microbiana inicial (log UFC/g o log UFC/mL)	Sustrato	Fluencia* (J/cm <sup>2</sup> )	Inactivación máxima (log UFC/mL o log UFC/g)	Referencia
<b>Bacterias</b>					
<i>Alicyclobacillus acidoterrestris</i> ATCC 49025T	5 a 6	Jarabe de sacarosa (65 y 67 °Bx)	1.86	3	Chaine <i>et al.</i> , 2012
<i>Bacillus cereus</i> CECT 131/ATCC 10876	10	Agar nutritivo fortificado	2.1	6	Aguirre <i>et al.</i> , 2015
NTCC 11145	10	Agar soya triptona suplementado con extracto de levadura	-	6 a 8	Anderson <i>et al.</i> , 2000
<i>Bacillus subtilis</i> DSM 402	5 a 6	Jarabe de sacarosa (65 y 67 °Bx)	1.86	>4	Chaine <i>et al.</i> , 2012
	6 a 9	Agar Luria Bertani y medio inerte	1.25	5	Levy <i>et al.</i> , 2012
<i>Escherichia coli</i> LRF 1.107	7	Espinaca ( <i>Spinacia oleracea</i> L. cv. Polka) (Lleida, España)	12	2.3	Agüero <i>et al.</i> , 2016
	6	Jitomate ( <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill. cv. Daniela)	8	>1	Valdivia-Nájar <i>et al.</i> , 2017

**Tabla I.** Estudios sobre la efectividad de tratamientos con PLA1 en distintos microorganismos (continuación)

Microorganismo	Carga microbiana inicial (log UFC/g o log UFC/mL)	Sustrato	Fluencia* (J/cm <sup>2</sup> )	Inactivación máxima (log UFC/mL o log UFC/g)	Referencia
<i>Escherichia coli</i> LRF 1.107	9.47	Agar bilis rojo violeta, agua destilada	0.0157	6.7	Luo <i>et al.</i> , 2014
	8	Aguacate ( <i>Presea americana</i> Mil var. Hass)	12	3.33	Ramos-Villaruel, Martín-Belloso y Soliva-Fortuny, 2011
ATCC 25922	5 a 7	Queso Cheddar (Nueva York, EE. UU.), queso blanco americano (Illinois, EE. UU.)	<12	>3	Proulx <i>et al.</i> , 2015
	7	Leche en polvo reconstituida (9.8 % s.s.), leche descremada, leche parcialmente descremada (2 % de grasa), leche entera	8.41, 14.85, 14.85, 14.85	2.05, 3.36, 2.89, 2.94	Miller, Sauer y Moraru, 2012
ATCC 11229	6 a 7.5	Discos de manzana ( <i>Malus pumila</i> var. Granny Smith)	221.1	2.25	Gómez <i>et al.</i> , 2012
DH5 $\alpha$	7	Leche de cabra (Olmúe, Chile)	10	6	Kasahara, Carrasco y Aguilar, 2015
<i>E. coli</i> O157:H7 NTCC 12079	10	Agar soya triptona suplementado con extracto de levadura	-	6	Anderson <i>et al.</i> , 2000
CECT 4972	3 <sup>b</sup>	Carpacho de res (Madrid, España)	11.9	1.2	Hierro <i>et al.</i> , 2012
	8	Fresa, mora azul	5.9	1.5, 5.4	Huang <i>et al.</i> , 2017
LFMFP 463	7.5	Cuchillos de cocina	3	4.62	Rajkovic <i>et al.</i> , 2010
932, 994, E0018, H1730, F4546, MDD 333	4 a 5	Semillas de alfalfa	504	4.80	Sharma y Demirci, 2003
<i>E. coli</i> K12 MDD 333	8	Huevo cocido	19.4	4.78 <sup>a</sup>	Macias-Rodriguez <i>et al.</i> , 2014
<i>Geobacillus stearothermophilus</i> CIP 6623T	5 a 6	Jarabe de sacarosa (65 y 67 °Bx)	1.86	>4	Chaine <i>et al.</i> , 2012
<i>Listeria innocua</i> LRF 1.117	7	Espinaca ( <i>Spinacia oleracea</i> L. cv. Polka) (Lleida, España)	12	2.6	Agüero <i>et al.</i> , 2016
NTC 11288	4 a 5 <sup>b</sup>	Queso gouda, queso manchego	0.9	3, <1	Fernández <i>et al.</i> , 2016
CECT 4030	4 a 5 <sup>b</sup>	Queso gouda, queso manchego	0.9	3, <1	Fernández <i>et al.</i> , 2016

**Tabla I.** Estudios sobre la efectividad de tratamientos con PLAI en distintos microorganismos (continuación)

Microorganismo	Carga microbiana inicial (log UFC/g o log UFC/mL)	Sustrato	Fluencia* (J/cm <sup>2</sup> )	Inactivación máxima (log UFC/mL o log UFC/g)	Referencia
CLIP 11262	6	Jitomate ( <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill. cv. Daniela)	8	<1	Valdivia-Nájar <i>et al.</i> , 2017
FSL C2-008	5 a 7	Queso cheddar (Nueva York, EE. UU.), queso blanco americano (Illinois, EE. UU.)	12	3	Proulx <i>et al.</i> , 2015
	9	Material de empaque	8	7.2	Ringus y Moraru, 2013
ATCC 33090	6 a 7.5	Discos de manzana ( <i>Malus pumila</i> var. Granny Smith)	119.4	1.7	Gómez <i>et al.</i> , 2012
LRF 1.17	8	Aguacate ( <i>Presea americana</i> Mill var. Hass)	12	2.97	Ramos-Villaruel, Martín-Belloso y Soliva-Fortuny, 2011
<i>Listeria monocytogenes</i> ATCC 43256	8	Queso blanco americano (Pensilvania, EE. UU.)	152	3.08	Can <i>et al.</i> , 2014
KCCM 40307	4	Lenguado ( <i>Paralichthys olivaceus</i> ), salmón ( <i>Salmo salar</i> ), camarón ( <i>Litopenaeus vannamei</i> ) (Busan, Corea)	12.1	1.9, 2.1, 2.4	Cheigh, Hwang y Chung, 2013
CECT 4032, CECT 746, Scott A	4 a 5 <sup>b</sup>	Salchichón, lomo curado (Madrid, España)	11.9	1.81, 1.48	Ganan <i>et al.</i> , 2013
Scott A	7 <sup>b</sup>	Jamón cocido, boloña (Madrid, España)	8.4	1.78, 1.11	Hierro <i>et al.</i> , 2011
	3 <sup>b</sup>	Carpacho de atún, carpacho de res (Madrid, España)	11.9	0.7, 0.8	Hierro <i>et al.</i> , 2012
LMG 23905	7.5	Cuchillos de cocina	3	4.57	Rajkovic <i>et al.</i> , 2010
<i>Pseudomonas fluorescens</i> 1150	5 a 7	Queso cheddar (Nueva York, EE. UU.), queso blanco americano (Illinois, EE. UU.)	<12	>3	Proulx <i>et al.</i> , 2015
<i>Salmonella</i> spp.	9.01	Agar bismuto sulfito, agua destilada	0.01547	6.45	Luo <i>et al.</i> , 2014
<i>Salmonella enterica</i> serovar Thyphimurium CECT 7159, CECT 4371, CECT 443	4 a 5 <sup>b</sup>	Salchichón, lomo curado (Madrid, España)	11.9	1.48, 1.73	Ganan <i>et al.</i> , 2013

**Tabla I.** Estudios sobre la efectividad de tratamientos con PLA1 en distintos microorganismos (continuación)

Microorganismo	Carga microbiana inicial (log UFC/g o log UFC/mL)	Sustrato	Fluencia* (J/cm <sup>2</sup> )	Inactivación máxima (log UFC/mL o log UFC/g)	Referencia
<i>Salmonella enterica</i> serovar Thyphimurium CECT 7159, CECT 4371, CECT 443	3 <sup>b</sup>	Carpacho de res (Madrid, España)	11.9	1	Hierro <i>et al.</i> , 2012
<i>S. enterica</i> serovar Enteritidis NCTC 4444	10	Agar soya triptona suplementado con extracto de levadura	-	6 a 8	Anderson <i>et al.</i> , 2000
ATCC 13076	4.5, 6 <sup>c</sup>	Huevos, huevos lavados (Madrid, España)	12	2.49, 1.85	Hierro <i>et al.</i> , 2009
<i>S. enterica</i> serotipo Newport H1275	8	Fresa, mora azul	5.9	2.1 a 4.2	Huang <i>et al.</i> , 2017
<i>S. enterica</i> subespecie <i>enterica</i> DSMZ 9898	5 a 6	Tallarines de huevo (Udine, Italia)	0.7	2.5	Manzocco <i>et al.</i> , 2014
<i>Vibrio parahaemolyticus</i> CECT 511T	3 <sup>b</sup>	Carpacho de atún	11.9	0.8	Hierro <i>et al.</i> , 2012
<b>Levaduras</b>					
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	5	Epidermis de jitomate ( <i>Lycopersicon esculentum</i> L. var Climberly) (Entressens, Francia)	4	0.9	Aguiló-Aguayo <i>et al.</i> , 2013
	5 a 6	Jarabe de sacarosa (65 y 67 °Bx)	1.23	5.4	Chaine <i>et al.</i> , 2012
CBS 1171	8.4	Medio inerte	16.92	<1	Fine y Gervais, 2004
IFO 2347	7	Solución amortiguadora de fosfato de potasio 0.067 M	3.5	7	Takeshita <i>et al.</i> , 2003
KE 162	6 a 7.5	Discos de manzana ( <i>Malus pumila</i> var. Granny Smith)	221.1	N/d	Gómez <i>et al.</i> , 2012
<b>Mohos</b>					
<i>Aspergillus niger</i> IMI 11414	9	Agar extracto de malta	-	3 a 4.5	Anderson <i>et al.</i> , 2000
ATCC 9642	4	Jarabe de sacarosa (65 y 67 °Bx)	1.2	1.3	Chaine <i>et al.</i> , 2012
FRC A-409	5	Harina de maíz (Maryland, EE. UU.)	-	4	Jun <i>et al.</i> , 2003
DSM 1988	6 a 9	Agar extracto de malta, medio inerte	1.25	5	Levy <i>et al.</i> , 2012
ATCC 16404	3	Material de empaque	0.977	<2	Turtoi y Nicolau, 2007

**Tabla I.** Estudios sobre la efectividad de tratamientos con PLAI en distintos microorganismos (continuación)

Microorganismo	Carga microbiana inicial (log UFC/g o log UFC/mL)	Sustrato	Fluencia* (J/cm <sup>2</sup> )	Inactivación máxima (log UFC/mL o log UFC/g)	Referencia
<i>A. niger</i> var. <i>cinnamomeus</i> ATCC 1027	3	Material de empaque	0.977	2	Turtoi y Nicolau, 2007
<i>Aspergillus repens</i> ATCC 44409	3	Material de empaque	0.977	<2	Turtoi y Nicolau, 2007
<i>Botrytis cinerea</i> MUCL 18864	5 a 6	Agar rosa de bengala	-	4	Marquenie <i>et al.</i> , 2003
<i>Cladosporium herbarum</i> ATCC 28987	3	Material de empaque	0.977	2.7	Turtoi y Nicolau, 2007
<i>Fusarium culmorum</i> IMI 113133	9	Agar extracto de malta	-	3 a 4.5	Anderson <i>et al.</i> , 2000
<i>Monilinia fructigena</i> CBS 101499	5 a 6	Agar extracto de malta	-	3	Marquenie <i>et al.</i> , 2003
<i>Penicillium roqueforti</i> ATCC 10110	7	Queso blanco americano (Pensilvania, EE. UU.)	152	1.32	Can <i>et al.</i> , 2014
<b>Virus</b>					
Adenovirus del grupo D	6 <sup>d</sup>	Solución salina con amortiguador de fosfato	0.23	4 <sup>d</sup>	Lamont <i>et al.</i> , 2007
Norovirus murino (MNV-1). Línea celular de macrófago murino RAW 264.7	8.7 <sup>e</sup>	Fresa, mora azul	5.9	0.9 <sup>e</sup>	Huang <i>et al.</i> , 2017
Poliovirus 1a	6 <sup>d</sup>	Solución salina con amortiguador de fosfato	0.03	6 <sup>d</sup>	Lamont <i>et al.</i> , 2007
Virus de Tulane (MNV-1). Línea celular de riñón de mono LLC-MK2	6.7 <sup>e</sup>	Solución salina con amortiguador de fosfato	4.94	>6 <sup>e</sup>	Huang <i>et al.</i> , 2017
<b>Microflora nativa</b>					
-	4 a 5	Ajonjolí ( <i>Sesamum indicum</i> L.) (Seúl, Corea del Sur)	37.85	0.99	Hwang, Cheigh y Chung, 2017
Bacterias nativas	-	Mijo glutinoso, semillas de casia ( <i>Cinnamomum cassia</i> ) (China)	54.43	0.66, 0.74	Hwang, Cheigh y Chung, 2018
	-	Jitomate ( <i>Lycopersicon esculentum</i> L. var <i>Climberly</i> ) (Entressens, Francia)	4	0.9	Aguiló-Aguayo <i>et al.</i> , 2013

**Tabla 1.** Estudios sobre la efectividad de tratamientos con PLAI en distintos microorganismos (continuación)

Microorganismo	Carga microbiana inicial (log UFC/g o log UFC/mL)	Sustrato	Fluencia* (J/cm <sup>2</sup> )	Inactivación máxima (log UFC/mL o log UFC/g)	Referencia
Bacterias nativas	89 <sup>f</sup>	Manzana ( <i>Malus pumila</i> var Granny Smith)	71.6	0.8	Gomez <i>et al.</i> , 2012
Mohos nativos	-	Fresa ( <i>Fragaria x Ananassa</i> Duch., cv. Camarosa)	47.8	42 % <sup>g</sup>	Duarte-Molina <i>et al.</i> , 2016
	147 <sup>f</sup>	Manzana ( <i>Malus pumila</i> var Granny Smith)	71.6	1	Gomez <i>et al.</i> 2012
Mohos y levaduras nativos	5.34	<i>Triticum aestivum</i> L. var Dropla (Rumania), <i>T. aestivum</i> L. var Vulgare (España)	51.2	3.81	Aron Maftai <i>et al.</i> , 2014

\* La fluencia reportada en esta tabla es la correspondiente a la inactivación máxima alcanzada en el estudio en cuestión.

<sup>a</sup> Expresado como el logaritmo del número más probable (log NMP) por mL.

<sup>b</sup> Expresado como el logaritmo de las unidades formadoras de colonia (log UFC) por cm<sup>2</sup>.

<sup>c</sup> Expresado como el logaritmo de las unidades formadoras de colonia (log UFC) por unidad.

<sup>d</sup> Expresado como el logaritmo de las unidades de cultivo de tejido infeccioso (log UCTI) por mL.

<sup>e</sup> Expresado como el logaritmo de las unidades formadoras de placa (log UFP) por mL.

<sup>f</sup> Expresado como unidades formadoras de colonia (UFC) por cm<sup>2</sup>.

<sup>g</sup> Expresado como la disminución en el porcentaje de incidencia de mohos superficiales tras 8 días de almacenamiento.

### 3. Consideraciones para el desarrollo de procesos con PLAI

Como cualquier tecnología para el tratamiento de alimentos, los PLAI tienen tanto ventajas como desventajas y condiciones en las que son más o menos efectivos. Es necesario tomar en consideración varios factores cuando se está diseñando un proceso, pues la efectividad de éste puede variar de acuerdo con el tipo de alimento con el que se está trabajando, la configuración del sistema de luz pulsada y la clase y cantidad de microorganismos que se espera encontrar. Se debe tomar en cuenta también que,

aun cuando los PLAI tienen efectos relativamente leves sobre el alimento, estos pueden ser lo suficientemente prominentes como para causar defectos de calidad.

Los principales parámetros para caracterizar un tratamiento de luz pulsada son la fluencia (J/cm<sup>2</sup>), también llamada «dosis», que se refiere a la energía recibida por la muestra de la lámpara por unidad de área, el tiempo de exposición, la amplitud del pulso, es decir, el intervalo de tiempo en el que la muestra recibe energía luminosa, la cantidad de pulsos por segundo (Hz) y la potencia máxima (W), la cual se refiere a la energía de cada

pulso dividida entre su duración. La fluencia varía en función de la distancia entre la fuente de luz y la superficie (cm), por lo que es posible ajustarla de esta manera, si no se puede cambiar la potencia suministrada a la lámpara. La determinación de la dosis luminosa es un parámetro que generalmente se obtiene de manera experimental por medio de mediciones, ya que la dosis que recibe el alimento generalmente es diferente de la intensidad luminosa obtenida directamente de la lámpara (Caminiti *et al.*, 2011a; Gómez-López *et al.*, 2007). Los principales parámetros que determinan la inactivación de microorganismos son la dosis o fluencia por pulso, el número de pulsos y la fluencia total (Artíguez y Martínez de Marañón, 2014; Cheigh, Hwang y Chung, 2013; Lasagabaster y Martínez de Marañón, 2013). Se han desarrollado modelos para la predicción de la inactivación microbiana en función de la fluencia (J/cm<sup>2</sup>).

Una ecuación que se puede utilizar para predecir la efectividad de los tratamientos con PLAI es la desarrollada por Agüero y colaboradores (2016) con base en el modelo de Weibull, el cual, de acuerdo con los autores, se ha utilizado previamente para modelar la inactivación de microorganismos por medio de tecnologías no térmicas. El modelo desarrollado por estos autores se presenta en la ecuación 1:

$$\log(N) = \log(N_0) - \left(\frac{F}{\delta}\right)^\rho$$

**Ecuación 1.**

Donde *N* es el conteo de microorganismos sobrevivientes después del tratamiento, *N*<sub>0</sub> es el conteo inicial de microorganismos en el alimento, *F* es la fluencia (J/cm<sup>2</sup>) aplicada en el tratamiento, *δ* (J/cm<sup>2</sup>) es un parámetro de escala que representa la fluencia necesaria para lograr una reducción logarítmica de los microorganismos y *ρ* es un parámetro de forma adimensional que representa la concavidad o convexidad de la curva.

Dos modelos adicionales han sido propuestos por Ferrairo, Alzamora y Guerrero (2013), los cuales toman en consideración la existencia de una subpoblación de microorganismos menos

vulnerables al tratamiento con PLAI (ecuaciones 2 y 3). Estos modelos pueden tener mejor o peor ajuste con los datos experimentales dependiendo de la clase de sistema y microorganismo que se está estudiando, por lo que es recomendable seleccionar el que tenga el mejor ajuste para la aplicación en particular. El primer modelo propuesto se define como:

$$\log(N) = \log(N_0) + \log(f \cdot e^{-kmax_1 \cdot t} + (1 - f) \cdot e^{-kmax_2 \cdot t})$$

**Ecuación 2.**

Donde *f* es la fracción de la población inicial que corresponde a la subpoblación con menor resistencia al tratamiento, (1 - *f*) es la fracción de la población inicial que corresponde a la subpoblación con mayor resistencia al tratamiento, *kmax*<sub>1</sub> y *kmax*<sub>2</sub> son las velocidades de inactivación correspondientes a cada una de las subpoblaciones, respectivamente, y *t* es el tiempo de tratamiento. El segundo modelo propuesto se presenta en la ecuación 3:

$$\log(N) = \log(N_0) + \frac{1}{1+10^\alpha} \left[ 10^{-\left(\frac{t}{\theta_1}\right)^{\rho+\alpha}} + 10^{-\left(\frac{t}{\theta_2}\right)^\rho} \right]$$

**Ecuación 3.**

Donde *ρ* es un parámetro de forma, *α* es la proporción logarítmica entre la población menos resistente *f* y la población más resistente (1 - *f*) y *θ*<sub>1</sub> y *θ*<sub>2</sub> representan los tiempos necesarios para la primera reducción logarítmica de cada subpoblación, respectivamente.

Algunos autores han propuesto el uso de un parámetro análogo al valor *D* en tratamientos térmicos, el cual se define como el incremento en la temperatura necesario para lograr una reducción logarítmica del microorganismo. En el caso de tratamientos con PLAI, esta variable podría definirse como *D<sub>pl</sub>* y describirse como el incremento en fluencia (J/cm<sup>2</sup>) necesario para obtener una reducción logarítmica del microorganism-

mo en cuestión (Aguirre *et al.*, 2015; Turtoi y Nicolau, 2007). El uso de esta variable, o de otros términos similares, es escaso en la literatura, pero podría funcionar como una forma de estandarizar los tratamientos con PLAI. Una posible razón por la cual no se ha aceptado el uso de una variable como esta es por la amplia variación en la efectividad de los tratamientos, inclusive aplicados al mismo microorganismo, en función del tipo de alimento que se está tratando. Además, en muchas situaciones no ha sido posible alcanzar una reducción logarítmica cuando se han aplicado PLAI en sistemas distintos a los llamados sistemas modelo (ver la tabla I).

La primera consideración que se debe hacer al diseñar un proceso con PLAI es que el efecto desinfectante de la luz pulsada solo puede actuar sobre la superficie de un alimento. En casos en los que se aplica en alimentos líquidos, debe considerarse que el efecto desinfectante disminuye con el grosor de la capa del alimento que la luz debe atravesar (Artíguez, Lasagabaster y Martínez de Marañón, 2011), aunque, al igual que con tratamientos térmicos, se podría considerar la generación de turbulencia al interior del tubo como una solución para la desinfección homogénea del alimento. Se ha comprobado que, en leche en polvo reconstituida a diferentes concentraciones de sólidos solubles y leche comercial con diferentes contenidos grasos, los tratamientos en un sistema turbulento son significativamente ( $p < 0.05$ ) más efectivos que los tratamientos en un sistema estacionario (Miller, Sauer y Moraru, 2012). Chaine y colaboradores (2012) definieron la luz transmitida al fluido en función del área de la sección transversal del tubo mediante la ecuación 4:

$$F_T = \frac{Q_e}{A}$$

#### Ecuación 4.

Donde  $F_T$  ( $J/cm^2$ ) es la fluencia transmitida a un punto en particular del fluido,  $Q_e$  (J) es la energía luminosa emitida por la lámpara y  $A$  ( $cm^2$ ) es el área de la sección transversal del tubo en donde se quiere calcular la fluencia.

Otra consideración que se debe hacer al diseñar un proceso con PLAI es la clase de alimento que se intenta desinfectar. Como se puede ver en la tabla I, los tratamientos con PLAI tienden a ser más efectivos cuando se aplican sobre superficies uniformes (como los medios de cultivo o superficies inertes) o sobre líquidos transparentes o translúcidos (como soluciones de sacarosa o soluciones amortiguadoras) que cuando se aplican sobre superficies irregulares o fluidos turbios (Hwang, Cheigh y Chung, 2015; Sauer y Moraru, 2009). Por ejemplo, Luo, Chen, Chen, Dong y Hou (2014) lograron una inactivación de *E. coli* en agar bilis rojo violeta de 6.7 ciclos logarítmicos con una fluencia de tan solo  $0.0157 J/cm^2$ , mientras que Agüero y colaboradores (2016) lograron una inactivación sobre la misma bacteria de tan solo 2.3 ciclos logarítmicos con una fluencia de  $12 J/cm^2$  cuando aplicaron el tratamiento con PLAI sobre la superficie de espinacas. Hierro, Ganan, Barroso y Fernández (2012) encontraron resultados similares al aplicar PLAI sobre carpacho de salmón y res, con una inactivación máxima para *E. coli* O157:H7 de tan sólo 1.2 ciclos logarítmicos a una fluencia de  $11.9 J/cm^2$ . Otro ejemplo de este efecto se puede ver en el estudio realizado por Fernández, Hospital, Arias y Hierro (2016), en el que los autores lograron una inactivación contra *L. innocua* de hasta 3 ciclos logarítmicos con  $0.9 J/cm^2$  de fluencia al aplicar PLAI sobre la superficie de queso gouda, sin embargo, no lograron más de un ciclo logarítmico cuando aplicaron PLAI con la misma fluencia sobre queso manchego. Esto se debió a que la superficie del queso gouda es lisa, mientras que la del queso manchego es rugosa. Un resultado similar fue encontrado por Huang, Ye, Cao y Chen (2017), quienes lograron una inactivación de *Salmonella enterica* de 4.2 ciclos logarítmicos en mora azul, pero tan solo 2.1 ciclos logarítmicos en fresa debido a la superficie rugosa de esta última. Como se puede ver por estos últimos ejemplos, el hecho de que los PLAI sean menos efectivos sobre superficies rugosas no necesariamente significa que no se puedan aplicar sobre alimentos sólidos.

Otra consideración que se debe hacer al implementar tratamientos con PLAI es el número inicial de microorganismos en el alimento. Resulta evidente que si se utilizan los tratamientos con PLAI para desinfectar alimentos cuya carga microbiana

inicial es baja, es posible eliminar los microorganismos objetivo en su totalidad, mientras que si la carga microbiana inicial es alta, resulta muy probable que existan sobrevivientes (Aron Maftai, Ramos-Villaroel, Nicolau, Martín-Belloso y Soliva-Fortuny, 2014). En algunos estudios en los que se ha evaluado el efecto del tamaño de inóculo inicial se ha observado que si bien la reducción aumenta conforme aumenta el tamaño del inóculo, el conteo final de microorganismos se mantiene constante sin importar el tamaño del inóculo inicial. Se cree que esto se debe a que solo los microorganismos que son expuestos directamente a la luz mueren, mientras que un número de microorganismos sobrevive debido a que los microorganismos más superficiales bloquean la luz (Oms-Oliu *et al.*, 2010; Woodling y Moraru, 2007). Esto es de particular importancia en la desinfección de alimentos sólidos. Como se ha mencionado anteriormente, en el caso de los alimentos líquidos, la turbidez del medio afecta la efectividad del tratamiento con PLAI; sin embargo, no existen aún estudios en los que se reporte el efecto que pudiera llegar a tener la turbidez generada por el contenido microbiano de un alimento líquido y si esta tiene siquiera efectos relevantes sobre la efectividad de los tratamientos con PLAI.

Adicionalmente, existen algunos pretratamientos que pueden interferir con la efectividad de los PLAI. Gómez y colaboradores (2012) encontraron que la aplicación de un pretratamiento con ácido ascórbico al alimento (manzanas en rebanadas) disminuyó la efectividad del posterior tratamiento con PLAI debido al efecto antioxidante del ácido ascórbico. Es importante recordar que el daño al ADN de los microorganismos causado por el componente ultravioleta de los PLAI se debe también a la creación de especies reactivas de oxígeno, como el peróxido de hidrógeno y el ozono.

Las reducciones en el contenido microbiano encontradas por los diversos estudios con PLAI son similares o mayores a las logradas con otros tratamientos que actúan en la superficie de los alimentos, como las soluciones desinfectantes (DeVere y Purchase, 2007; Gonzalez, Luo, Ruiz-Cruz y Mc.Evoy, 2004; Gulati, Allwood, Hedberg y Goyal, 2001). Los PLAI tienen la ventaja añadida de no contaminar la superficie del alimento con sustancias como el hipoclorito de sodio, que pueden impartir

sabores y/o aromas desagradables al alimento, además de que se pueden aplicar directamente en alimentos líquidos, a diferencia de las soluciones desinfectantes.

Finalmente, al diseñar tratamientos con PLAI se debe considerar que los PLAI pueden tener ciertos efectos perjudiciales sobre la calidad del alimento. Este es uno de los campos en los que se está desarrollando la mayor cantidad de investigación en materia de PLAI en años recientes, por lo que se discutirá con mayor detalle a continuación.

### 3.1. Efectos de los PLAI sobre los alimentos

A pesar de tratarse de un tratamiento relativamente leve, se ha encontrado en múltiples estudios que los PLAI pueden tener algunos efectos perjudiciales sobre la calidad de los alimentos. Al igual que los efectos antimicrobianos de los PLAI, los efectos negativos sobre los alimentos se deben principalmente al componente UV de la luz pulsada. Esta radiación provoca principalmente cambios de color en los alimentos, y estos cambios son más pronunciados en alimentos con colores oscuros (Oms-Oliu *et al.*, 2010).

#### 3.1.1. Efectos sobre las cualidades sensoriales de los alimentos

En general, los efectos sobre las cualidades sensoriales de los alimentos tratados con PLAI son menores, comparados con procesos más tradicionales como los tratamientos térmicos. Ganan, Hierro, Hospital, Barroso y Fernández (2013) encontraron que los tratamientos con PLAI que aplicaron sobre salchichón y lomo curado de cerdo provocaron cambios en su color, aroma y sabor en las dos fluencias más altas que estudiaron (8.4 y 11.9 J/cm<sup>2</sup>). Estas diferencias se tradujeron en una ligera decoloración de los embutidos y en una calificación más negativa en sabor y aroma por un panel sensorial. Estos autores encontraron que, tanto instrumentalmente como por medio de paneles de jueces, estas diferencias sólo eran apreciables inmediatamente después del tratamiento con PLAI. Tras 15 días de almacenamiento, no se encontró una diferencia significativa ( $p > 0.05$ ) entre los embutidos que fueron tratados con PLAI y aquellos que no lo fueron.

Decoloraciones como las observadas por Ganan y colaboradores (2013) son reportadas, de manera similar, por otros estudios. Hierro y colaboradores (2012) encontraron que al aplicar tratamientos con fluencias menores a  $8.4 \text{ J/cm}^2$  no se provoca la pérdida de color apreciable en carpacho de res. Sin embargo, al utilizar una fluencia de  $11.9 \text{ J/cm}^2$ , un panel sensorial fue capaz de detectar una ligera decoloración. Por otro lado, se encontró también que fluencias de  $8.4 \text{ J/cm}^2$  o mayores provocaron cambios negativos en el aroma y sabor de este mismo producto, aunque el carpacho aún fue considerado aceptable por el panel sensorial a pesar de dichos cambios. En el mismo estudio se evaluó también carpacho de atún, el cual resultó más sensible al daño por PLAI, mostrando decoloración en tratamientos mayores a  $4.2 \text{ J/cm}^2$  y desarrollando sabores y aromas «sulfurosos» en tratamientos desde los  $8.4 \text{ J/cm}^2$ . En otros estudios también se han observado cambios en el color de los alimentos tras el tratamiento con PLAI. Can y colaboradores (2014) encontraron que los tratamientos con PLAI provocaron algunos cambios en el color de quesos, Agüero y colaboradores (2016) lo encontraron en espinaca, Wambura y Verghese (2011) en jamón en rebanadas, Hierro y colaboradores (2011) en productos cárnicos curados y Manzocco y colaboradores (2014) en tallarines de huevo. Los cambios en color reportados por los estudios siguen el mismo patrón de decoloración encontrado por Ganan *et al.* (2013) y Hierro *et al.* (2012).

En contraste, otros autores han reportado que los tratamientos con PLAI no afectan de manera significativa al color de los alimentos tratados. Aguiló-Aguayo y colaboradores (2013) no encontraron diferencias entre el color de jitomates tratados con PLAI y jitomates sin tratamiento; Hwang y colaboradores (2018) encontraron que los tratamientos con PLAI solo tuvieron un efecto menor sobre el color de semillas de casia y mijo; Cheigh y colaboradores (2013) no encontraron cambios de color en pescado y camarones tratados con PLAI y, finalmente, Macías-Rodríguez y colaboradores (2014) no encontraron diferencia significativa ( $p > 0.05$ ) en el color de huevo cocido tratado con PLAI y huevo sin tratamiento. Los estudios parecen indicar que los alimentos cárnicos son más susceptibles a los cambios de color debido a tratamientos con PLAI que los alimentos de origen vegetal. Esto puede deberse a que los pig-

mentos que dan color a los productos cárnicos son degradados por la luz ultravioleta de los PLAI (Hierro *et al.*, 2012; Wambura y Verghese, 2011).

Los cambios en sabor y aroma debido a los PLAI han sido evaluados solo en unos pocos estudios. Como se mencionó anteriormente, Hierro y colaboradores (2012) encontraron que los PLAI provocaron la aparición de aromas sulfurosos en carpacho de atún. El desarrollo de esta clase de aromas ha sido reportado en otros estudios con otras clases de alimentos, como queso manchego y gouda donde, de manera similar al estudio con carpacho, se encontró que los aromas indeseables desaparecieron a lo largo del almacenamiento (Fernández *et al.*, 2016). La aparición de aromas sulfurosos podría deberse a la degradación de proteínas causada por el tratamiento con PLAI. Fernández y colaboradores (2016) realizaron una evaluación de los gases en el espacio de cabeza de los quesos tratados en su estudio y encontraron algunos derivados de la degradación de aminoácidos, como el disulfuro de dimetilo.

### 3.1.2. Efectos sobre las cualidades nutricionales de los alimentos

En los pocos estudios en los que se han evaluado los cambios provocados por los PLAI en las cualidades nutricionales de los alimentos tratados, se ha encontrado que los efectos son sutiles y generalmente no afectan de manera negativa las propiedades nutritivas. En algunos estudios en los que se han evaluado alimentos derivados de plantas se ha encontrado que el tratamiento con PLAI provoca un incremento en la concentración de sustancias antioxidantes, como carotenoides en jitomate y mango (Aguiló-Aguayo *et al.*, 2013; Charles, Vidal, Olive, Filgueiras y Sallanon, 2013) y compuestos fenólicos en espinaca (Agüero *et al.*, 2016). Los autores atribuyen este aumento a una respuesta de la planta al estrés oxidativo provocado por el tratamiento.

Un efecto que se ha reportado, principalmente en alimentos de origen animal, es la degradación oxidativa de lípidos. En la sección anterior se discutió sobre los efectos sensoriales de los PLAI y se determinó que estos rara vez traen consigo cambios indeseables en el sabor y aroma de los alimentos. Una de las marcas más características de la degradación de lípidos es la

aparición de aromas y sabores relacionados con la rancidez, y en las evaluaciones sensoriales de alimentos tratados con PLAI, no se ha reportado que estos sabores aparezcan de manera prominente (Fernández *et al.*, 2016; Ganan *et al.*, 2013; Hierro *et al.*, 2011; Hierro *et al.*, 2012; Manzocco *et al.*, 2014). Esto es particularmente notable en el estudio de Fernández y colaboradores (2016), quienes encontraron un aumento significativo ( $p < 0.05$ ) en el contenido de sustancias derivadas de la degradación de lípidos en los quesos evaluados en su estudio. Se ha sugerido que la corta duración de los pulsos de luz evita la formación de una gran cantidad de esta clase de compuestos (Fine y Gervais, 2004; Hierro *et al.*, 2011). Otros autores han sugerido incluso que los pulsos de luz pueden ejercer un efecto protector sobre los lípidos durante el almacenamiento debido a la formación de compuestos antioxidantes por reacciones de pardeamiento no-enzimático propiciadas por la luz UV (Manzocco *et al.*, 2014).

Desde esta perspectiva, los PLAI parecen ser un tratamiento capaz de preservar de manera casi intacta las propiedades nutritivas de los alimentos. Es necesario realizar una mayor cantidad de estudios que se enfoquen en este aspecto, pues la cantidad de información disponible y la clase de alimentos que se han estudiado aún es reducida.

#### 4. Aplicaciones de los PLAI

De acuerdo con lo que se ha discutido hasta el momento, los PLAI presentan ciertas aplicaciones prometedoras para el tratamiento de alimentos. Se puede ver que el factor limitante más importante para su aplicación efectiva en alimentos sólidos es la textura de la superficie del alimento a tratar, pues los tratamientos más efectivos se han aplicado sobre alimentos con superficie lisa. Otro factor que se debe considerar es que el aparato de desinfección debe permitir la incidencia de luz sobre la mayor proporción posible de la superficie del alimento. A tal efecto, se han utilizado sistemas que permiten la rotación de las partículas alimentarias de tal forma que la luz incida sobre todas sus caras para incrementar significativamente la efectividad de los tratamientos con PLAI (Hwang *et al.*, 2018). Con estas consideraciones en mente, se puede ver en la tabla I que se han logrado inactivaciones de más de 1 ciclo logarítmico en frutas, hojas, semillas, productos lácteos, huevos, productos cárnicos, pescados,

mariscos y alimentos en polvo. Muchos de estos estudios se han hecho en condiciones que podrían considerarse no óptimas: a escala laboratorio, con sistemas en los que la luz incide en una sola cara del alimento y con inóculos grandes.

En alimentos líquidos, las aplicaciones de los PLAI son más evidentes. Se puede ver también en la tabla I que la efectividad de los tratamientos es mayor cuando se aplica sobre microorganismos en suspensión. En alimentos, los pulsos de luz se han aplicado efectivamente para pasteurizar leche en frío (Krishnamurthy *et al.*, 2004; Smith *et al.*, 2002), así como jugos de naranja y manzana (Pataro *et al.*, 2011). Debe de considerarse también la capacidad del fluido de absorber luz en el espectro UV, así como diseñarse el sistema de tal modo que la capa del fluido que la luz debe atravesar sea lo más delgada posible y considerar utilizar un sistema de enfriamiento para el alimento, a fin de evitar una elevación excesiva de la temperatura con los cambios sensoriales que esta conlleva (Oms-Oliu *et al.*, 2010; Pataro *et al.*, 2011).

Recientemente se han comenzado a explorar algunas alternativas para la desinfección de polvos y granos por medio de tratamientos con PLAI. En algunos estudios se ha probado la efectividad de los PLAI para desinfectar esta clase de alimentos por medio de un sistema por lotes, logrando inactivaciones de entre 3.8 y 4 ciclos logarítmicos en trigo y harina de maíz, respectivamente (Jun, Irudayaraj, Demirci y Geiser, 2003; Aron Maftai *et al.*, 2014). Otros autores han intentado desarrollar sistemas continuos para el tratamiento de semillas. Por ejemplo, Hwang y colaboradores (2017, 2018), desarrollaron un sistema de luz pulsada con un componente neumático para el transporte de semillas. Los autores esperaban que la formación de un vórtice dentro de la cámara de tratamiento ayudara en exponer a las semillas a los pulsos de luz de manera más uniforme y así lograr incrementar la efectividad del tratamiento. En estos estudios se lograron inactivaciones de hasta 0.99 ciclos logarítmicos en ajonjolí, 0.74 en semillas de casia y 0.66 en mijo. En contraste, cuando los autores utilizaron un sistema en el que las semillas eran transportadas por medio de una banda, la reducción fue mayor en el caso de las semillas de casia (2.63 log), pero no en el caso del mijo (0.55 log). En este caso, los autores se cuestionaron si la razón por la cual el sistema de transporte neumático resultó menos efectivo

(en el caso de las semillas de casia) fue que las semillas no lograron rotar sobre su propio eje mientras se encontraban dentro de dicho sistema. Siendo que la fuente de luz se encontraba en el centro de la cámara y que las semillas giraban en torno a ella debido al efecto vórtice, la efectividad del sistema se habría visto reducida si las semillas no presentaron rotación y solo una cara de la semilla fue expuesta a la luz durante el tratamiento.

Una aplicación interesante de los PLAI es la desinfección del alimento post-empaque. La utilización de empaques transparentes a la luz UV permitiría procesar alimento que ya ha sido empacado. Algunos estudios han evaluado esta posibilidad. Por ejemplo, Can y colaboradores (2014) no encontraron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) en la inactivación de *P. roqueforti* y *L. monocytogenes* en queso americano sin empacar y empacado en polipropileno. La mayoría de los estudios realizados sobre el tratamiento de alimentos post-empaque con PLAI apunta a que el uso de material de empaque plástico transparente no impide la desinfección del alimento; sin embargo, es posible que el empaque en material de vidrio sí lo haga (Heinrich, Zunabovic, Bergmair, Kneifel y Jäger, 2015). Can y colaboradores (2014) observaron ligeros cambios en las propiedades físicas del material de empaque después del tratamiento que sugieren que la degradación de este es posible, pero no afecta de manera importante su calidad del empaque. El hecho de que los PLAI se utilizan más comúnmente para la esterilización de material de empaque solo reafirma esta noción (Chen *et al.*, 2015).

En esta revisión se han expuesto únicamente las aplicaciones de la tecnología de PLAI por sí sola; sin embargo, existen algunos estudios en los que se ha utilizado en forma conjunta con otras tecnologías para un mayor efecto antimicrobiano (Caminiti *et al.*, 2011a; Caminiti *et al.*, 2011; Ferrario, Alzamora y Guerrero, 2015; Muñoz *et al.*, 2011; Muñoz *et al.*, 2012; Palgan *et al.*, 2011;). Por lo tanto, es importante considerar investigar la aplicación de PLAI en conjunto con otros tratamientos para la inactivación microbiana, tanto tradicionales como emergentes.

## CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

La tecnología de desinfección por pulsos de luz de alta intensidad aún está en su infancia. Presenta aplicaciones prometedoras en el campo de los alimentos mínimamente procesados y en los alimentos listos para consumir (RTE, por sus siglas en inglés), pero hace falta un mayor desarrollo de la tecnología y más investigaciones que vayan más allá de las pruebas *in vitro*. El diseño de sistemas y procesos para el tratamiento continuo de alimentos es un área en particular que no ha sido explorada con la profundidad necesaria. Estudios como los de Pataro y colaboradores (2011), Hwang y colaboradores (2017, 2018) y Chaine y colaboradores (2012) muestran, tanto que los tratamientos continuos son un desarrollo viable para la tecnología de PLAI, como la falta de investigación que hay en este campo de aplicación.

En un futuro es posible que los PLAI sean un método establecido más para la desinfección de alimentos gracias a la flexibilidad con la que se pueden incorporar a procesos ya existentes o utilizarse por sí solos. Impulsar el desarrollo de esta tecnología puede significar importantes ganancias, tanto científicas como económicas, así como mejorar la calidad de los alimentos que consumimos en el día a día y ayudar a la prevención del desperdicio alimentario. Los autores esperan que esta revisión sea de utilidad para aquellos interesados en los tratamientos con PLAI.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) —hoy Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)— y a la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP) por los recursos aportados.

## REFERENCIAS

- Abida, J., Rayees, B. y Masoodi, F. A. (2014). Pulsed light technology: a novel method for food preservation. *International Food Research Journal*, 21(3), 839-848.
- Agüero, V. M., Jagus, R. J., Martín-Belloso, O. y Soliva-Fortuny, R. (2016). Surface decontamination of spinach by intense pulsed light treatments: Impact on quality attributes. *Postharvest Biology and Technology*, 121, 118-125.
- Aguiló-Aguayo, I., Charles, F., Renard, C. M. G. C., Page, D. y Carlin, F. (2013). Pulsed light effects on surface decontamination, physical qualities and nutritional composition of tomato fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 86, 29-36.
- Aguirre, J. S., García de Fernando, G., Hierro, E., Hospital, X. F., Ordoñez, J. A. y Fernández, M. (2015). Estimation of the growth kinetic parameters of *Bacillus cereus* spores as affected by pulsed light treatment. *International Journal of Food Microbiology*, 202, 20-26.
- Anderson, J. G., Rowan, N. J., MacGregor, S. J., Fouracre, R. A. y Farish, O. (2000). Inactivation of Food-Borne Enteropathogenic Bacteria and Spoilage Fungi Using Pulsed-Light. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 28(1), 83-88.
- Aron Maftai, N., Ramos-Villarreal, A. Y., Nicolau, A. I., Martín-Belloso, O. y Soliva-Fortuny, R. (2014). Pulsed light inactivation of naturally occurring moulds on wheat grain. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94, 721-726.
- Artíguez, M. L., Lasagabaster, A. y Martínez de Marañón, I. (2011). Factors affecting microbial inactivation by Pulsed Light in a continuous flow-through unit for liquid products treatment. *Procedia Food Science*, 1, 786-791.
- Artíguez, M. L. y Martínez de Marañón, I. (2014). Process Parameters Affecting *Listeria innocua* Inactivation by Pulsed Light. *Food and Bioprocess Technology*, 7, 2759-2765.
- Caminiti, I. M., Noci, F., Muñoz, A., Whyte, P., Morgan, D. J., Cronin, D. A. y Lyng, J. G. (2011a). Impact of selected combinations of non-thermal processing technologies on the quality of an apple and cranberry juice blend. *Food Chemistry*, 124, 1387-1392.
- Caminiti, I. M., Palgan, I., Noci, F., Muñoz, A., Whyte, P., Cronin, D. A., ... y Lyng, J. G. (2011b). The effect of pulsed electric fields (PEF) in combination with high intensity light pulses (HILP) on *Escherichia coli* inactivation and quality attributes in apple juice. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 12(2), 118-123.
- Can, F. O., Demirci, A., Puri, V. M. y Gourama, H. (2014). Decontamination of Hard Cheeses by Pulsed uv Light. *Journal of Food Protection*, 77(10), 1723-1731.
- Chaine, A., Levy, C., Lacour, B., Riedel, B. y Carlin, F. (2012) Decontamination of Sugar Syrup by Pulsed Light. *Journal of Food Protection*, 75(5), 913-917.
- Charles, F., Vidal, V., Olive, F., Filguerias, H. y Sallanon, H. (2013). Pulsed light treatment as new method to maintain physical and nutritional quality of fresh-cut mangoes. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 18, 190-195.
- Chen, B. Y., Lung, H. M., Yang, B. B. y Wang, C. Y. (2015). Pulsed light sterilization of packaging materials. *Food Packaging and Shelf Life*, 5, 1-9.
- Cheigh, C. I., Hwang, H. J. y Chung, M. S. (2013). Intense pulsed light (IPL) and UV-C treatments for inactivating *Listeria monocytogenes* on solid medium and seafoods. *Food Research International*, 54, 745-752.
- DeVere, E. y Purchase, D. (2007). Effectiveness of domestic antibacterial products in decontaminating food contact surfaces. *Food Microbiology*, 24, 425-430.
- Duarte-Molina, F., Gómez, P. L., Castro, M. A. y Alzamora, S. M. (2016). Storage quality of strawberry fruit treated by pulsed light: fungal decay, water loss and mechanical properties. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 34, 267-274.
- Elmnasser, N., Guillou, S., Leroi, F., Orange, N., Bakhrouf, A. y Federighi, M. (2007). Pulsed-light system as a novel food decontamination technology: a review. *Canadian Journal of Microbiology*, 53, 813-821.
- Fernández, M., Hospital, X. F., Arias, K. y Hierro, E. (2016). Application of Pulsed Light to Sliced Cheese: Effect on *Listeria* inactivation, Sensory Quality and Volatile Profile. *Food and Bioprocess Technology*, 9(8), 1335-1344.
- Ferrairo, M., Alzamora, S. M. y Guerrero, S. (2013). Inactivation kinetics of some microorganisms in apple, melon, orange and strawberry juices by high intensity light pulses. *Journal of Food Engineering*, 118, 302-311.
- Ferrario, M., Alzamora, S. M. y Guerrero, S. (2015). Study of the inactivation of spoilage microorganisms in apple juice by pulsed light and ultrasound. *Food Microbiology*, 46, 635-642.
- Fine, F. y Gervais, P. (2004). Efficiency of Pulsed uv Light for Microbial Decontamination of Food Powders. *Journal of Food Protection*, 67(4), 787-792.
- Ganan, M., Hierro, E., Hospital, X. F., Barroso, E. y Fernández, M. (2013). Use of pulsed light to increase the safety of ready-to-eat cured meat products. *Food Control*, 32, 512-517.
- Gómez, P. L., García-Loredo, A., Nieto, A., Salvatori, D. M., Guerrero, S. y Alzamora, S. M. (2012a). Effect of pulsed light combined with an antibrowning pretreatment on quality of fresh cut apple. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 16, 102-112.
- Gómez, P. L., Salvatori, D. M., García-Loredo, A. y Alzamora, S. M. (2012b). Pulsed Light Treatment of Cut Apple: Dose Effect on Color, Structure and Microbiological Stability. *Food and Bioprocess Technology*, 5, 2311-2322.

- Gómez-López, V. M., Ragaert, P., Debevere, J. y Devlieghere, F. (2007). Pulsed light for food decontamination: a review. *Trends in Food Science and Technology*, 18, 464-473.
- Gonzalez, R. J., Luo, Y., Ruiz-Cruz, S. y McEvoy, J. L. (2004). Efficacy of Sanitizers to Inactivate *Escherichia coli* O157:H7 on Fresh-Cut Carrot Shreds under Simulated Process Water Conditions. *Journal of Food Protection*, 67(11), 2375-2380.
- Gulati, B. R., Allwood, P. B., Hedberg, C. W. y Goyal, S. M. (2001). Efficacy of Commonly Used Disinfectants for the Inactivation of Calicivirus on Strawberry, Lettuce, and a Food-Contact Surface. *Journal of Food Protection*, 64(9), 1430-1434.
- Heinrich, V., Zunabovic, M., Bergmair, J., Kneifel, W. y Jäger, H. (2015). Post packaging application of pulsed light for microbial decontamination of solid foods: A Review. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 30, 145-156.
- Heinrich, V., Zunabovic, M., Varzakas, T., Bergmair, J. y Kneifel, W. (2016). Pulsed Light Treatment of Different Food Types with a Special Focus on Meat: A Critical Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(4), 591-613.
- Hierro, E., Barroso, E., de la Hoz, L., Ordóñez, J. A., Manzano, S. y Fernández, M. (2011). Efficacy of pulsed light for shelf-life extension and inactivation of *Listeria monocytogenes* on ready-to-eat cooked meat products. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 12, 275-281.
- Hierro, E., Ganan, M., Barroso, E. y Fernández, M. (2012). Pulsed light treatment of selected pathogens and the shelf-life extension of beef and tuna carpaccio. *International Journal of Food Microbiology*, 158, 42-48.
- Hierro, E., Manzano, S., Ordóñez, J. A., de la Hoz, L. y Fernández, M. (2009). Inactivation of *Salmonella enterica* serovar Enteritidis on shell eggs by pulsed light technology. *International Journal of Food Microbiology*, 135, 125-130.
- Huang, Y., Ye, M., Cao, X. y Chen, H. (2017). Pulsed light inactivation of murine norovirus, Tulane virus, *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella* in suspension and on berry surfaces. *Food Microbiology*, 61, 1-4.
- Hwang, H. J., Cheigh, C. I. y Chung, M. S. (2015). Relationship between optical properties of beverages and microbial inactivation by intense pulsed light. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 31, 91-96.
- Hwang, H. J., Cheigh, C. I. y Chung, M. S. (2017). Construction of a pilot-scale continuous-flow intense pulsed light system and its efficacy in sterilizing sesame seeds. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 39, 1-6.
- Hwang, H. J., Cheigh, C. I. y Chung, M. S. (2018). Comparison of bactericidal effects of two types of pilot-scale intense-pulsed-light devices on cassia seeds and glutinous millet. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 49, 170-175.
- Jun, S., Irudayaraj, J., Demirci, A. y Geiser, D. (2003). Pulsed uv-light treatment of corn meal for inactivation of *Aspergillus niger* spores. *International Journal of Food Science and Technology*, 38, 883-888.
- Kasahara, I., Carrasco, V. y Aguilar, L. (2015). Inactivation of *Escherichia coli* in goat milk using pulsed ultraviolet light. *Journal of Food Engineering*, 152, 43-49.
- Krishnamurty, K., Demirci, A. e Irudayaraj, J. (2004). Inactivation of *Staphylococcus aureus* by Pulsed UV Light Sterilization. *Journal of Food Protection*, 67(5), 1027-1030.
- Lamont, Y., Rzeżutka, A., Anderson, J. G., MacGregor, S. J., Given, M. J., Deppe, C. y Cook N. (2007). Pulsed uv-light inactivation of poliovirus and adenovirus. *Letters in Applied Microbiology*, 45, 564-567.
- Lasagabaster, A. y Martínez de Marañón, I. (2013). Impact of Process Parameters on *Listeria innocua* Inactivation Kinetics by Pulsed Light Technology. *Food and Bioprocess Technology*, 6, 1828-1836.
- Levy, C., Aubert, X., Lacour, B. y Carlin, F. (2012). Relevant factors affecting microbial surface decontamination by pulsed light. *International Journal of Food Microbiology*, 152, 168-174.
- Luo, W., Chen, A., Chen, M., Dong, W. y Hou, X. (2014). Comparison of sterilization efficiency of pulsed and continuous uv light using tunable frequency uv system. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 26, 220-225.
- Macias-Rodriguez, B., Yang, W., Schneider, K. y Rock, C. (2014). Pulsed uv light as a postprocessing intervention for decontamination of hard-cooked peeled eggs. *International Journal of Food Science and Technology*, 49, 2472-2480.
- Manzocco, L., Maifreni, M., Anese, M., Munari, M., Bartolomeoli, I., Zanardi, S., ... y Nicolì, M. C. (2014). Effect of Pulsed Light on Safety and Quality of Fresh Egg Pasta. *Food and Bioprocess Technology*, 7(7), 1973-1980.
- Marquenie, D., Geeraerd A. H., Lammertyn, J., Soontjens C., Van Impe, J. F., Michiels C. W. y Nicolai, B. M. (2003). Combinations of pulsed white light and uv-c or mild heat treatment to inactivate conidia of *Botrytis cinerea* and *Monilia fructigena*. *International Journal of Food Microbiology*, 85(1-2), 185-196.

- Miller, B. M., Sauer, A. y Moraru, C. I. (2012). Inactivation of *Escherichia coli* in milk and concentrated milk using pulsed-light treatment. *Journal of Dairy Science*, 95, 5597-5603.
- Muñoz, A., Caminiti, I. M., Palgan, I., Pataro, G., Noci, F., Morgan, D. J., ... y Lyng, J. G. (2012). Effects on *Escherichia coli* inactivation and quality attributes in apple juice treated by combinations of pulsed light and thermosonication. *Food Research International*, 45(1), 299-305.
- Muñoz, A., Palgan, I., Noci, F., Morgan, D. J., Cronin, D. A., Whyte, P. y Lyng, J. G. (2011). Combinations of High Intensity Light Pulses and Thermosonication for the Inactivation of *Escherichia coli* in Orange Juice. *Food Microbiology*, 28(6), 1200-1204.
- Martín-Belloso, O., Oms-Oliu, G. y Soliva-Fortuny, R. (2010). Pulsed Light Treatments for Food Preservation. A review. *Food and Bioprocess Technology*, 3(1), 13-23.
- Palgan, I., Caminiti, I. M., Muñoz, A., Noci, F., Whyte, P., Morgan, D. J., ... y Lyng, J. G. (2011). Combined effect of selected non-thermal technologies on *Escherichia coli* and *Pichia fermentans* inactivation in apple and cranberry juice blend and on product shelf life. *International Journal of Food Microbiology*, 151(1), 1-6.
- Pataro, G., Muñoz, A., Palgan, I., Noci, F., Ferrari, G. y Lyng, J. G. (2011). Bacterial inactivation in fruit juices using a continuous flow Pulsed Light (PL) system. *Food Research International*, 44, 1642-1648.
- Proulx, J., Hsu, L. C., Miller, B. M., Sullivan, G., Paradis, K. y Moraru, C. I. (2015). Pulsed-light inactivation of pathogenic and spoilage bacteria on cheese surface. *Journal of Dairy Science*, 98, 5890-5898.
- Rajkovic, A., Tomasevic, I., Smigic, N., Uyttendaele, M., Radovanovic, R. y Devlieghere, F. (2010). Pulsed uv light as an intervention strategy against *Listeria monocytogenes* and *Escherichia coli* O157:H7 on the surface of a meat slicing knife. *Journal of Food Engineering*, 100, 446-451.
- Ramos-Villaroel, A. Y., Aron-Maftei, N., Martín-Belloso, O. y Soliva-Fortuny, R. (2012). The role of pulsed light spectral distribution in the inactivation of *Escherichia coli* and *Listeria innocua* on fresh-cut mushrooms. *Food Control*, 24, 206-213.
- Ringus, D. L. y Moraru, C. I. (2013). Pulsed Light inactivation of *Listeria innocua* on food packaging materials of different surface roughness and reflectivity. *Journal of Food Engineering*, 114, 331-337.
- Sauer, A. y Moraru, C. I. (2009). Inactivation of *Escherichia coli* ATCC 25922 and *Escherichia coli* O157:H7 in Apple Juice and Apple Cider, Using Pulsed Light Treatment. *Journal of Food Protection*, 72(5), 937-944.
- Sharma, R. R. y Demirci, A. (2003). Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 on Inoculated Alfalfa Seeds with Pulsed Ultraviolet Light and Response Surface Modeling. *Journal of Food Science*, 68(4), 1448-1453.
- Smith, W. L., Lagunas-Solar, M. C. y Cullor, J. S. (2002). Use of Pulsed Ultraviolet Laser Light for the Cold Pasteurization of Bovine Milk. *Journal of Food Protection*, 65(9), 1480-1482.
- Takeshita, K., Shibato, J., Sameshima, T., Fukunaga, S., Isobe, S., Arihara, K. e Itoh, M. (2003). Damage of yeast cells induced by pulsed light irradiation. *International Journal of Food Microbiology*, 85, 151-158.
- Turtoi, M. y Nicolau, A. (2007). Intense light pulse treatment as alternative method for mould spores destruction on paper-polyethylene packaging material. *Journal of Food Engineering*, 83, 47-53.
- Uesugi, A. R., Hsu, L. C., Worobo, R. W. y Moraru, C. I. (2016). Gene expression analysis for *Listeria monocytogenes* following exposure to pulsed light and continuous ultraviolet light treatments. *LWT - Food Science and Technology*, 68, 579-588.
- Valdivia-Nájar, C. G., Martín-Belloso, O., Giner-Seguí, J., Soliva-Fortuny, R. (2017). Modeling the Inactivation of *Listeria innocua* and *Escherichia coli* in Fresh Cut Tomato Treated with Pulsed Light. *Food and Bioprocess Technology*, 10, 166-274.
- Wambura, P. y Verghese, M. (2011). Effect of pulsed ultraviolet light on quality of sliced ham. *LWT - Food Science and Technology*, 44, 2173-2179.
- Wekhof, A., Trompeter, F. J. y Franken, O. (2001). Pulsed uv Disintegration (PUVD): a new sterilization mechanism for packaging and broad medical-hospital applications. *The First International Conference on Ultraviolet Technologies*. Washington D. C. <https://pdfs.semanticscholar.org/b2b4/c4ba5de85cd99efee776da9b71c93b6761e5.pdf>
- Wuytack, E. Y., Phuong, D. T., Aertsen, A., Reyns, K. M. F., Marquenie, D., De Ketelaere, B., ... y Michiels, C. W. (2003). Comparison of Sublethal Injury Induced in *Salmonella enterica* Serovar Typhimurium by Heat and by Different Nonthermal Treatments. *Journal of Food Protection*, 66(1), 31-37.

# Proteínas vegetales:

métodos de extracción, propiedades funcionales,  
bioactivas y aplicaciones en alimentos

Y. I. Delgado-García\* y J. I. Morales-Camacho

\*Programa de Doctorado en Ciencia de Alimentos

Correo electrónico: [yolanda.delgadoga@udlap.mx](mailto:yolanda.delgadoga@udlap.mx) • [jocksan.morales@udlap.mx](mailto:jocksan.morales@udlap.mx)

## RESUMEN

**E**l uso de proteínas en la industria de alimentos, como ingrediente que mejore o aporte ciertas características sensoriales y nutricionales en los productos alimenticios, ha llevado al estudio de las propiedades tecnofuncionales y bioactivas de estos polímeros. Los métodos aplicados para producir proteínas modificadas que se pueden emplear de forma específica en ciertos productos bajo distintas condiciones de elaboración, y al mismo tiempo se aprovechen al máximo sus propiedades, también han sido explorados. Estas propiedades tecnofuncionales y bioactivas están en función de la estructura y conformación molecular de las proteínas, así como de los factores ambientales que las rodean. El objetivo de esta revisión es proporcionar información sobre las proteínas vegetales y su aplicación en alimentos, además del efecto que provocan las técnicas y condiciones de extracción e hidrólisis sobre la estructura molecular y propiedades funcionales y bioactivas de dichas proteínas.

**Palabras clave:** proteínas vegetales, extracción de proteínas, hidrolizados proteínicos, propiedades funcionales, propiedades bioactivas.

## ABSTRACT

The use of proteins in the food industry as an ingredient that improves or provides certain sensory and nutritional characteristics in food products has led to the study of the techno-functional and bioactive properties of these polymers. The methods of obtaining applied to produce modified proteins that can be used specifically in certain products under different processing conditions, while at the same time taking full advantage of their properties, have also been studied. These techno-functional and bioactive properties are related to the structure and molecular conformation of the proteins, as well as the environmental factors that surround them. The objective of this review is to provide information on vegetable proteins and their application in food, in addition to the effect caused by the extraction and hydrolysis techniques and conditions on the molecular structure, functional and bioactive properties of these proteins.

**Keywords:** vegetable proteins, proteins extraction, protein hydrolysates, functional properties, bioactive properties.

## INTRODUCCIÓN

A nivel mundial se han cultivado poco más de 6,000 especies vegetales para producir alimentos, de las cuales solo 9 especies (caña de azúcar, maíz, arroz, trigo, papas, soya, el fruto de la palma de aceite, la remolacha y la yuca) representan más del 66 % de la producción total de cultivos (FAO, 2018), dejando fuera miles de especies con posible potencial como fuente de proteína alimentaria, la cual es importante en la dieta humana cuando se habla de nutrición. Así mismo, el encontrar nuevas proteínas vegetales ricas en aminoácidos esenciales es importante para la industria de alimentos, para poder utilizarlas en la preparación de alimentos balanceados nutricionalmente, e iguales en valor nutritivo que las proteínas de fuentes animales; así como en la sustitución de ingredientes para mejorar las características sensoriales y la estabilidad de los productos alimenticios, además de lograr responder a la demanda de una mejor nutrición y elevar la seguridad alimentaria mundial. Este interés por nuevas fuentes proteínicas ha llevado a un incremento en los estudios sobre el valor nutricional y las propiedades funcionales en proteínas aisladas de cereales, leguminosas, semillas oleaginosas, entre otras especies vegetales.

La extracción de proteínas de fuentes alimenticias puede realizarse por diversos métodos, sin embargo, suelen afectar la naturaleza y cantidad de proteína extraída. Estos métodos pueden emplear calor, cambios de pH, cambios en la fuerza iónica, solventes y filtros. Dichos factores afectarán la solubilidad, la composición y las características fisicoquímicas de los extractos. Cuando se realiza una extracción de la proteína presente en un alimento, se puede obtener el total de esta o separarla en fracciones o aislados dependiendo del método utilizado. También es posible obtener proteínas modificadas, a través de técnicas como la hidrólisis, que se puede desarrollar bajo condiciones químicas o enzimáticas.

La composición, estructura y propiedades fisicoquímicas de las proteínas están interrelacionadas, pues rigen su funcionalidad y actividad biológica en diferentes sistemas. Dicha funcionalidad,

a su vez es observada en el producto final del procesado de alimentos, y la actividad biológica en los beneficios que aporta a la salud humana. Por esto, la investigación de las propiedades funcionales y bioactivas de manera individual, junto con las mediciones de las propiedades fisicoquímicas de las proteínas, permiten correlacionar cada función y bioactividad con las especies proteínicas, su estructura, su composición y condiciones ambientales.

En la presente revisión se pretende proporcionar información sobre las proteínas vegetales y su aplicación en alimentos, además del efecto que provocan las técnicas y condiciones de extracción de dichas proteínas sobre la estructura molecular y sus propiedades funcionales y bioactivas.

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 1. Fuentes y características de las proteínas vegetales

Las proteínas vegetales son materiales útiles por ser seguras, altamente biocompatibles, nutritivas y de bajo costo, sin embargo, son deficientes en algunos aminoácidos esenciales. Las principales fuentes vegetales de proteína provienen de cereales, pseudocereales y leguminosas; aunque también ha habido investigaciones sobre otras fuentes como las especias, semillas, alfalfa y plantas comunes comestibles como las espinacas, sin embargo, las más estudiadas y usadas en la industria alimenticia son soya, garbanzo, frijol y cacahuate. Recientemente ha crecido el interés en los pseudocereales, tales como el amaranto, la quinua y el alforfón o trigo sarraceno por sus propiedades nutricionales (libres de gluten, alto contenido de proteínas y nutrientes esenciales) y funcionales. Además, estas especies tienen una gran adaptabilidad agroclimática, por lo que se han expandido a diferentes áreas geográficas (Alu'datt *et al.*, 2013; Mir, Riar y Singh, 2018; Piovesana *et al.*, 2018).

Las proteínas provenientes de fuentes vegetales se dividen en cuatro categorías: albúminas, globulinas, prolaminas y glu-

telinas, de acuerdo con su solubilidad en diferentes solventes, como agua, solución salina, alcohol y solución alcalina, respectivamente. Esta clasificación ayuda a entender las características nutricionales y funcionales de las plantas como fuente de alimento, por ejemplo, las proteínas que poseen los pseudocereales tienen un mejor balance de la composición de aminoácidos y valores biológicos más altos que los cereales. Se sabe que el trigo, como muchos otros cereales, tiene abundantes fracciones de prolaminas y glutelinas en su composición proteínica, las cuales juegan un papel tecnofuncional importante. En contraste, en la mayoría de las leguminosas, las fracciones proteínicas más abundantes en su composición son las albúminas y las globulinas; las mismas que predominan en los pseudocereales. En cuanto a la composición de aminoácidos, se puede encontrar mayores cantidades de lisina en los pseudocereales y leguminosas que en los cereales, ya que es el aminoácido limitante en estos últimos. También se encuentran proporciones superiores de aminoácidos azufrados como la metionina y cisteína en los pseudocereales, en comparación con algunas leguminosas y cereales (Chen *et al.*, 2018; Janssen *et al.*, 2017; Mir *et al.*, 2018).

## 2. Extracción de proteínas vegetales

Las proteínas con frecuencia se encuentran en bajas concentraciones en el material biológico crudo, por eso es necesario aplicar procesos que permitan extraerlas con un alto rendimiento y pureza, y que al mismo tiempo mantengan su función biológica. Dependiendo de la pureza que se desee obtener de la proteína, se pueden aplicar diversas técnicas de prepurificación, como la filtración, centrifugación y precipitación con sulfato de amonio y/o solventes orgánicos, y series o combinaciones de sistemas de purificación de alta resolución basados en cromatografía. Los métodos más empleados para extraer, aislar o concentrar proteína son la precipitación por calor, precipitación isoeléctrica, extracción por solubilidad (método de Osborne) y los ya mencionados anteriormente (Franco-Vega, Palou, Ramírez-Corona y López-Malo, 2017; Lee, Khoiroh, Ooi, Ling y Show, 2017).

La extracción de proteínas puede inducir cambios en la conformación y/o estructura, y en algunos casos puede desnaturar (parcialmente), y de este modo afectar las propiedades tecnofuncionales, como es el caso de las propiedades espumantes y de formación de geles. La secuencia de Osborne es un método que fue desarrollado para extraer fracciones de proteínas de granos y semillas de manera secuencial y en función de su solubilidad en distintos medios; de esta manera se pueden clasificar las fracciones para el estudio posterior de sus propiedades funcionales, fisicoquímicas y su estructura. A partir de este método se han realizado diversos estudios profundos que establecen la relación estructura-función para poder entender las estructuras primaria, secundaria y terciaria de las proteínas y sus fracciones. Por otro lado, las propiedades tecnofuncionales de cualquier tipo de proteína pueden mejorarse con la aplicación de tratamientos enzimáticos, calentamiento moderado o fosforilación, o mediante la hidrólisis enzimática con proteasas para modificar las propiedades funcionales y bioactivas de las proteínas o sus fracciones (Janssen *et al.*, 2017).

### 2.1. Aislados proteínicos

Las proteínas son macronutrientes compuestos por aminoácidos y son necesarias para el crecimiento y función del cuerpo humano, y en general de los seres vivos. Las proteínas en sus fuentes naturales normalmente están acompañadas de otros componentes. En la obtención de aislados proteínicos se busca eliminar o disminuir los componentes no proteínicos para conseguir un producto final con la concentración más alta de proteínas posible, esta característica es la que diferencia a los aislados de otros productos proteínicos como las harinas y concentrados. Los aislados proteínicos tienen ciertas características que mejoran las propiedades sensoriales (color y sabor) y funcionales, por esta razón son utilizados como ingredientes en bebidas, productos texturizados o alimentos especializados. Sin embargo, para la obtención de los aislados de proteína de fuentes biológicas pueden utilizarse diversas técnicas (Adenekan, Fadimu, Odunmbaku y Oke, 2018; Damodaran y Parkin, 2017; Garba y Kaur, 2014).

### 2.1.1. Tratamientos de obtención

Existen varios métodos de extracción de proteínas para diferentes fuentes vegetales, entre estos métodos se incluyen factores como el pH, la temperatura, el tiempo de extracción y la proporción sólido/líquido que pueden afectar el rendimiento de extracción. Sin embargo, una buena técnica de obtención de los aislados asegura una proteína altamente purificada. Dentro de los tratamientos que se aplican para la obtención de proteínas se encuentra la precipitación alcalina isoelectrica, que es el método comúnmente aplicado en la industria de extracción de proteínas. También se pueden obtener aislados por precipitación con metanol, extracción con agua, extracción con sulfato de amonio, precipitación con acetona, precipitación salina, termocoagulación, ultrafiltración o tratamientos con altas presiones, entre otros. Las altas presiones se aplican, en general, para formar estructuras entre las proteínas, modificando así su composición nutricional o sabor. Su aplicación sobre las proteínas lleva al rompimiento de los enlaces hidrofóbicos e interacciones electrostáticas, provocando por lo tanto cambios en su conformación. El grado de modificación que puede sufrir una proteína en alguna de sus propiedades depende tanto del tratamiento de altas presiones aplicado, como del tipo de proteína, pH y fuerza iónica de esta (Adenekan *et al.*, 2018; Damodaran y Parkin, 2017; Deng *et al.*, 2014; Yin, Tang, Wen, Yang y Li, 2008; Janssen *et al.*, 2017).

La aplicación de tratamientos o pretratamientos en la obtención de aislados proteínicos, en los que se hacen cambios bruscos del pH pueden mejorar algunas propiedades como la formación y estabilidad de espumas, ya que se reduce la tensión en la interfase al desdoblarse parcialmente las proteínas (Janssen *et al.*, 2017).

### 2.1.2. Efectos en la estructura y conformación de las proteínas

La aplicación de calor en la extracción de proteínas puede afectar sus propiedades funcionales y de conformación, por ejemplo, en el caso de proteínas de amaranto en condiciones alcalinas

y tratadas a 90 °C, la solubilidad disminuye porque la fracción de globulinas sufre agregación; a 70 °C la hidrofobicidad de la superficie disminuye; a 50 °C hay desdoblamiento parcial de la proteína porque se forman agregados de alto peso molecular. Estos cambios también son influenciados por el pH, pues a pH 9.0 la proteína es más sensible al calor que a pH 11.0. En la proteína 11S globulina de la quinua también se observa que el efecto del tratamiento térmico (100 °C) depende del pH, pues a pH 8.5 o 10.5 hay rompimiento de los enlaces disulfuro que conectan las subunidades ácidas con las básicas; mientras que a pH 6.5 los enlaces covalentes permanecen intactos. Sin embargo, en cualquier valor de pH hay incremento en la hidrofobicidad de la superficie de la proteína. Los cambios en las propiedades de la superficie que ocurren durante el tratamiento térmico en condiciones alcalinas pueden deberse a la desamidación de los residuos de glutamina y asparagina, o al incremento del contenido de los grupos SH libres que se generan (Janssen *et al.*, 2017).

El uso de altas presiones para la obtención de estructuras entre proteínas provoca una reducción del número de enlaces no covalentes, dando como resultado una proteína desdoblada parcialmente, esto se produce con el propósito de incrementar los niveles de grupos sulfhidrilo de los residuos de cisteína, para que estén más accesibles a las reacciones de intercambio entre dichos grupos y, por lo tanto, se formen las estructuras. Por otro lado, se ha visto que en las proteínas extraídas de alforfón aplicando tratamientos de inflado, la hidrofobicidad de la superficie se reduce (Janssen *et al.*, 2017).

### 2.2. Hidrolizados proteínicos

Los hidrolizados proteínicos son péptidos de diferentes tamaños y aminoácidos libres obtenidos de la extracción de una proteína al sufrir un ataque nucleofílico de una molécula de agua sobre el enlace peptídico, entre los grupos amino y el carboxilo del aminoácido adyacente, catalizado por una peptidasa, provocando el rompimiento (hidrólisis) del enlace peptídico. Los hidrolizados pueden clasificarse en tres grupos según su aplicación determinada por el grado de hidrólisis, es decir, por el porcen-

taje de enlaces peptídicos rotos: hidrolizados con alto grado de hidrólisis, usados generalmente como suplementos nutricionales y en dietas médicas especiales; hidrolizados con varios grados de hidrólisis, empleados como saborizantes; e hidrolizados con bajo grado de hidrólisis y características funcionales mejoradas (Karami y Akbari-adergani, 2019; Wouters, Rombouts, Fierens, Brijs y Delcour, 2016).

### 2.2.1. Tratamientos de obtención

La hidrólisis de proteínas es una herramienta que se utiliza para modificar las propiedades funcionales, nutricionales y bioactivas de las proteínas nativas, la cual puede realizarse mediante procesos enzimáticos o químicos. En estos últimos se incluyen la hidrólisis ácida y la alcalina que tienen la desventaja de ser difíciles de controlar en comparación con la enzimática, ya que se desarrolla en condiciones menos extremas de pH y temperatura, evitando así la pérdida del valor nutricional de la proteína. Una desventaja que presenta el tratamiento con enzimas es que no son capaces de hidrolizarlas totalmente, pues van perdiendo su actividad. Las proteínas pueden ser susceptibles a la hidrólisis enzimática con proteasas digestivas debido a factores como su solubilidad, complejidad estructural y composición de aminoácidos; y en el caso de las vegetales, también por la presencia de inhibidores de proteasas específicos. También se puede realizar una hidrólisis limitada al obtener un grado de hidrólisis bajo, menor al 20 %; como pretratamiento para mejorar la capacidad de formar espumas y emulsiones de los hidrolizados (Agyei, Ongkudon, Wei, Chan y Danquah, 2016; Janssen *et al.*, 2017; Sáenz de Rodríguez, Medina, Moyano y Alarcón, 2011; Tavano, 2013).

El proceso de hidrólisis de las proteínas se lleva a cabo bajo ciertas condiciones físicas, como la aplicación de calor. Las variaciones en las condiciones de hidrólisis pueden mejorar el método tradicional de la solución de digestión; también se pueden aplicar métodos alternativos para la obtención de hidrolizados, un ejemplo de esto son las altas presiones hidrostáticas, que pueden aumentar los rendimientos y reducir los costos y tiempos de reacción. Otros métodos físicos de interés reciente son los

tratamientos con radiación, campos de pulsos eléctricos y ultrasonido (Kuan, Bhat, Patras y Karim, 2013; Piovesana *et al.*, 2018; Tiengo, Faria y Netto, 2009).

Dentro de las condiciones químicas que se necesitan para la obtención de los hidrolizados proteínicos, está el ajuste o modificación del pH, que es el factor principal que influye en el proceso, ya que puede alterar el grado de hidrólisis; como se observó en hidrolizados de quinua que tuvieron un bajo grado de hidrólisis a pH alcalino (Janssen *et al.*, 2017; Tiengo *et al.*, 2009). Algunos métodos de extracción semiindustriales que se han utilizado para obtener fracciones proteínicas se basan en el uso de detergentes como el SDS y condiciones alcalinas para la posterior digestión *in vitro* con enzimas como la alcalasa (Montone *et al.*, 2018).

Las condiciones biológicas que se pueden aplicar en el proceso de hidrólisis son las requeridas para simular la digestión gastrointestinal o para la proteólisis con enzimas de plantas o microorganismos. En el caso de la proteólisis gastrointestinal, se utiliza una o la combinación de enzimas digestivas como pepsina, tripsina, quimotripsina y pancreatina para degradar las proteínas de alimentos; por ejemplo, para la pepsina normalmente se lleva a cabo en soluciones con un pH de 2.5 a 37°C y con un tiempo de reacción de entre 2 y 12 horas. También pueden obtenerse hidrolizados a partir de la fermentación con microorganismos proteolíticos, por ejemplo, el *Lactobacillus plantarum* que ha sido utilizado para fermentar frijoles y obtener péptidos bioactivos. Sin embargo, la hidrólisis enzimática tiene más ventajas que la fermentación en la obtención de péptidos bioactivos, ya que es más rápida y puede controlarse; además, los parámetros se pueden optimizar para que siempre se obtenga la misma composición de péptidos y perfiles de pesos moleculares. La hidrólisis enzimática es el proceso más adecuado para la producción de péptidos con una funcionalidad específica (Agyei *et al.*, 2016; Montone *et al.*, 2018; Piovesana *et al.*, 2018; Tiengo *et al.*, 2009).

En el proceso de hidrólisis enzimática, la elección de la enzima es fundamental cuando se desea obtener péptidos

bioactivos, pues esta puede alterar la actividad biológica de los péptidos. Existen enzimas que pueden ser específicas o no al sitio activo, por lo que las enzimas utilizadas son diferentes para la hidrólisis de distintas proteínas o para la obtención de hidrolizados con características y propiedades funcionales determinadas. También se pueden utilizar enzimas menos específicas, pero tienen la desventaja de que se pierde la información precisa de los péptidos obtenidos que se podría conseguir con el uso de las enzimas específicas. Un ejemplo es el uso de la alcalasa, una enzima poco específica, pero en la hidrólisis de proteínas de soya, salvado de arroz y papa, los resultados del grado de hidrólisis han demostrado ser superiores respecto a otras enzimas probadas. No obstante, se ha visto que los hidrolizados producidos por tripsina tienen una actividad antioxidante más alta que los producidos por proteasas neutras o alcalinas (Piovesana *et al.*, 2018).

### 2.2.2. Efectos en la estructura y conformación de las proteínas

La hidrólisis de proteínas provoca la reducción del peso molecular, el incremento de los grupos ionizables en el medio (por la liberación proporcional de un gran número de grupos terminales de cadenas proteínicas, al número de enlaces peptídicos hidrolizados) y la exposición de grupos hidrofóbicos del centro de la proteína, que producen diferentes alteraciones en las interacciones ambientales de esta. Estos cambios dependen tanto de las condiciones ambientales como de las condiciones de la hidrólisis (especialmente la proteasa utilizada y el grado de hidrólisis desarrollado). El resultado de la hidrólisis es la transformación de las proteínas en un extracto de péptidos que contiene diferentes porcentajes de péptidos de diversas dimensiones, aminoácidos libres y moléculas intactas de la proteína nativa. Dependiendo del pH del medio, los grupos amino terminal y carboxilos liberados pueden estar en su forma protonada o disociada, lo que produce una alteración en las interacciones de la proteína con el medio, llegando incluso a cambiar el pH global del alimento. Las condiciones de la hidrólisis deben ser las adecuadas para que la funcionalidad de la proteína no se pierda, por ejemplo, cuando se aplica la hidrólisis enzimática limitada para optimizar la formación de espumas, se favorece la migración de proteínas en la interfase aire/agua y las hace más flexibles,

mejorando así los reordenamientos conformacionales en la interfase. La hidrólisis de las proteínas no solo afecta su estructura y conformación, sino también las propiedades de la matriz del alimento. Cuando se utilizan enzimas pueden observarse efectos positivos como la modificación de la calidad sensorial (como textura y sabor), el mejoramiento de la digestibilidad, la reducción del efecto alergizante o la liberación de los péptidos bioactivos. Por otro lado, el uso de la hidrólisis ácida puede llevar a la pérdida de componentes de las proteínas y/o generar compuestos con efectos nocivos a la salud humana. Igualmente, un protocolo de hidrólisis mal diseñado puede producir efectos sensoriales desagradables como la acumulación de péptidos con sabor amargo (Janssen *et al.*, 2017; Tavano, 2013; Tavano, Berenguer-Murcia, Secundo y Fernandez-Lafuente, 2018).

## 3. Propiedades tecnofuncionales de las proteínas

La utilización de proteínas en sistemas alimentarios depende de las propiedades fisicoquímicas y tecnofuncionales que posean, estas últimas corresponden a las funciones no nutricionales que determinan el desempeño/funcionamiento de las proteínas en una matriz alimentaria, tales como la solubilidad, la coagulación por calor, la estabilidad térmica, la actividad emulsionante, la capacidad de formar espumas y su estabilidad, y la formación de geles. Estas características tecnofuncionales vienen del equilibrio entre la estructura tridimensional nativa de la proteína y las continuas transiciones de su conformación estructural, dicho equilibrio conformacional se acopla regularmente a alteraciones en la estructura secundaria o terciaria de la proteína, y con su relación superficie-actividad. Sin embargo, las propiedades tecnofuncionales de las proteínas extraídas de alimentos pueden ser afectadas por las condiciones específicas de extracción, ya que pueden desencadenar cambios en la conformación de la proteína. En la tabla I se muestran algunos ejemplos de las propiedades tecnofuncionales que más destacan de los aislados o hidrolizados proteínicos obtenidos de distintas fuentes vegetales, aplicando diversos métodos de extracción (Tavano *et al.*, 2018; Janssen *et al.*, 2017; Carrasco-Peña *et al.*, 2013).

### 3.1. Solubilidad

La solubilidad de una proteína es determinada por interacciones electrostáticas e hidrofílicas, y puede mejorarse después de

**Tabla I.** Propiedades tecnofuncionales de proteínas de diversas fuentes vegetales extraídas por diferentes técnicas

Técnica de extracción	Propiedad(es) tecnofuncional(es)	Fuente vegetal	Referencia
Precipitación isoelectrica	Absorción de agua, solubilidad en agua, actividad espumante	Soya y maíz	Soria-Hernández, Serna-Saldívar y Chuck-Hernández, 2015
	Solubilidad en agua, espumante	Soya verde	Brishiti <i>et al.</i> , 2017
	Solubilidad en agua y emulsionante	Semillas de kiwi	Deng <i>et al.</i> , 2014
	Solubilidad	Semillas de calabaza	Bucko, Katona, Popovic, Vastag y Petrovic, 2016
	Absorción de agua y aceite	Ajonjolí	Olasunkanmi, Omolayo y Olusegun, 2017
Precipitación isoelectrica y tratamiento térmico	Estabilización de emulsiones	Chícharos	Peng <i>et al.</i> , 2015
Precipitación alcalina	Absorción de agua, estabilizante de emulsiones	Chía	López <i>et al.</i> , 2018
Precipitación alcalina y extracción salina	Emulsionante y estabilizante de emulsiones	Semillas de tomate	Sakar, Kamaruddin, Bentley y Wang, 2016
Extracción salina	Formación y estabilidad de espumas	Semillas de flor de Jamaica ( <i>Hibiscus sabdariffa</i> )	Mahgoub-Salah y Elbashir-Hayat, 2009
Precipitación alcalina con ultrasonido	Solubilidad y emulsionante	Semillas de uva	Zhou, Zhang, Liu y Zhao, 2011
	Retención de agua y aceite, emulsionante	Frijol del Ganxet	Lafarga, Álvarez, Bobo y Aguiló-Aguayo, 2018
Ultrasonido	Solubilidad, emulsionante y espumante	Semillas de Girasol	Malik, Sharma y Saini, 2017
	Solubilidad, emulsionante, espumante y fuerza del gel	Semillas de ciruela	Xue <i>et al.</i> , 2018
	Emulsionante y solubilidad	Soya, chícharo y arroz	O’Sullivan, Murray, Flynn y Norton, 2016
Altas presiones hidrostáticas	Solubilidad	Frijoles	Yin <i>et al.</i> , 2008
	Emulsionante	Soya	Manassero, Beaumal, Vaudagna, Speroni y Anton, 2018
		Camote	Khan, Mu, Sun, Zhang y Chen, 2015
	Emulsionante y espumante	Chícharo	Chao, Jung y Aluko, 2018

aplicar un proceso de hidrólisis, pero la mejora será proporcional al incremento de los nuevos grupos terminales amino y carboxilo producidos por la ruptura de los enlaces peptídicos. Esta propiedad puede servir de guía para la funcionalidad general de una proteína, debido a que se relaciona directamente con otras propiedades funcionales como la emulsionante y espumante en aislados proteínicos. Una de las características intrínsecas de las proteínas que puede influir en estas propiedades es la carga de su superficie, la cual se ve afectada por el pH del medio. Así, a valores de pH arriba o debajo del punto isoelectrico, la carga de las proteínas puede ser positiva o negativa, lo que favorece las repulsiones electrostáticas que llevan a un incremento en la solubilidad de las proteínas. Estudios reportan que la solubilidad de las proteínas de amaranto se reduce cuando son obtenidas en condiciones de fuerzas iónicas altas, pH alcalino y temperatura ambiente; aunque en general, la solubilidad de las proteínas de los pseudocereales es pobre en pH ácido, pero a pH alcalino alcanzan porcentajes de solubilidad de 50 hasta el 100 %. Algunas tecnologías como el ultrasonido (tabla I) pueden mejorar la solubilidad de proteínas poco solubles, como la de soya, chícharo y semillas de girasol (Chen *et al.*, 2018; Damodaran y Parkin, 2017; Janssen *et al.*, 2017; Shevkani Singh, Rana y Kaur, 2014).

### 3.2. Formación de geles

Las proteínas globulares tienden a formar geles en estructuras de red después de aplicar calor por arriba de la temperatura mínima de desdoblamiento de la proteína. Este fenómeno se ha visto en la globulina 11S del amaranto, en la cual se produce un incremento en los niveles de hidrofobicidad en su superficie, disminuyendo así su solubilidad y formando geles (Carrasco-Peña *et al.*, 2013). Los geles pueden formarse con una estructura ordenada si hay altas concentraciones de proteína. El peso molecular de las proteínas también interviene en las características de los geles formados, como la elasticidad, dureza, fracturabilidad y cohesividad. La estabilidad de los geles se debe a los puentes disulfuro formados del intercambio de grupos sulfhidrilo/disulfuro de las reacciones de desnaturalización de las globulinas

y albúminas. Los enlaces no covalentes (puentes de hidrógeno e interacciones hidrofóbicas principalmente) también participan en la estabilización de los geles, pero en menor grado que los puentes disulfuro (Janssen *et al.*, 2017; Shevkani *et al.*, 2014).

### 3.3. Formación de emulsiones

La capacidad emulsionante es una de las propiedades funcionales más importantes que afecta la aplicación de las proteínas en la formulación de alimentos y, como se mencionó anteriormente, la carga de la proteína influye en esta propiedad, de manera que cuando la carga es nula, el péptido o proteína no puede moverse a la interfase, por eso deben permanecer fuera de su punto isoelectrico. En la formación y estabilidad de espumas, las proteínas actúan en la interfase como agentes activos de la superficie, gracias a su baja tensión y a que forman una película continua y altamente viscosa por medio de complejas interacciones moleculares. Además, de la misma manera que en la solubilidad y la formación de emulsiones, la carga de la proteína en determinado pH puede alterar la capacidad y estabilidad de las espumas formadas. El efecto del pH se ha observado con las proteínas de amaranto, en las que la actividad emulsionante es baja, cerca del punto isoelectrico; asimismo, hay mejor espumado y estabilidad de las espumas a pH 2.0 que a pH 8.0, debido a que las proteínas en pH ácido presentan rápida difusión y/o adsorción en la interfase aire/agua, y a que la película que forman es más viscoelástica y flexible. No obstante, la formación de emulsiones puede mejorarse si se aplica un pretratamiento térmico, para generar una desnaturalización parcial de las globulinas que llevará a la exposición de los grupos hidrofóbicos. El uso de ultrasonido también puede mejorar la capacidad emulsionante y la estabilidad de las emulsiones de algunas proteínas (tabla I) como la de chícharo y semillas de girasol, pues baja la tensión de la interfase. De igual manera, la aplicación de altas presiones hidrostáticas mejora las propiedades emulsionantes de las proteínas de camote, chícharo y soya para poder emplearlas en la industria (Chen *et al.*, 2018; Damodaran y Parkin, 2017; Janssen *et al.*, 2017; Shevkani *et al.*, 2014).

### 3.4. Aplicaciones en alimentos

Las aplicaciones de los aislados de proteínas vegetales en la formulación de alimentos como sustitutos de otros ingredientes pueden ayudar a mejorar sus características sensoriales, aunque esto no siempre es así, y se debe a que no poseen las mismas propiedades funcionales o no en el mismo nivel de funcionalidad, por ejemplo, el uso de la harina de pseudocereales como sustituto parcial de la de trigo para elaborar pan provoca que se debilite la fuerza de la red viscoelástica del gluten y la capacidad de atrapar gas. Sin embargo, la combinación de pseudocereales con arroz o almidón de papa para elaborar panes libres de gluten mejora el volumen específico del pan y la suavidad de la miga. El gluten de trigo también tiene la habilidad única de dar fuerza y viscoelasticidad a la masa de pastas y fideos; estas propiedades dan los atributos de apariencia, textura y calidad en la cocción característicos de las pastas; no obstante, es un reto lograr incorporar harinas de otras fuentes vegetales, y que las características y propiedades sensoriales de los productos finales sigan siendo iguales a la formulación original. En algunos estudios se probaron diferentes formulaciones de pastas, y se observó que, al fortificar la pasta con proteína aislada de alforfón, su calidad fue limitada, debido a la fracción proteínica insoluble en agua de la proteína añadida. Además, en pastas libres de gluten a partir de pseudocereales, se obtuvieron productos con menos firmeza y requerían tiempos de cocción más cortos que las pastas de trigo. Cuando se incluyó amaranto en la formulación de pasta a partir de arroz, el resultado fue el incremento en la solubilidad de la proteína, pero no hubo pérdidas durante la cocción. También se observaron efectos positivos en la firmeza de pastas extruidas a partir de amaranto y enriquecidas con arroz (Janssen *et al.*, 2017; Martínez, Ribotta, Añón y León, 2014).

Gracias a la capacidad de absorción de agua y aceite de las proteínas, los aislados proteínicos de diversas fuentes como soya o amaranto pueden utilizarse para la elaboración de salsas, sopas, masas, natillas y productos horneados para retener y mejorar los sabores, además de aportar cuerpo, espesamiento y viscosidad (Shevkani *et al.*, 2014). Los hidrolizados de soya y

maíz que tienen altos índices de solubilidad de agua y nitrógeno pueden ser utilizados en la elaboración de bebidas; los hidrolizados de soya con altos índices de absorción de agua funcionan bien como extensores para salchichas y embutidos; la harina de chícharo es buena opción como emulsionante para aderezos y otras formulaciones con alto contenido de grasa por su capacidad espumante y emulsionante (Soria-Hernández *et al.*, 2015). La proteína aislada de chía en condiciones alcalinas puede aplicarse como extensor o sustituto de carne en productos cárnicos o salchichas tipo emulsión por sus propiedades emulsionantes y su capacidad de absorción de agua y aceite (López *et al.*, 2018). Los aislados proteínicos de chícharo y arroz utilizados como extensores cárnicos en la elaboración de *nuggets* de pollo aumentaron el contenido de proteína y la capacidad de retención de agua del producto, también redujeron las pérdidas por cocción (Shoaib, Sahar, Sameen, Saleem y Tahir, 2018). Las proteínas aisladas de semillas de ciruela presentan buenas propiedades de formación de geles y emulsiones, por lo que resultan útiles en la elaboración de salchichas (Xue *et al.*, 2018). Las características físicas de la soya verde texturizada son muy similares a las de la soya comercial texturizada, por lo que funciona como su sustituto en este tipo de producto (Brishiti *et al.*, 2017).

### 4. Propiedades bioactivas de las proteínas

Las proteínas provenientes de plantas pueden mostrar propiedades protectoras de la salud porque participan en funciones fisiológicas y biológicas. Regularmente, las secuencias de aminoácidos están inactivas dentro de la proteína, pero al ser liberadas por hidrólisis, la bioactividad aparece. En los últimos años se ha mantenido una especial atención por los péptidos bioactivos, los cuales son fragmentos de proteínas compuestos por una cadena de 2 a 20 aminoácidos que tienen un efecto benéfico o influencia en funciones fisiológicas, como el tránsito intestinal, la absorción de nutrientes y efectos inmuno-modulatorios. Hay gran interés en la aplicación de péptidos bioactivos como auxiliares en tratamientos para enfermedades y padecimientos

como el cáncer, la diabetes y desórdenes inflamatorios (Algar y Mabesa, 2015; Piovesana *et al.*, 2018; Tiengo *et al.*, 2009).

Entre las bioactividades más importantes que han presentado los péptidos, están la antiproliferativa, antitumoral o anticancerígena, en las que los péptidos perturban sin especificidad la membrana de la célula cancerosa; la antimutagénica protege a las células de los agentes químicos que puedan dañarla genéticamente; la antiinflamatoria se observa mediante el bloqueo de los mediadores de inflamación en el organismo; la antimicrobiana puede funcionar como barrera de defensa contra hongos y bacterias; como opioide se presenta al inducir un efecto analgésico; la habilidad para unir metales como calcio, hierro, cobre y zinc se muestra al incrementar la solubilidad de estos; la actividad antioxidante se puede observar por mecanismos como atrapar radicales libres, donar electrones y/o unir metales; la antitrombótica se exhibe como anticoagulante o antiplaquetaria; la hipercolesterolémica que se asocia con la regulación de los niveles de colesterol a través de la reducción de la aciltransferasa colesterol coenzima A, entre otras. En la tabla II se muestran algunos ejemplos de las propiedades bioactivas mencionadas, que se presentan en los hidrolizados proteínicos obtenidos de distintas fuentes vegetales, aplicando diversos métodos de extracción (Hajfathalian, Ghelichi, García-Moreno, Sorensen y Jacobsen, 2018; Piovesana *et al.*, 2018; Tiengo *et al.*, 2009).

Estos efectos benéficos a la salud se han estudiado poco en péptidos derivados de proteínas de subproductos de frutas y vegetales. Sin embargo, las plantas pueden proveer una amplia variedad de compuestos bioactivos, por lo tanto, ofrecen grandes expectativas para el estudio de péptidos bioactivos. Algunas de las propiedades bioactivas que más han sido estudiadas, en relación con las propiedades estructurales de las proteínas y los péptidos, han demostrado que hay un alto grado de comportamiento estructura-actividad en péptidos bioactivos. De esta manera, se sabe que la estructura tridimensional de un péptido es influenciada por factores como la presencia de ciertos grupos funcionales y la naturaleza de los residuos de aminoácidos presentes, igual que en una proteína. También las características de la estructura secundaria, junto con la secuencia específica de aminoácidos son los factores de mayor importancia en la de-

terminación de las propiedades bioactivas de los péptidos. Otros parámetros estructurales que también son determinantes en la bioactividad son la presencia de las hélices peptídicas, la ciclación, la hidrofobicidad de la superficie, los momentos hidrofóbicos, la carga y tamaño de los dominios hidrofóbicos/hidrofílicos (Agyei *et al.*, 2018; Piovesana *et al.*, 2018; Tiengo *et al.*, 2009).

La actividad antihipertensiva se observa en los péptidos bioactivos que pueden inhibir la enzima convertidora de angiotensina (ECA), la cual tiene un importante papel en la regulación de la presión sanguínea. El potencial antihipertensivo se debe a la composición de aminoácidos, la secuencia de la proteína y el método de obtención de los péptidos. En cuanto a su estructura, los péptidos se componen principalmente de cadenas con 2 a 12 aminoácidos, con altos contenidos de ácido glutámico y ácido aspártico, aminoácidos dicarboxílicos en la posición del nitrógeno terminal y residuos de aminoácidos de cadena ramificada como valina e isoleucina, y también de aminoácidos hidrofóbicos como triptófano, tirosina, fenilalanina o prolina en el carbono terminal. Estos péptidos bioactivos se han obtenido de diversas especies vegetales (tabla II) mediante métodos como la digestión gastrointestinal, hidrólisis enzimática y fermentación (Montone *et al.*, 2018; Piovesana *et al.*, 2018; Tiengo *et al.*, 2009).

Los péptidos antioxidantes generalmente están formados por cadenas de 3 a 6 aminoácidos y tienen un peso molecular más bajo que 1 kDa, se componen de residuos de aminoácidos hidrofóbicos, en particular por histidina, triptófano, fenilalanina, prolina, glicina, lisina, isoleucina y valina, como se reportó en péptidos derivados de proteínas de garbanzos. Las posiciones de los aminoácidos son importantes para que se presente la actividad antioxidante, un caso típico es la valina o leucina en la posición del nitrógeno terminal de péptidos que contienen prolina, histidina o tirosina, también en péptidos con lisina y serina-leucina / tirosina-leucina / prolina-leucina en el nitrógeno y carbono terminales, los cuales se han encontrado en péptidos de arroz, camote, garbanzo y maíz (tabla II). Estos péptidos se obtuvieron por métodos como la hidrólisis enzimática y fermentación (Montone *et al.*, 2018; Piovesana *et al.*, 2018).

Los péptidos con actividad opioide obtenidos de alimentos se llaman «exorfinas», para distinguirlos de los endógenos del

**Tabla II.** Propiedades bioactivas de hidrolizados proteínicos de diversas fuentes vegetales obtenidos por diferentes métodos

Técnica de extracción o hidrólisis	Propiedad(es) bioactiva(s)	Fuente vegetal	Referencia
Digestión gastrointestinal	Inhibidora de ECA <sup>a</sup>	Residuos de coliflor, okra	Montone <i>et al.</i> , 2018; Castillo, Angelia, Torio y Belina-Aldemita, 2017
	Antidiabética	Quinoa	Piovesana <i>et al.</i> , 2018
	Antioxidante	Salvado de arroz, residuos de coliflor	Montone <i>et al.</i> , 2018; Piovesana <i>et al.</i> , 2018
Hidrólisis enzimática	Antioxidante, opioide, quelante de calcio, hipocolesterolémica, anticancerígena, antiobesidad, ansiolítica	Soya	Piovesana <i>et al.</i> , 2018
	Antioxidante, inhibidora de ECA, opioide, antimicrobiana	Maíz	
	Antioxidante, inhibidora de ECA, antimicrobiana, anticancerígena, antitrombótica, antiobesidad	Papa	
	Opioide y antimicrobiana	Trigo	Dhaval, Yadav y Purwar, 2016
	Anticancerígena	Quinoa	
	Ansiolítica	Espinacas	
	Hipocolesterolémica, antioxidante, antitrombótica e inhibidora de ECA	Amaranto	Piovesana <i>et al.</i> , 2018; Tiengo <i>et al.</i> , 2009
	Antioxidante	Germen de trigo, semillas de cereza, semillas de durazno	Dhaval <i>et al.</i> , 2016
	Inhibidora de ECA	Frijoles, ajonjolí, brócoli, chícharos, espinaca, arroz, semillas de cereza, residuos de cebada de cervecería	
Fermentación con <i>Bacillus subtilis</i>	Antioxidante, inhibidora de ECA	Semillas de tomate	Piovesana <i>et al.</i> , 2018
Fermentación con <i>Lactobacillus plantarum</i>	Inhibidora de ECA	Soya	Singh y Vij, 2017
Altas presiones hidrostáticas	Antioxidante	Garbanzos, lentejas, camote	Piovesana <i>et al.</i> , 2018
	Inhibidora de ECA	Lentejas	
Precipitación con solventes	Antimicrobiana	Coco	Algar y Mabesa, 2015
		Semillas de pepino	Al-Akeel <i>et al.</i> , 2018

<sup>a</sup>ECA: enzima convertidora de angiotensina.

cuerpo humano. Su estructura es corta, de 4 a 8 aminoácidos, en los que se incluyen la tirosina en la región del nitrógeno terminal, precedido por un residuo de prolina y otro aminoácido aromático (fenilalanina o tirosina) en la tercera y cuarta posición del nitrógeno terminal. Algunas proteínas vegetales que presentan actividad opioide son el gluten, la gliadina, la hordeína y la zeína. En la espinaca y soya también se encontraron péptidos opioides, como se muestra en la tabla II (Piovesana *et al.*, 2018).

Otras actividades que se han estudiado en proteínas vegetales (tabla II) son la hipocolesterolémica o hipolipidémica de pseudocereales y leguminosas. Por otra parte, la actividad antimicrobiana se ha comprobado en bacterias gram-positivas y gram-negativas, hongos y virus a partir de proteínas de cereales. Esta actividad es producida por péptidos anfipáticos, con grandes cantidades de residuos de aminoácidos catiónicos e hidrofóbicos, los cuales son capaces de perforar y romper la membrana celular microbiana, llevándola a su muerte (Agyei *et al.*, 2018; Piovesana *et al.*, 2018).

#### 4.1. Aplicaciones en alimentos

Las aplicaciones de los péptidos bioactivos son muy limitadas, ya que son de reciente descubrimiento y poco se ha usado a nivel industrial, debido a varios factores como los altos costos de operación, preocupaciones sensoriales, baja aceptabilidad en el mercado, un incierto potencial de efectos secundarios, entre otros. Sin embargo, la industria de alimentos es uno de los sectores clave para la producción y utilización de los péptidos bioactivos, ya que pueden ser empleados en la fortificación de productos etiquetados como funcionales o nutraceuticos. Según las propiedades que presenten en el área de posible aplicación, por ejemplo, los péptidos con actividad antimicrobiana y antioxidante podrían utilizarse como conservadores naturales para mantener la inocuidad y calidad de los alimentos, y los que tienen actividad antihipertensiva e inmunoestimuladora o inmunomoduladora servirían en la elaboración de alimentos nutraceuticos. No obstante, se presentan algunos retos en estas aplicaciones, como las complicaciones en las metodologías para asegurar la calidad, datos escasos sobre la biodisponibilidad y

su destino metabólico, y sabores amargos de los péptidos (Agyei *et al.*, 2016; Hajfathalian *et al.*, 2018).

## CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

En esta revisión se reveló que las plantas y sus semillas son una fuente con alto potencial para la extracción de proteínas, también que el estudio de su composición y propiedades funcionales, bioactivas y nutricionales es importante para poder determinar su aplicación en productos alimenticios. Además, la mayoría de las investigaciones realizadas sobre las diversas propiedades de las proteínas relaciona de alguna forma el efecto generado por su estructura, conformación, las condiciones y métodos de obtención sobre esas propiedades. De esta manera se demuestra en cada caso que estos factores son importantes cuando se quiere trabajar con una proteína específica y explotar alguna de sus propiedades.

El estudio de las proteínas vegetales seguirá siendo un tema de interés en la investigación científica porque aún hay mucho por explicar en relación con el comportamiento estructura-función/actividad, ya que existe una amplia variedad de plantas, semillas y subproductos comestibles que no se han estudiado, los cuales podrían ser una fuente alternativa de proteína alimentaria. Además, aún no hay aplicaciones comerciales en productos alimenticios de los péptidos bioactivos, por lo que este es otro campo que requiere ser tomado en cuenta para futuras investigaciones con aplicaciones en alimentos.

## AGRADECIMIENTOS

Yolanda Isabel Delgado García agradece a la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP) y al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) —hoy Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)—, por el financiamiento recibido para sus estudios de doctorado.

## REFERENCIAS

- Adenekan, M. K., Fadimu, G. J., Odunmbaku, L. A. y Oke, E. K. (2018). Effect of isolation techniques on the characteristics of pigeon pea (*Cajanus cajan*) protein isolates. *Food Science and Nutrition*, 6, 146-152.
- Agyei, D., Acquah, C., Tan, K. X., Hii, H. K., Rajendran, S. R., Udenigew, C. C. y Danquah, M. K. (2018). Prospects in the use of aptamers for characterizing the structure and stability of bioactive proteins and peptides in food. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 410(2), 297-306.
- Agyei, D., Ongkudon, C. M., Wei, C. Y., Chan, A. S. y Danquah, M. K. (2016). Bioprocess challenges to the isolation and purification of bioactive peptides. *Food and Bioprocess Processing*, 98, 244-256.
- Al-akkel, R., Mateen, A., Alharbi, K. K., Alyousef, A. A., Al-Mandeel, H. M. y Syed, R. (2018). Purification and MIC analysis of antimicrobial proteins from *Cucumis sativus* L. seeds. *BMC Complementary and Alternative Medicine*, 18(1), 121, 1-6.
- Algar, A. y Mabesa, L. B. (2015). Isolation and partial characterization of a low molecular weight antimicrobial protein from coconut (*Cocos nucifera* L.) milk. *International Food Research Journal*, 22(5), 1813-1816.
- Alu'datt, M. A., Al-Rabadi, G. J., Alli, I., Ereifej, K., Rababah, T., Alhmad, M. N. y Torley, P. J. (2013). Protein co-precipitates: A review of their preparation and functional properties. *Food and Bioprocess Processing*, 91(4), 327-335.
- Brishiti, F. H., Zarei, M., Muhammad, S. K. S., Ismail-Fitry, M. R., Shukri, R. y Saari, N. (2017). Evaluation of the functional properties of mung bean protein isolate for development of textured vegetable protein. *International Food Research Journal*, 24(4), 1595-1605.
- Bučko, S. D., Katona, J. M., Popović, L. M., Vaštag, Z. G. y Petrović, L. B. (2016). Functional properties of pumpkin (*Cucurbita pepo*) seed protein isolate and hydrolysate. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 81(1), 35-46.
- Carrasco-Peña, L., Osuna-Castro, J. A., De León-Rodríguez, A., Maruyama, N., Toro-Vazquez, J. F., Morales-Rueda, J. A. y Barba de la Rosa, A. P. (2013). Modification of solubility and heat-induced gelation of Amaranth 11S globulin by protein engineering. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(14), 3509-3516.
- Castillo, I. J. B., Angelia, M. R. N., Torio, M. A. O. y Belina-Aldemita, M. D. (2017). Antihypertensive property of the peptic and chymotryptic hydrolysates derived from the crude protein extract of okra [*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench] seeds. *International Food Research Journal*, 26(6), 2586-2592.
- Chao, D., Jung, S. y Aluko, R. E. (2018). Physicochemical and functional properties of high pressure-treated isolated pea protein. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 45, 179-185.
- Chen, J., Mu, T., Zhang, M., Goffin, D., Sun, H., Ma, M. y Zhang, D. (2018). Structure, physicochemical, and functional properties of protein isolates and major fractions from cumin (*Cuminum cyminum*) seeds. *International Journal of Food Properties*, 21(1), 685-701.
- Damodaran, S. y Parkin, K. L. (2017). *Fennema's Food Chemistry* (Fifth edition). Boca Raton, FL: CRC Press Taylor & Francis Group.
- Deng, J., Sun, T., Cao, W., Fan, D., Cheng, N., Wang, B., ... y Yang, H. (2014). Extraction optimization and functional properties of proteins from kiwi fruit (*Actinidia chinensis planch.*) seeds. *International Journal of Food Properties*, 17(7), 1612-1625.
- Dhaval, A., Yadav, N. y Purwar, S. (2016). Potential applications of food derived bioactive peptides in management of health. *International Journal of Peptide Research and Therapeutics*, 22(3), 377-98.
- FAO (2018). *Biodiversidad para una agricultura sostenible. El trabajo de la FAO sobre el uso de la biodiversidad en la alimentación y la agricultura*. Recuperado el 28 de marzo de 2019: <http://www.fao.org/3/ca2227es/CA2227ES.pdf>
- Franco-Vega, A., Palou, E., Ramírez-Corona, N. y López-Malo, A. (2017). Líquidos iónicos: una alternativa «verde» para procesos de extracción en la industria de alimentos. En: M. T. Jiménez-Munguía, F. Vegara-Balderas, E. Mani-López y M.E. Bárcenas-Pozos (Eds.). *Tendencias en la Ciencia de Alimentos. Temas selectos* (pp. 288-299). San Andrés Cholula: Editorial UDLAP.
- Garba, U. y Kaur, S. (2014). Protein isolates: production, functional properties and application. *International Journal of Current Research and Review*, 6(3), 35-45.
- Hajfathalian, M., Ghelichi, S., García-Moreno, P. J., Sorensen, A. D. M. y Jacobsen, C. (2018). Peptides: Production, bioactivity, functionality, and applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(18), 3097-3129.
- Janssen, F., Pauly, A., Rombouts, I., Jansens, K. J., Deleu, L. J. y Delcour, J. A. (2017). Proteins of amaranth (*Amaranthus spp.*), buckwheat (*Fagopyrum spp.*), y quinoa (*Chenopodium spp.*): a food science and technology perspective. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 16(1), 39-58.
- Karami, Z. y Akbari-adergani, B. (2019). Bioactive food derived peptides: a review on correlation between structure of bioactive peptides and their functional properties. *Journal of Food Science and Technology*, 56(2), 535-547.
- Khan, N. M., Mu, T. H., Sun, H. N., Zhang, M. y Chen, J. W. (2015). Effects of high hydrostatic pressure on secondary structure and emulsifying behavior of sweet potato protein. *High Pressure Research* 35(2), 189-202.

- Kuan, Y. H., Bhat, R., Patras, A. y Karim, A. A. (2013). Radiation processing of food proteins- A review on the recent developments. *Trends in Food Science and Technology*, 30(2), 105-120.
- Lafarga, T., Álvarez, C., Bobo, G. y Aguiló-Aguayo, I. (2018). Characterization of functional properties of proteins from Ganxet beans (*Phaseolus vulgaris* L. var. *Ganxet*) isolated using an ultrasound-assisted methodology. *LWT- Food Science and Technology*, 98, 106-112.
- Lee, S. Y., Khoiroh, I., Ooi, C. W., Ling, T. C. y Show, P. L. (2017). Recent advances in protein extraction using ionic liquid-based aqueous two-phases systems. *Separation and Purification Reviews*, 46(4), 1542-2127.
- López, D. N., Ingrassia, R., Busti, P., Wagner, J., Boeris, V. y Spelzini, D. (2018). Effects of extraction pH of chia protein isolates on functional properties. *LWT- Food Science and Technology*, 97, 523-529.
- Mahgoub-Salah, E. O. y Elbashir-Hayat, Z. E. (2009). Proximate composition of Karkadeh (*Hibiscus sabdariffa*) seeds and some functional properties of seed protein isolate as influenced by pH and NaCl. *International Journal of Food Science and Nutrition*, 60(3), 183-194.
- Malik, M. A., Sharma, H. K. y Saini, C. S. (2017). High intensity ultrasound treatment of protein isolate extracted from dephenolized sunflower meal: Effect on physicochemical and functional properties. *Ultrasonics Sonochemistry*, 39, 511-519.
- Manassero, C. A., Beaumal, V., Vaudagna, S. R., Speroni, F. y Anton, M. (2018). Calcium addition, pH and high hydrostatic pressure effects on soybean protein isolates -Part 2: Emulsifying Properties. *Food and Bioprocess Technology*, 11(11), 2079-2093.
- Martínez, C. S., Ribotta, P. D., Añón, M. C. y León, A. E. (2014). Effect of amaranth flour (*Amaranthus mategazzianus*) on the technological and sensory quality of bread wheat pasta. *Food Science and Technology International*, 20(2), 127-135.
- Mir, N. A., Riar, C. S. y Singh, S. (2018). Nutritional constituents of pseudo cereals and their potential use in food systems: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 75, 170-180.
- Montone, C. M., Capriotti, A. L., Cavaliere, C., La Barbera, G., Piovesana, S., Chiozzi, R. Z. y Laganà, A. (2018). Characterization of antioxidant and angiotensin-converting enzyme inhibitory peptides derived from cauliflower by-products by multidimensional liquid chromatography and bioinformatics. *Journal of Functional Foods*, 44, 40-47.
- Olasunkanmi, G. S., Omolayo, F. T. y Olusegun, O. T. (2017). Fatty acid profile, physic-chemical and functional properties of oil and protein isolate simultaneously extracted from sesame (*Sesamum indicum*) seed. *Annals. Food Science and Technology*, 18(1), 1-10.
- O'Sullivan, J., Murray, B., Flynn, C. y Norton, I. (2016). The effect of ultrasound treatment on the structural, physical and emulsifying properties of animal and vegetable proteins. *Food Hydrocolloids*, 53, 141-154.
- Peng, W., Kong, X., Chen, Y., Zhang, C., Yang, Y. y Hua, Y. (2015). Effects of heat treatment on the emulsifying properties of pea proteins. *Food Hydrocolloids*, 52, 301-310.
- Piovesana, S., Capriotti, A. L., Cavaliere, C., La Barbera, G., Montone, C. M., Chiozzi, R. Z. y Laganà, A. (2018). Recent trends and analytical challenges in plant bioactive peptide separation, identification and validation. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 410(15), 3425-3444.
- Sáenz de Rodríguez, M. Á., Medina, E., Moyano, F. J. y Alarcón, F. J. (2011). Evaluation of protein hydrolysis in raw sources by digestive proteases of Senegalese sole (*Solea senegalensis*, Kaup 1858) using a combination of an in vitro assay and sodium dodecyl sulphate polyacrylamide gel electrophoresis analysis of products. *Aquaculture Research*, 42(11), 1639-1652.
- Sakar, A., Kamaruddin, H., Bentley, A. y Wang, S. (2016). Emulsion stabilization by tomato seed protein isolate: Influence of pH, ionic strength and thermal treatment. *Food Hydrocolloids*, 57, 160-168.
- Shevkani, K., Singh, N., Rana, J. C. y Kaur, A. (2014). Relationship between physicochemical and functional properties of amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) protein isolates. *International Journal of Food Science and Technology*, 49(2), 541-550.

- Shoaib, A., Sahar, A., Sameen, A., Saleem, A. y Tahir, A. T. (2018). Use of pea and rice protein isolates as source of meat extenders in the development of chicken nuggets. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(9), 1-7.
- Singh, B. P. y Vij, S. (2017). Growth and bioactive peptides production potential of *Lactobacillus plantarum* strain C2 in soy milk: a LC-MS/MS based revelation for peptides biofunctionality. *LWT Food Science Technology*, 86, 293-301.
- Soria-Hernández, C., Serna-Saldívar, S. y Chuck-Hernández, C. (2015). Physicochemical and functional properties of vegetable and cereal proteins as potential source of novel food ingredients. *Food Technology and Biotechnology*, 53(3), 269-277.
- Tavano, O. L. (2013). Protein hydrolysis using proteases: An important tool for food biotechnology. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 90, 1-11.
- Tavano, O. L., Berenguer-Murcia, A., Secundo, F. y Fernandez-Lafuente, R. (2018). Biotechnological applications of proteases in food technology. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(2), 412-436.
- Tiengo, A., Faria, M. y Netto, F. M. (2009). Characterization and ACE-inhibitory activity of amaranth proteins. *Journal of Food Science*, 74(5), 121-126.
- Wouters, A. G. B., Rombouts, I., Fierens, E., Brijs, K. y Delcour, J. A. (2016). Relevance of the functional properties of enzymatic plant protein hydrolysates in food systems. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(4), 786-800.
- Xue, F., Zhu, C., Liu, F., Wang, S., Liu, H. y Li, C. (2018). Effects of high-intensity ultrasound treatment on functional properties of plum (*Pruni domesticae semen*) seed protein isolate. *Journal of Science Food and Agriculture*, 98(15), 5690-5699.
- Yin, S. W., Tang, C. H., Wen, Q. B., Yang, X. Q. y Li, L. (2008). Functional properties and in vitro trypsin digestibility of red kidney bean (*Phaseolus vulgaris L.*) protein isolate: Effect of high-pressure treatment. *Food Chemistry*, 110(4), 938-945.
- Zhou, T., Zhang, T., Liu, W. y Zhao, G. (2011). Physicochemical characteristics and functional properties of grape (*Vitis vinifera L.*) seeds protein. *International Journal of Food Science and Technology*, 46(3), 635-641.



# Compuestos nutritivos y bioactivos del amaranto

(*Amaranthus hypochondriacus*)

A. E. Peláez-Castañeda\* y M. A. P. Porras-Loaiza

\*Programa de Doctorado en Ciencia de Alimentos  
Correo electrónico: [ana.pelaezca@udlap.mx](mailto:ana.pelaezca@udlap.mx) • [patricia.porras@udlap.mx](mailto:patricia.porras@udlap.mx)

## RESUMEN

**E**l amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*) es un pseudocereal cuyo origen se reporta en el continente americano. La semilla de amaranto contiene nutrientes como lípidos (4.8-8.1 % b. s.), ácidos grasos como el omega-6, tocoferoles, tocotrienoles y esteroides; proteínas de alta calidad (21 % b. s.) con buen equilibrio de aminoácidos, entre los que se destaca la lisina; carbohidratos (70 % b. s.); vitaminas (A, C, B1, B2, B3, E y ácido fólico), y minerales (fósforo, hierro, magnesio, calcio y zinc). Además, los péptidos, el escualeno, los fitoesteroides y los polifenoles, entre otros compuestos presentes en la semilla de amaranto, han demostrado tener acción bioactiva. En México, el amaranto es conocido y usado en dulces típicos y como cereal, aunque sus aplicaciones cada vez son mayores. Se usa de forma directa como ingrediente, pero también como fuente para la extracción de compuestos como almidón, proteínas y fibra que se utilizan como ingredientes en otros productos alimenticios. El objetivo de esta revisión es resaltar las características, propiedades nutricionales y funcionales, sus diferentes formas de consumo y los usos de esta semilla, haciendo una recopilación de información publicada sobre sus nutrientes y compuestos bioactivos.

**Palabras clave:** *Amaranthus hypochondriacus*, compuestos bioactivos, nutrientes.

## ABSTRACT

Amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) is a pseudocereal native of the American continent. Amaranth seed contains nutrients such as lipids (4.8-8.1 % d. b.), fatty acids such as omega-6, tocopherols, tocotrienols and sterols; high quality proteins (21 % d. b.) with good amino acid balance, among which lysine stands out; carbohydrates (70 % d. b.), vitamins (A, B, C, B1, B2, B3, E and folic acid) and minerals (phosphorus, iron, magnesium, calcium and zinc). In addition, peptides, squalene, phytosterols and polyphenols, are some of the compounds in the amaranth seed that have shown bioactive action. In Mexico, amaranth is known and used in typical candies and as cereal, although its applications are rapidly increasing, both directly, as an ingredient, and as source of extraction of compounds such as starch, protein and fiber that are used as ingredients in other food products. The objective of this review is to highlight the characteristics, properties and uses of this seed, and to compile published information on its nutrients and bioactive compounds.

**Keywords:** *Amaranthus hypochondriacus*, bioactive compounds, nutrients.

## INTRODUCCIÓN

El amaranto es una planta considerada como pseudocereal, utilizada en la alimentación desde tiempos ancestrales por culturas prehispánicas. Las evidencias arqueológicas confirman que se consumían hojas y semillas antes del proceso de domesticación de esta especie entre el 5200-3400 A.C. (Barros y Buenrostro, 1997).

En el continente americano existen alrededor de 70 especies del género *Amaranthus*, de las cuales, más del 80 % son endémicas. Hay registros que indican que la especie *Amaranthus hypochondriacus* es originaria de Norteamérica, específicamente, de México (Montoya-Rodríguez, Gómez-Favela, Reyes-Moreno, Milán-Carrillo y González de Mejía, 2015) y se cultivó desde hace más de 6,000 años en el valle de Tehuacán, extendiéndose a lo largo de México, durante el siglo xv, y no fue sino hasta el siglo xviii que se introdujo en Asia (Joshi *et al.*, 2018).

El amaranto es fácilmente cultivable en muchas regiones de América, Europa, Asia y África, ya que tolera desde temperaturas templadas hasta tropicales (El Gendy *et al.*, 2018; Joshi *et al.*, 2018). En México, el estado de Puebla es uno de los principales productores de la variedad *A. hypochondriacus*. El amaranto es un cultivo de rápido crecimiento, tiene la capacidad de retener agua, lo cual le permite resistir condiciones de sequía, entre otras situaciones de estrés. Generalmente, se obtienen buenos rendimientos de cosecha, alcanzando en promedio 3 ton/ha, por lo que es una opción de cultivo viable para los productores en zonas marginadas (Espitia-Rangel, Mapes-Sánchez, Núñez-Colín y Escobedo-López, 2010).

Existe evidencia de que los españoles consideraban al amaranto como bleado, ajedrea o armuelle, debido a que creían que era mala hierba en los sembradíos y sin valor, lo que ocasionó que se le restara importancia a su siembra y cosecha durante la Conquista, desalentando su cultivo (Velasco Lozano, 2016). Debido a esto, es importante trabajar actualmente en el rescate del cultivo y consumo de este alimento. A pesar de

ser un alimento con alto valor nutricional por su contenido de carbohidratos, lípidos y proteínas, es poco utilizado en la dieta de muchas familias mexicanas, ya que hasta 2018 no se consideraba un producto básico. Sin embargo, a partir de 2019, el amaranto ha sido integrado en la canasta básica nacional al considerarse como un grano estratégico en la soberanía alimentaria (Muñoz, 2019), esto debido a la cantidad de carbohidratos, lípidos y proteínas que aporta. Estudios demuestran que el amaranto cuenta con compuestos bioactivos como péptidos, fitoesteroles, escualeno y polifenoles, que ayudan a mantener y beneficiar el estado de salud de las personas, contribuyendo en la prevención y tratamiento de enfermedades cardiovasculares, diabetes, cáncer, antioxidante, entre otros (Herrera y Montenegro, 2012; Herrera-Chalé, Betancur-Ancona y Segura-Campos, 2014).

Actualmente en México, el amaranto es usado principalmente como cereal y su forma de consumo más usual es en granolas y dulces tradicionales. Tanto el cultivo como el proceso de comercialización presentan diversos desafíos debido a la falta de recursos y tecnología aplicada en su proceso de producción y transformación, por lo que, en los últimos años, ha sido motivo de investigación en todo el mundo, haciendo referencia al uso del amaranto en combinación con otros cereales para mejorar las propiedades reológicas de productos de panificación, harinas, pastas, entre otros (Albores-Palacios, 2015; Álvarez-Jubete, Arendt y Gallagher, 2009; Ayala-Garay, Espitia-Rangel, Rivas-Valencia, Martínez-Trejo y Almaguer-Vargas, 2016; Cavieres, Piñeira y Negrete, 2016; García-Ortiz, 2016; Palma-Colindres, 2014; Raihan y Saini, 2017; Torres-Merlo, Vallejos-Cazar y Castañeda-Garzón, 2017).

Este artículo de revisión tiene la intención de resaltar la composición nutrimental de la semilla de amaranto, presentando información sobre algunos compuestos bioactivos, así como las aplicaciones como ingrediente debido a sus propiedades funcionales y diferentes formas de consumo.

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 1. Composición de las semillas de amaranto

A lo largo de la historia, se han utilizado más de 10,000 especies vegetales comestibles como parte de la alimentación humana, aunque actualmente, solo se usan alrededor de 150 especies de plantas que son comercializadas globalmente. De dichas especies, únicamente 12 son las que proporcionan aproximadamente el 80 % de la energía de la dieta humana, y más del 60 % del requerimiento proteico y calórico se cumplen con solo 4 especies: arroz, trigo, maíz y papa (FAO, 2005). Por lo anterior, es importante considerar otras especies vegetales que puedan cubrir los nutrimentos necesarios como parte de una dieta balanceada, como el amaranto.

La equilibrada composición del amaranto puede proporcionar nutrientes esenciales que se requieren para un adecuado crecimiento y desarrollo de la población, así como prevenir trastornos nutricionales, por lo que es utilizado como parte de la dieta de personas en comunidades rurales de bajos ingresos (Kachiguma, Mwase, Maliro y Damaliphetsa, 2015).

La semilla de amaranto está compuesta, en su mayoría, por carbohidratos (70 % b. s.); es excelente fuente de proteínas (21 % b. s.) de alta calidad, posee el doble de lisina (5.9-8.9 g/100 g de proteína) en comparación con otros granos como el maíz y trigo; es rica en minerales (Ca, K, P, Fe y Mg), compuestos fenólicos y ácidos grasos insaturados; además, el amaranto es libre de gluten, por lo que puede ser consumido por personas celiacas. Es importante considerar que la composición química de las semillas de amaranto puede variar de acuerdo con la especie del grano, el lugar y las condiciones de cultivo (El Gendy *et al.*, 2018; Joshi *et al.*, 2018; Mustafa, Seguin y Gélinas, 2011; Venskutonis y Kraujalis, 2013).

Mustafa *et al.* (2011) estudiaron la composición química de 28 genotipos diferentes de semilla de amaranto, entre ellas, *A. hypochondriacus* procedentes de Pensilvania, una semilla

blanca y otra dorada. Dichos autores observaron que existe una relación entre el color de la semilla y las concentraciones de almidón, fibra de detergente neutro (FDN), fibra dietética total, lípidos, taninos, cenizas y minerales como el calcio y el magnesio. La concentración de cenizas, proteína cruda y fibra dietética (total y soluble) resultó ser más alta en las semillas de mayor coloración, resultados que coinciden con lo reportado por Pedersen, Kalinowski y Eggum (1987). El calcio y el magnesio tienen un comportamiento similar, las concentraciones más altas se presentan en las semillas doradas de *A. hypochondriacus*, mientras que el fósforo, potasio y sodio no se ven afectados por la coloración de la semilla. Por el contrario, la cantidad de almidón, lípidos y taninos totales presentes en las semillas blancas de *A. hypochondriacus* es mayor que en las semillas doradas. Kaur, Singh y Rana (2010) estudiaron el contenido de la fibra dietética y observaron que al igual que otros nutrientes el color de la semilla influye en dicho contenido, las semillas de *A. caudatus* tenían coloración marrón rojizo mientras que las de *A. hypochondriacus* presentaron una coloración amarilla cremosa. Se observó que a mayor valor de  $a^*$  y menores valores de  $L^*$  y  $b^*$ , había mayor contenido de fibra.

### 1.1. Nutrientes

#### 1.1.1. Lípidos

La semilla de amaranto contiene de 4.8-8.1 % de lípidos (b. s.) (Saunders y Becker, 1984) y es muy buena fuente de ácidos grasos poliinsaturados, entre los que destacan el omega-6 y el omega-3, además contiene triterpenos como el escualeno (Abreu, Hernández, Castillo, Sampere y Martin, 1995; El Gendy *et al.*, 2018). El Gendy *et al.* (2018) determinaron el contenido de lípidos en *A. hypochondriacus*, encontrando que es significativamente mayor que en especies del género *A. cruentus*; además, los ácidos grasos mayoritarios son el linoleico, el palmítico y el oleico (ver tabla I).

**Tabla 1.** Composición de materia seca, lípidos, ácidos grasos y escualeno de la semilla de *A. hypochondriacus*

Parámetro	Concentración
Materia seca (100 g de semilla)	89.97
Lípidos (100 g de semilla)	7.87
Ác. grasos saturados (100 g de lípidos totales)	18.51-28.60
Mirístico	0.21-0.29
Palmitico	13.76-23.80
Margárico	0.08
C18:0 iso	0.36
Esteárico	2.53-3.98
Araquídico	0.56-0.89
Behénico	0.14-0.32
Lignocérico	0.28
Ác. grasos monoinsaturados (100 g de lípidos totales)	23.10-30.14
Palmitoleico	0.10-0.19
Oleico	22.80-28.82
Oleico cis-11	0.89
Oleico cis-12	0.15
Ác. grasos poliinsaturados (100 g de lípidos totales)	29.59-50.00
Linoleico	28.71-49.10
Linolénico	0.65-0.93
Escualeno (100 g de lípidos totales)	5.72

Adaptada de Jahaniaval, Kakuda y Marcone (2000) y El Gendy *et al.* (2018).

El procesamiento de semillas de amaranto y los tratamientos que se le aplican influyen en el contenido de los lípidos y en su composición (Venskutonis y Kraujalis, 2013). Kaur *et al.* (2010) estudiaron 48 variedades de *A. hypochondriacus* y 11 de *A. caudatus*, y observaron mayor contenido de grasa en *A. caudatus*. Barba de la Rosa *et al.* (2009) obtuvieron harina de amaranto a partir de la molienda de semillas de *A. hypochondriacus* y reportaron un contenido de lípidos del 7.9-8.9 %. En estudios más recientes, se ha visto que el tamaño de partícula y la fracción de molienda es crucial en el procedimiento de extracción de los lípidos de amaranto debido al área de superficie que estará expuesta y en contacto con el solvente (Venskutonis y Kraujalis, 2013).

La composición de los ácidos grasos del amaranto puede modificar las propiedades nutricionales, durante los procesos tecnológicos empleados durante la transformación del grano (Venskutonis y Kraujalis, 2013), dichas propiedades nutrimentales han sido determinadas en diversos estudios en los que se ha visto que los principales ácidos grasos del amaranto, considerando las diferencias que se presentan entre variedades y condiciones de cultivo, son el palmitico, el oleico y el linoleico, como se muestra en la tabla 1. El aceite de amaranto contiene un alto grado de insaturación, por lo que es probable que el contenido de ácidos grasos se modifique durante el procesamiento de la semilla usada en diferentes aplicaciones (Venskutonis y Kraujalis, 2013). Un estudio de Sujak y Dziwulska-Hunek (2010) demostró que el contenido de ácidos grasos esenciales en la semilla de amaranto cosechada se ve favorecido con la estimulación electromagnética de luz láser y/o campo magnético aplicado a las semillas, aumentando dicho contenido.

Entre los fitoesteroles presentes en la semilla de *A. hypochondriacus* se encuentran el campesterol, el estigmasterol y el  $\beta$ -sitosterol. El  $\beta$ -sitosterol es el mayoritario al representar más del 50 % de los fitoesteroles. Además, contiene escualeno, cuyo contenido es de alrededor de 5.72 g/100 g de lípidos totales. La extracción común de escualeno es primordialmente de origen animal, debido a la preocupación por la conservación de las especies marinas a nivel internacional, el amaranto se convierte en una fuente vegetal viable de extracción del escualeno

(Huang, Lin y Fang, 2009). Por esta razón, resulta importante establecer fuentes alternas para el suministro de este compuesto (Rodríguez-Rodríguez *et al.*, 2015).

### 1.1.2. Proteínas

La semilla de amaranto tiene 13.1-21.0 % de proteína cruda (b. s.). El 35 % del total de la proteína del grano se encuentra en el perispermo, y el resto se localiza en el germen (Joshi *et al.*, 2018; Montoya-Rodríguez *et al.*, 2015). Las proteínas presentes en el grano de amaranto son de alta calidad y valor biológico debido al equilibrio de la composición de aminoácidos comparada con otras fuentes como maíz, arroz, trigo y cebada. En general, el amaranto es una opción viable para sustituir ciertos cereales gracias a la funcionalidad de sus proteínas (Montoya-Rodríguez *et al.*, 2015), incluyendo su capacidad de absorción de agua y aceite. El 50-60 % de la proteína total está constituida de albúminas y globulinas de fácil digestión, el 20.8 % la componen glutelinas álcali solubles y el 12 % son prolaminas solubles en alcohol y su digestibilidad es del 90 % (Grobelnik-Mlakar *et al.*, 2010; Zheleznov, Solonenko y Zheleznova, 1997).

En los aislados de proteína de amaranto, la principal fracción proteica está constituida por globulinas, globulina 11S (amarantina) y la globulina 7S. La globulina 11S es la proteína mayoritaria en la semilla de amaranto y la encargada del almacenamiento de nutrientes, es rica en lisina y soluble en soluciones salinas, cuenta con 501 residuos de aminoácidos y una masa molecular de 56 kDa; a esta proteína se le atribuye buena parte de las propiedades nutricias del grano (Barba de la Rosa, Herrera-Estrella, Utsumi y Paredes-López, 1996). Por otro lado, la globulina 7S está presente en menor cantidad, por lo que ha sido menos estudiada que la globulina 11S. Se ha reportado que está formada por 3 subunidades principales llamadas  $\alpha$  (57-68 kDa),  $\alpha'$  (57-72 kDa) y  $\beta$  (42-52 kDa), unidos por enlaces no covalentes para formar un trímero con una masa molecular aproximada de 170-200 kDa (García-González, Flores-Vazquez, Barba de la Rosa, Vazquez-Martinez y Ruiz-García, 2013).

Otras proteínas del amaranto, como las prolaminas y las glutelinas, tienen tareas específicas en la semilla; por ejemplo, la transferencia de fosfolípidos y la regulación de la deposición de

ceras en las paredes celulares de células epidérmicas, la transferencia de glicosilo a través de las membranas, la destrucción de radicales tóxicos, la síntesis de almidón, la síntesis de aminoácidos esenciales, entre otras (Casique, Martínez, Gonzalez y Delano, 2014; Castrillon-Arbeláez, Martínez-Gallardo, Avilés Arnaut, Tiessen y Délano-Frier, 2012; Ramírez-Medevez *et al.*, 2003).

Se ha reportado que en las especies silvestres hay mayor cantidad de proteínas, aminoácidos y otros nutrientes, en comparación de las especies cultivadas (Joshi *et al.*, 2018). Tömösközi, Baracskaï, Schönlechner, Berghofer y Lásztity (2009) estudiaron granos de *A. hypochondriacus* cultivados en Hungría y Austria, y encontraron diferencias en el contenido proteico, variando entre 14.2-17.4 %. En otro estudio, Abbasi, Rouzbehan y Rezaei (2012) encontraron que aumentando la tasa de fertilización con nitrógeno, la proteína cruda y la proteína verdadera aumentaban (9 % y 6.42 %, respectivamente) en *A. hypochondriacus*. De igual forma, Sujak, Dziwulska-Hunek y Kornarzynski (2009) demostraron que es posible mejorar tanto la composición como el contenido de aminoácidos de las semillas de amaranto usando métodos de estimulación electromagnética; la estimulación previa con luz láser de helio-neón y campos magnéticos aumentan la proteína cruda en las semillas de amaranto en un 3.4 %.

El contenido de aminoácidos esenciales oscila entre 31 y 45 g/100 g de la proteína total, asemejándose a la proteína ideal propuesta por la FAO para la alimentación humana. El perfil de la composición de aminoácidos del amaranto generalmente está más cercano al de las leguminosas a excepción de los aminoácidos que contienen azufre, que están presentes en cantidades más altas en amaranto que en las legumbres (Venskutonis y Kraujalis, 2013). El amaranto es rico en lisina (5.9-8.0 g/100 g de proteína), sin embargo, se puede ver disminuida al calentar las semillas (Tömösközi *et al.*, 2009); también es buena fuente de triptófano. Estos dos aminoácidos son limitantes en otros granos (Grobelnik-Mlakar, Turinek, Jakop, Bavec y Bavec, 2010). La metionina contenida en la semilla de *A. hypochondriacus* representa hasta el 2.3 % de la composición de aminoácidos en semillas de México y República Checa, y son comparativamente más altos que en la mayoría de las especies de leguminosas como soya, frijoles, lentejas o garbanzos (Joshi *et al.*, 2018).

**Tabla II.** Composición de aminoácidos (porcentaje del total de la proteína) de la semilla de *A. hypochondriacus*

Aminoácido	República Checa	Eslovaquia	México
Triptófano	-	1.8	1.3
Metionina	2.3	0.6	2.3
Treonina	4.5	3.3	4.6
Isoleucina	3.8	2.7	4.0
Valina	5.3	3.9	4.4
Lisina	8.0	6.0	6.1
Fenilalanina	6.9	4.7	4.8
Leucina	6.9	4.2	6.2
Tirosina	-	3.7	4.3
Histidina	1.7	3.8	2.7
Arginina	14.5	9.5	8.1
Alanina	6.2	3.3	3.9
Ácido aspártico	10.7	8.2	8.1
Ácido glutámico	17.7	14.6	6.6
Glicina	15.2	6.8	-
Prolina	3.7	2.8	-
Serina	9.3	4.9	-

Adaptada de Dodok *et al.* (1997); Písariková *et al.* (2005); Morales Guerrero *et al.* (2009).

En la tabla II, se pueden observar diferencias notables en la composición de aminoácidos entre el *A. hypochondriacus* cultivado en República Checa (Písariková, Kracmar y Herzig, 2005), el cultivado en Eslovaquia (Dodok, Modhir, Buchtová,

Halásová y Poláček, 1997) y el cultivado en México (Morales Guerrero, Vázquez Mata y Bressani Castignoli, 2009). La semilla de *A. hypochondriacus* cultivado en Eslovaquia presentó las concentraciones de aminoácidos más bajas a excepción de la histidina. Por el contrario, las semillas de la República Checa presentaron concentraciones más altas de valina, lisina, fenilalanina, arginina, alanina, ácido aspártico y ácido glutámico, mientras que la metionina, la treonina, la isoleucina y la leucina no presentaron diferencia entre las semillas de México y República Checa.

Juan, Pastor, Alaiz, Megías y Vioque (2007) estudiaron el perfil de proteínas y la composición de aminoácidos de 11 especies de amaranto silvestres, incluida *A. hypochondriacus* mediante cromatografía de filtración en gel y electroforesis desnaturizante, encontraron que los perfiles de aminoácidos eran similares en todas las especies, con pequeñas variaciones en el peso molecular y cantidades de las principales proteínas en la semilla. Para *A. hypochondriacus* y *A. graecizans*, la composición de aminoácidos fue la más deficiente con limitaciones en 5 aminoácidos esenciales (histidina, metionina, triptófano, fenilalanina y valina).

### 1.1.3. Carbohidratos

Los carbohidratos son la principal fuente de energía de la dieta humana. La semilla de amaranto contiene alrededor del 70 % (b. s.) de carbohidratos almacenados en el perispermo. Las semillas de amaranto se componen principalmente por polisacáridos, el almidón que es el componente principal representa el 62-75 % del peso total de la semilla; la fibra dietética es del 4-5 %. El azúcar principal es la sacarosa en un 1.1-2.4 % seguido de la rafinosa en un 0.5-1.2 %, el inositol, la estaquiosa de 0.02-0.2 % y la maltosa de 0.02-0.4 %. Además, tiene hasta 3 veces mayor contenido de sacarosa comparado con el trigo (Becker *et al.*, 1981; Burisová, Tomasková, Sasinková y Ebringerová, 2001; Montoya-Rodríguez *et al.*, 2015; Venskutonis y Kraujalis, 2013).

Un componente importante es la fibra dietética, conformada por polisacáridos no digeribles, oligosacáridos, lignina

y otras sustancias asociadas a la planta (Kaur *et al.*, 2010). De acuerdo con Hozová, Kuniak, Moravčíková y Gajdošová (2007) el amaranto contiene más del 25 % del total de la fibra de  $\beta$ -(1,3)-D-glucano insoluble en agua (liquenano), porcentaje que es superado únicamente por la avena. Otros reportes del contenido de fibra indican que la harina de amaranto extruida contiene alrededor de 13.9 % de fibra total, mientras que, en la harina sin procesar, el contenido de fibra total aumenta a 14.6 %, el proceso de extrusión es un factor que modifica el contenido total de fibra, como resultado de este proceso se producen una serie de cambios en la forma, estructura y composición del producto (Montoya-Rodríguez *et al.*, 2015; Repo-Carrasco-Valencia, Peña, Kallio y Salminen, 2009).

#### 1.1.4. Vitaminas y minerales

Los nutrimentos inorgánicos de la semilla de amaranto se encuentran en el epispermo, el endospermo y el germen. Los minerales que integran el amaranto (tabla III) son calcio, hierro, magnesio, manganeso, fósforo, potasio, sodio, cobre y zinc, encontrándose en mayores concentraciones que en otros cereales.

**Tabla III.** Composición de minerales de la semilla de *A. hypochondriacus*

Macrominerales	mg/g	Micronutriente	mg/g
Calcio	1.91-2.57	Cobre	0.02
Fósforo	6.18-6.31	Hierro	0.17
Magnesio	3.34-3.57	Manganeso	0.06
Sodio	1.25-1.66	Zinc	0.05
Potasio	6.07-7.49	-	-

Adaptada de Saunders y Becker (1984); Mustafa *et al.* (2011).

Las vitaminas que destacan son vitaminas del complejo B, incluyendo la niacina (0.5 mg/100 g de semilla), tiamina (0.14 mg/100 g de semilla) y ácido ascórbico (4.5 mg/100 g de semilla). Se puede encontrar también riboflavina (0.34 mg/100 g de semilla), en mayor proporción que en otros cereales, incluso que en la leche aunque en menor cantidad que en el huevo (Morales Guerrero *et al.*, 2009).

#### 1.1.4.1. Tocoferoles y tocotrienoles

Desde hace poco más de dos décadas se tiene reporte de la presencia de tocotrienoles en semillas de amaranto, siendo los más comunes  $\alpha$ -tocopherol (2.97-15.65 mg/kg),  $\beta$ -tocotrienol (5.92-11.47 mg/kg), y el  $\gamma$ -tocotrienol (0.95-8.69 mg/kg).

Al igual que en la extracción de otros compuestos, también se debe tomar en cuenta la técnica utilizada al evaluar los rendimientos obtenidos de los tocoferoles. Bruni, Guerrini, Scalia, Romagnoli y Sacchetti (2002) compararon los métodos tradicionales con la extracción supercrítica con  $\text{CO}_2$  (ESC- $\text{CO}_2$ ) y ultrasonido como coadyuvante en la extracción. Con el tratamiento con ESC- $\text{CO}_2$  existe menor riesgo de degradación de componentes termolábiles y mejores rendimientos en los extractos, obteniendo 47 % de  $\alpha$ -tocopherol y 63 % de  $\beta$ -tocotrienol más, comparado con el tratamiento con ultrasonido, con lo que se logra optimizar el tiempo del proceso de extracción.

Por otra parte, las muestras de amaranto fresco han demostrado tener niveles más altos de tocotrienoles que cuando se almacenan, debido al proceso de rancidez (Lehmann, Putnam y Qureshi, 1994).

#### 1.2. Compuestos bioactivos

Un compuesto bioactivo puede definirse como aquel compuesto en los alimentos que tiene impacto beneficioso a la salud después de su ingesta. Generalmente, estos compuestos se encuentran en cantidades pequeñas en productos vegetales y en aquellos que son ricos en lípidos (Herrera Chalé, *et al.*, 2014).

El amaranto se ha utilizado desde tiempos prehispánicos, debido a las propiedades nutricionales con las que cuenta. En los últimos años ha sido objeto de estudio al evidenciar el contenido de compuestos médicamente activos, además tiene el beneficio de ser libre de gluten. Estudios proponen que las propiedades medicinales que presenta el amaranto se deben a la presencia de péptidos, tocoferoles mixtos, fitoesteroles, escualeno y flavonoides bioactivos, entre otros compuestos que se describen a continuación (Joshi *et al.*, 2018).

### 1.2.1. Péptidos

El amaranto posee secuencias de péptidos que se encuentran inicialmente inactivas en sus proteínas; cuando estas sufren una hidrólisis durante la ingesta o el procesamiento de este producto, los péptidos son liberados y pueden ejercer una acción biológica, lo que le otorga a la semilla capacidad antihipertensiva y antioxidante. Los péptidos que se encuentran en los hidrolizados de amaranto extruidos y sin procesar contienen aminoácidos como la lisina, prolina, histidina, glicina, alanina y treonina, que poseen actividad antioxidante (Montoya-Rodríguez *et al.*, 2015).

La enzima convertidora de angiotensina (ECA) actúa estrechando los vasos sanguíneos, se desarrolla principalmente en el riñón y es soluble en sangre, orina, linfa, edema pulmonar y líquido cefalorraquídeo (Mauer, Exaire y Escalante, 2001). La actividad inhibitoria de la ECA es la principal actividad biológica estudiada en el amaranto (Caselato-Sousa y Amaya-Farfán, 2012). En el *A. hypochondriacus* se han identificado los tetrapéptidos ALEP y VIKP (con valores de IC<sub>50</sub> de 6.32 mM y 175 μM, respectivamente) que inhiben la ECA y tratan la insuficiencia cardíaca y la hipertensión (Vecchi y Añón, 2009).

Por otra parte, se han identificado péptidos a partir de la proteína globulina 11S del amaranto que han mostrado actividad inhibitoria de la ECA y de la DPP-IV (dipeptidil peptidasa), enzima relacionada con el desarrollo de diabetes tipo II, bloqueando la degradación de hormonas y favoreciendo el control glucémico natural en pacientes diabéticos (Montoya-Rodríguez *et al.*, 2015). Se sugiere, entonces, que los péptidos de amaranto podrían utilizarse como ingredientes alimentarios funcionales en la prevención de la diabetes.

Otros estudios (Silva-Sánchez *et al.*, 2008) indican que la proteína de *A. hypochondriacus* podría tener propiedades anticancerosas similares a las de la lunasina de soya, un péptido de 43 aminoácidos aislado de la fracción proteínica de albúminas del cotiledón de la soya con propiedades quimiopreventivas demostradas (Dia, Torres, De Lumen, Erdman y Gonzalez, 2009).

### 1.2.2. Fitoesteroles

En el caso del amaranto, la información reportada de los esteroides presentes en el aceite es muy poca (León-Camacho, García-González y Aparicio, 2001). Los fitoesteroides son esteroides de origen vegetal pertenecientes al grupo de los isoprenoides, y se encuentran de manera natural en los alimentos, particularmente en semillas de oleaginosas y cereales. Su estructura química es similar a la del colesterol, aunque a diferencia de este, que cuenta con 27 átomos de carbono, los fitoesteroides poseen 28 o 29 átomos debido a la presencia de sustituyentes de tipo metilo o etilo en la cadena lateral de la molécula, distribuidos en un núcleo de 17 carbonos en 4 anillos con un grupo 3-β hidroxilo y una cadena carbonada de 9 a 10 carbonos. Estos compuestos se producen a través de la biosíntesis de los isoprenoides en el citoplasma, posterior a 25 reacciones catalizadas por diferentes enzimas. Se generan a partir de moléculas de acetil-CoA y por la actividad enzimática de la enzima acetil-CoA carboxilasa (ACC), convirtiendo la acetil-CoA en 3-hidroxi-3-metilglutaril CoA, la cual a su vez se reduce a melovato. El melovato mediante procesos sucesivos de fosforilaciones y una descarboxilación es transformado en isoprenoide, el que finalmente da origen a los fitoesteroides. Los fitoesteroides son compuestos importantes en la formación de microdomios en la membrana plasmática en procesos celulares de las plantas (Silva, Pinheiro, Rodríguez, Figueroa y Baginsky, 2016) y se han identificado 250 estructuras diferentes, siendo los más comunes el β-sitosterol, el campesterol y el estigmasterol, los cuales están presentes en la semilla de amaranto (tabla I) (El Gendy *et al.*, 2018).

Los fitoesteroides tienen propiedades hipocolesterolémicas, ya que contribuyen a reducir la absorción de colesterol a través de su solubilización y competencia por espacio en las micelas, ya que poseen una estructura similar y disminuyen el factor de riesgo cardiovascular (Silva *et al.*, 2016).

Se ha reportado que un consumo regular de 1-3 g diarios puede reducir los niveles de colesterol en la sangre hasta en un 15 %, además puede ayudar en la prevención de cáncer, aterosclerosis e inflamaciones (El Gendy *et al.*, 2018). Sin embargo, se calcula que la ingesta diaria de fitoesteroles es de 160-500 mg/día, con lo cual no se alcanza la dosis recomendada para obtener efectos bioactivos en el ser humano (Silva *et al.*, 2016).

Se han encontrado fitoesteroles tanto en el aceite como en las semillas de amaranto, sus cantidades varían entre especies y variedades, sin embargo, cerca del 93 % del total de fitoesteroles es de  $\beta$ -sitosterol (El Gendy *et al.*, 2018). A pesar de que el amaranto es considerado como pseudocereal, posee la mayor concentración de fitoesteroles (178 mg/100 g de semilla), comparado con el resto de los cereales, siendo 5 veces superior a la concentración de la harina de trigo (36 mg/100 g de semilla (tabla IV) (Silva *et al.*, 2016).

**Tabla IV** Concentración de fitoesteroles en alimentos

Cereales	Concentración mg/g
Centeno	110
Trigo	76
Harina de trigo	36
Cebada	83
Avena	52
Maíz	44
Arroz	80
Sorgo	48
Pseudo- cereales	Concentración mg/g
Amaranto	178
Quinoa	83
Alforfón	107

Adaptada de Silva *et al.*, (2016).

Hay varios factores que pueden afectar las concentraciones de los fitoesteroles presentes en los alimentos, como riego deficitario, fertilización y fecha de siembra, sin embargo, se requiere de más estudios para poder usar dichos factores a favor, y lograr mayores concentraciones de estos compuestos (Silva *et al.*, 2016).

### 1.2.3. Escualeno

El escualeno (2, 6, 10, 15, 19, 23- hexametil-2, 6, 10, 14, 18, 22-tetracosahexano) es un ácido triterpeno intermedio en la vía de la biosíntesis del colesterol y su uso es más frecuente en la industria cosmética para productos destinados a la piel; muestra algunas ventajas como agente emoliente, antioxidante, hidratante y antitumoral; posee acción fotoprotectora y es un compuesto termoestable muy efectivo en el tratamiento y envejecimiento de la piel, ayudando en la prevención del daño celular, por lo que es utilizado como material en formulaciones de aplicación tópica, como emulsiones de lípidos y portadores de lípidos nanoestructurados. Además, tiene acción hipocolesterolemica en combinación con otros compuestos, su consumo tiene efecto en la disminución de los niveles de colesterol, y se le relaciona con efectos anticancerígenos de colon, piel y pulmón (Abreu *et al.*, 1995; El Gendy *et al.*, 2018; Huang *et al.*, 2009; Venskutonis y Kraujalis, 2013).

La fuente más importante de escualeno es el aceite de hígado de tiburón y ballena. Debido a los problemas que se pueden llegar a presentar en la extracción y purificación del escualeno proveniente de fuentes animales, se ha considerado la obtención de este compuesto a partir de fuentes vegetales (Venskutonis y Kraujalis, 2013). El aceite de amaranto ha resultado ser una fuente importante de escualeno, ya que la cantidad presente (5.72 g escualeno/100 g de lípidos) es mayor que la que se encuentra en el aceite de oliva, germen de trigo y salvado de arroz, la cual va de 0.1-0.7 % (El Gendy *et al.*, 2018). El contenido de escualeno en el amaranto varía incluso en la misma especie, de acuerdo a las condiciones de cultivo y las técnicas de extracción. El Gendy, *et al.* (2018) reportaron 5.72 g de escualeno/100 g de lípidos totales de semilla de *A. hypochondriacus* (tabla I), mientras que He, Cai, Sun y Corke (2002) obtuvieron 3.6 g escua-

leno/100 g de lípidos, por lo que recomiendan que para conseguir rendimientos de escualeno altos, se deben realizar extracciones y procedimientos con purificaciones en varios pasos.

El tipo de procesamiento al que se someta la semilla para la extracción de escualeno es un factor crucial, ya que afecta la distribución y contenido de este compuesto. Gamel, Mesallam, Damir, Shekib y Linssen (2007) demostraron que la aplicación de tratamiento térmico (180 °C/10 segundos) aumenta el contenido de escualeno. Por otro lado, Tikekar, Ludescher y Karwe (2008) estudiaron la estabilidad de procesamiento del escualeno y la capacidad antioxidante del amaranto reventado y tostado. Los resultados demostraron que el escualeno se mantiene estable durante todas las operaciones de procesamiento, presentando una pérdida del 12 % durante el tostado a 150 °C durante 20 minutos. El escualeno puro resultó ser un antioxidante débil, mientras que el extracto lipófilo de amaranto presentó mayor actividad antioxidante, sugiriendo que los tocotrienoles y otros ingredientes menores también desempeñan un papel como antioxidantes.

#### 1.2.4. Otros compuestos

Otros compuestos que también presentan efecto bioactivo son los polifenoles, los tocoferoles, los tocotrienoles, las saponinas, los taninos, los enoles, los flavonoides, los alcaloides, el glucósido de calcio, los esteroides y los triterpenoides, los cuales tienen acción antiinflamatoria y anticancerogénica (Joshi *et al.*, 2018).

##### 1.2.4.1. Polifenoles

Los principales compuestos que proporcionan la actividad antioxidante en el grano de amaranto son los polifenoles (Montoya-Rodríguez *et al.*, 2015). Barba de la Rosa *et al.* (2009) evaluaron diferentes cultivares de amaranto e identificaron algunos polifenoles como la isoquercetina y la rutina; igualmente, los ácidos fenólicos como los ácidos jeringo y vanílico. López-Mejía, López-Malo y Palou (2014) evaluaron la capacidad antioxidante de los extractos de hojas y semillas del amaranto, concluyeron que ambos tejidos tienen una capacidad antioxi-

dante atribuida no solo a los compuestos fenólicos sino también a la presencia del escualeno.

## 2. Usos, aplicaciones y propiedades de las semillas de amaranto

Las semillas de amaranto son la principal parte de la planta usada como alimento, por lo que tienen muchas aplicaciones. Estas pueden ser sometidas a diferentes tratamientos (inflado, tostado o molienda) para utilizarlas en bebidas o harinas para productos de panificación. El grano reventado se refiere a la semilla que se coloca en comales de barro o metálicos, calentados a fuego de leña o de gas para que se infle. Una vez reventado, se enfría el grano, se criba y se envasa para su almacenamiento y comercialización, o como insumo de otros productos (Ayala *et al.*, 2014; Ayala-Garay *et al.*, 2016).

En México, se producen 79.9 % de productos con grano reventado, 17.2 % en harina y 2.9 % en extruido. El 58.9 % de los productos con amaranto reventado se consume en forma de dulce tradicional (alegrías), además de palanquetas simples, obleas, cubiertos y otros productos, siendo los productores y sus familias, generalmente, quienes procesan la semilla y la comercializan. Además, se usa como suplemento para alimento de animales, en la preparación de granola o para el consumo directo (Ayala-Garay *et al.*, 2016; Montoya-Rodríguez *et al.*, 2015). En algunas comunidades de México, los granos se hierven y cocinan de manera similar al arroz y el almidón lo que da una textura especial al guiso (Herrera y Montenegro, 2012). La harina de amaranto se ha utilizado también para preparar diferentes productos alimenticios como galletas, pastas, pan, bebidas y tamales (Díaz-Ortega *et al.*, 2004; Montoya-Rodríguez *et al.*, 2015).

En muchos países europeos, así como en Estados Unidos, el amaranto es utilizado para sustituir el uso del trigo en productos que se incluyen en dietas de personas celiacas, ya que cuenta con albúminas y globulinas de fácil digestión y es libre de gluten, por lo que es factible su aplicación como ingrediente funcional en muchos productos de panificación (Venskutonis y Kraujalis, 2013). La harina elaborada a partir de semilla de amaranto se uti-

liza en productos de cereales para aumentar el valor nutricional y favorecer la digestibilidad, además de mejorar la calidad de las proteínas, el contenido lipídico y el perfil de aminoácidos sin que los aspectos sensoriales se vean afectados (Joshi *et al.*, 2018).

Se ha visto que los diferentes compuestos nutrimentales de la semilla de amaranto, como las globulinas y el almidón, tienen también aplicaciones como ingredientes debido a sus propiedades funcionales. Tandang-Silvas *et al.* (2012) estudiaron las propiedades fisicoquímicas de las globulinas 7S y 11S de las semillas de amaranto, y encontraron que son de alta estabilidad térmica y con buenas propiedades emulsionantes. Por la capacidad de producción de espuma del 44 %, estabilidad de espuma del 96 %, capacidad de absorción de aceite 70.5 %, actividad emulsificante 79.3 % y estabilidad de emulsión de 93.7 %, a pH de 7.0, estas globulinas del grano de amaranto pueden ser utilizadas en la industria alimentaria con gran versatilidad (Morales Guerrero *et al.*, 2009).

Por otra parte, el comportamiento del almidón es diferente según la especie de la que se extraiga. La harina de *A. hypochondriacus* tiene una temperatura de pastado más alta y una viscosidad, descomposición y retroceso máximos más bajos que los presentes en harina elaborada a partir de semillas de *A. caudatus* (Kaur *et al.*, 2010). Bello-Pérez y Paredes-López (2009) estudiaron los procesos que se llevan cabo durante el manejo y elaboración de la harina y encontraron que estos afectan también la estructura cristalina del almidón y el grado de gelatinización (durante calentamiento), sin embargo, se ha visto que la integridad granular se conserva (González *et al.*, 2007). También se han estudiado las condiciones de remojo durante la molienda húmeda ácida del grano de amaranto, demostrando cambios en el módulo viscoelástico y las propiedades térmicas del almidón de amaranto por efecto de la temperatura (40-60 °C) (Loubes, Calzetta Resio, Tolaba y Suarez, 2012).

Los beneficios bioactivos del amaranto pueden aplicarse también en la elaboración de películas comestibles incorporando los compuestos bioactivos de las semillas, los cuales actúan como agentes antimicrobianos y antioxidantes para que de esta manera se pueda dar al producto mayor vida de anaquel o contribuir

con las propiedades sensoriales (Montes Hernández *et al.*, 2017). Rizzello *et al.* (2009) estudiaron 4 péptidos con actividad antifúngica en el extracto crudo soluble en agua de semillas de amaranto, y encontraron una concentración mínima inhibitoria de 5 mg de péptidos/ml para inhibir especies de hongos aisladas de panaderías, durante el almacenamiento de panes sin gluten y de harina de trigo. El desarrollo de películas comestibles ha cobrado interés actualmente debido a las necesidades de inocuidad, seguridad alimentaria y el aumento en el uso de materiales biodegradables.

## CONCLUSIÓN Y COMENTARIOS FINALES

La influencia que tienen los factores externos, como el lugar de cultivo y las condiciones de cosecha, entre otros factores, tienen gran impacto en la composición nutrimental y en los compuestos bioactivos de la semilla de *A. hypochondriacus*, es por eso que su caracterización sigue resultando interesante y da pauta a seguir investigándola. Se debe fomentar la difusión del valor nutrimental y propiedades funcionales del amaranto para un mejor aprovechamiento del producto, así como el desarrollo de técnicas y tratamientos que permitan mantener los componentes nutrimentales de la semilla. Finalmente, queda aún mucha investigación por realizar sobre las múltiples formas de consumo del amaranto, aprovechando sus propiedades funcionales y de compuestos bioactivos, para utilizarlo como ingrediente.

## AGRADECIMIENTOS

La autora A. E. Peláez-Castañeda agradece a la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP) y al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) —hoy Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)— por el financiamiento para sus estudios de posgrado.

## REFERENCIAS

- Abbasi, D., Rouzbehan, Y. y Rezaei, J. (2012). Effect of harvest date and nitrogen fertilization rate on the nutritive value of amaranth forage (*Amaranthus hypochondriacus*). *Animal Feed and Science Technology*, 171(1), 6-13.
- Abreu, M., Hernández, M., Castillo, A., Sampere, E. y Martín, M. (1995). Evaluación nutricional y toxicológica de dos variedades de amaranto de semillas de color negro (*A. urangensis* y *A. maurensis*). *Revista Cubana de Alimentación y Nutrición*, 9(2), 94-99.
- Albores Palacios, R. Y. (2015). *Desarrollo de galletas tipo barritas de amaranto con camote*. Tesis de licenciatura. Instituto Politécnico Nacional. Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología. Ciudad de México.
- Álvarez-Jubete, L., Arendt, E. K. y Gallagher, E. (2009). Nutritive value and chemical composition of pseudocereals as gluten-free ingredients. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 60(54), 240-257.
- Ayala, A. V., Rivas-Valencia, P., Cortes-Espinoza, L., de la O, M., Escobedo-López, D. y Espitia-Rangel, E. (2014). La rentabilidad del cultivo de amaranto *Amaranthus Spp* en la región centro de México. *Ciencia Ergo-sum*, 21(1); 47-54.
- Ayala-Garay, A. V., Espitia-Rangel, E., Rivas-Valencia, P., Martínez-Trejo, G. y Almaguer-Vargas, G. (2016). Análisis de la cadena del valor de amaranto en México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 13(1), 87-104.
- Barba de la Rosa, A. P., Fomsgaard, I. S., Laursen, B., Mortensen, A. G., Olvera-Martínez, L., Silva-Sánchez C., ... y De León-Rodríguez, A. (2009). Amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) as an alternative crop for sustainable food production: phenolic acids and flavonoids with potential impact on its nutraceutical quality. *Journal of Cereal Science*, 149(5), 117-21.
- Barros, C. y Buenrostro, M. (1997). *Amaranto. Fuente maravillosa de sabor y salud*. (1a. ed.) México: Grijalbo.
- Becker, R., Wheeler, E. L., Lorenz, K., Stafford, A. E., Grosjean, O. K., Betschart, A. A. y Saunders, R. M. (1981). A compositional study of amaranth grain. *Journal of Food Science*, 46(4), 1175-80.
- Bello-Pérez, L. A. y Paredes-López, O. (2009). Starches of some food crops, changes during processing and their nutraceutical potential. *Food Engineering Reviews*, 1(1), 50-65.
- Bruni, R., Guerrini, A., Scalia, S., Romagnoli, C. y Sacchetti, G. (2002). Rapid techniques for the extraction of vitamin E isomers from *Amaranthus caudatus* seeds: ultrasonic and supercritical fluid extraction. *Phytochemical Analysis*, 13(5), 257-61. doi: 10.1002/pca.651
- Burisová, A., Tomasková, B., Sasinková, V. y Ebringerová, A. (2001). Isolation and characterization of the non-starch polysaccharides of amaranth seeds. *Chemical Papers*, 55(4), 254-60.
- Carne y amaranto se integran a canasta básica: AMLO. (29 de enero de 2019). La Jornada Maya. <https://www.lajornadamaya.mx/nacional/134150/Carne-y-amaranto-se-integran-a-canasta-basica--AMLO>
- Caselato-Sousa, V. M. y Amaya-Farfán, J. (2012). State of knowledge on amaranth grain: a comprehensive review. *Journal of Food Science*, 77, 93-104. doi: 10.1111/j.1750-3841.2012.02645.x
- Casique, G., Martínez, N., Gonzalez, L. E. y Delano, J. P. (2014). The tissue-specific expression of genes, spanning the complete betacyanin biosynthetic pathway, is differentially induced by insect herbivory, drought and salinity stress in grain amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*). Submitted to the EMBL/GenBank/DBJ databases.
- Castrillon-Arbeláez, P. A., Martínez-Gallardo, N. A., Avilés Arnaut, H., Tiessen, A. y Délano-Frier, J. P. (2012). Metabolic and enzymatic changes associated with carbon mobilization, utilization and replenishment triggered in grain amaranth (*Amaranthus cruentus*) in response to partial defoliation by mechanical injury or insect herbivory. *BMC Plant Biology*, 12, 163.
- Cavieres, E., Piñeira, M. B. y Negrete C. (2016). Impacto de la incorporación de harina de amaranto en las propiedades físicas y sensoriales en galletas. *Contribuciones Científicas y Tecnológicas*, 41, 41-47.
- Dia, V., Torres, S., De Lumen, B. O. Erdman, L. E. y Gonzalez De Mejia, E. (2009). Presence of lunasin in plasma of men after soy protein consumption. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(4), 1260-1266. doi: 10.1021/jf803303k
- Díaz-Ortega, A. C., Escalante-Estrada, J. A., Trinidad-Santos, A., Sánchez-García, P., Mapes-Sánchez, C. y Martínez-Moreno, D. (2004). Rendimiento, eficiencia agronómica del nitrógeno y eficiencia en el uso del agua en amaranto en función del manejo del cultivo. *Terra Latinoamericana*, 22(1), 109-116.
- Dodok, L., Modhir, A. A., Buchtová, V., Halásová, G. y Poláček, I. (1997). Import

- tance and utilization of amaranth in the food industry. Part 2. Composition of amino acids and fatty acids. *Nahrung-Food*, 41(2), 108-110. doi: 10.1002/food.19970410211
- El Gendy, A. N. G., Tavarini, S., Conte, G., Pistelli, L., Hendawy, S. F., Omer, E. A. y Angelini, L.G. (2018). Yield and qualitative characterisation of seeds of *Amaranthus hypochondriacus* L. and *Amaranthus cruentus* L. grown in central Italy. *Italian Journal of Agronomy*, 13, 63-73. doi:10.4081/ija.2017.993
- Espitia-Rangel, E., Mapes-Sánchez, E. C., Núñez-Colín, C. A. y Escobedo-López, D. (2010). Distribución geográfica de las especies cultivadas de *Amaranthus* y de sus parientes silvestres en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 1(3), 427-437.
- FAO. (2005). *The state of food insecurity in the world*. Roma: FAO.
- Gamel, T. H., Mesallam, A. S., Damir, A. A., Shekib, L. A. y Linssen J. P. (2007). Characterization of amaranth seed oils. *Journal of Food Lipids*, 14, 323-34.
- García-González, A., Flores-Vazquez, A. L., Barba de la Rosa, A. P., Vázquez-Martínez, E. A. y Ruiz-García, J. (2013). Amaranth 7S globulin, Langmuir films and its interaction with 1- $\alpha$ -dipalmitoylphosphatidylcholine at the air-fluid interface. *Journal of Physical Chemistry B*, 117, 14046-58. doi: 10.1021/jp405944u
- García-Ortiz, L. A. (2016). *Propuesta de innovación de una galleta como alimento funcional usando harina de amaranto*. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de México. Centro Universitario UAEM Tenancingo. Tenancingo, Estado de México.
- González, R., Tosí, E., Ré, E., Añón, M. C., Pilosof, A. M. R. y Martínez, K. (2007). Amaranth starch-rich fraction properties modified by high-temperature heating. *Food Chemistry*, 103, 927-34.
- Grobelnik-Mlakar, S., Turinek, M., Jakop, M., Bavec, M. y Bavec, F. (2010). Grain amaranth as an alternative and prospective crop in temperate climate. *Journal for Geography*, 5(1), 135-146.
- He, H. P., Cai, Y. Z., Sun, M. y Corke, H. (2002). Extraction and purification of squalene from *Amaranthus* grain. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 50, 368-72.
- Herrera, S. y Montenegro, A. (2012). El Amaranto: prodigioso alimento para la longevidad y la vida. *Kalpana*, 8, 50-66.
- Herrera-Chalé, F., Betancur-Ancona, D. y Segura-Campos, M. R. (2014). Compuestos bioactivos de la dieta con potencial en la prevención de patologías relacionadas con sobrepeso y obesidad; péptidos biológicamente activos. *Nutrición Hospitalaria*, 29(1), 10-20. doi:10.3305/nh.2014.29.1.6990
- Hozová, B., Kuniak, L., Moravčíková, P. y Gajdošová, A. (2007). Determination of water-insoluble  $\beta$ -D-glucan in the whole-grain cereals and pseudocereals. *Czech Journal of Food Science*, 25(6), 316-324.
- Huang, Z. R., Lin, Y. K. y Fang, J. Y. (2009). Biological and pharmacological activities of squalene and related compounds: potential uses in cosmetic dermatology. *Molecules*, 14(1), 540-54.
- Jahaniaval, F., Kakuda, Y. y Marcone, M. F. (2000). Fatty acid and triacylglycerol composition of seed oils of five *Amaranthus* accessions and their comparison to other oils. *Journal of the American Oil Chemist's Society*, 77(8), 847-52.
- Joshi, D., Sood, S., Hosahatti, R., Kant, L., Pattanayak, A., Kumar, A., ... y Stetter, M. (2018). From zero to hero: the past, present and future of grain amaranth breeding. *Theoretical and Applied Genetics*, 131(9), 1807-1823. doi: 10.1007/s00122-018-3138-y
- Juan, R., Pastor, J., Alaiz, M., Megías, C. y Vioque, J. (2007). Seed protein characterization of eleven species of *Amaranthus*. *Grasas y Aceites* 58(1), 49-55.
- Kachiguma, N. K., Mwase, W., Maliro, M. y Damaliphetsa, A. (2015). Chemical and mineral composition of amaranth (*Amaranthus* L.) species collected from central Malawi. *Journal of Food Research*, 4(4), 92-102.
- Kaur, S., Singh, N. y Rana, J. C. (2010). *Amaranthus hypochondriacus* and *Amaranthus caudatus* germplasm: characteristics of plants, grain and flours. *Food Chemistry*, 123(4), 1227-1234.
- Lehmann, J. W., Putnam, D. H. y Qureshi, A. A. (1994). Vitamin-E isomers in grain amaranths (*Amaranthus* spp). *Lipids* 29(3), 177-81.
- León-Camacho, M., García-González, D. L. y Aparicio, R. (2001). A detailed and comprehensive study of amaranth (*Amaranthus cruentus* L.) oil fatty profile. *European Food Research Technology*, 213 (4-5), 349-355. doi: 10.1007/s002170100340
- López-Mejía, O. A., López-Malo, A. y Palou, E. (2014). Capacidad antioxidante de subproductos de semillas de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*). *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 64(1), 50-58.
- Loubes, M. A., Calzetta Resio, A. N., Tolaba, M. P. y Suarez, C. (2012). Mechanical and

- thermal characteristics of amaranth starch isolated by acid wet-milling procedure. *LWT-Food Science and Technology*, 46(2), 519-524. doi: 10.1016/j.lwt.2011.11.015
- Mauer-Díaz, K., Exaire-Murad, J. E. y Escalante-Acosta, B. (2001). Importancia de la enzima convertidora de angiotensina (ECA) en la circulación coronaria. *Archivos de Cardiología de México*, 71(4), 278-285.
- Montes-Hernández, A. I., Oropeza-González, R. A., Padrón-Pereira, C. A., Araya-Quesada, Y., Wexler-Goering L. y Cubero-Castillo, E. (2017). Películas biodegradables con propiedades bioactivas. *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 8(1), 057-089.
- Montoya-Rodríguez, A., Gómez-Favela, M., Reyes-Moreno, C., Milán-Carrillo, J. y González de Mejía, E. (2015). Identification of bioactive peptide sequences from amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) seed proteins and their potential role in the prevention of chronic diseases. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 14(2), 139-158. doi: 10.1111/1541-4337.12125
- Morales-Guerrero, J. C., Vázquez-Mata, N. y Bressani-Castignoli, R. (2009). *El amaranto: características físicas, químicas, toxicológicas y funcionales y aporte nutricio* (1a ed.). México: Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición Salvador Zubirán.
- Mustafa, A., Seguin, P. y Gélinas, B. (2011). Chemical composition, dietary fibre, tannins and minerals of grain amaranth genotypes. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 62(7), 750-754. doi:10.3109/09637486.2011.575770
- Palma-Colindres, L. J. (2014). *Valor nutritivo y evaluación de aceptabilidad de una galleta formulada a base de trigo, amaranto y ajonjolí en niños escolares*. Tesis de licenciatura. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Guatemala.
- Pedersen, B., Kalinowski, L. S. y Eggum, B. O. (1987). The nutritive value of amaranth grain (*Amaranthus caudatus*). *Plant Foods for Human Nutrition*, 36(4), 309-324.
- Pisaríková, B., Kráčmar, S. y Herzig, I. (2005). Amino acid contents and biological value of protein in various amaranth species. *Czech Journal of Food Sciences*, 50(4), 169-174.
- Raihan, M. y Saini, C. S. (2017). Evaluation of various properties of composite flour from oats, sorghum, amaranth and wheat flour and production of cookies thereof. *International Food Research Journal*, 24(6), 2278-2284.
- Ramírez-Medelez, M. C., Aguilar-Ramírez, M. B., Miguel, R. N., Bolaños-García, V. M., García-Hernández, E. y Soriano-García, M. (2003). Amino acid sequence, biochemical characterization, and comparative modeling of a nonspecific lipid transfer protein from *Amaranthus hypochondriacus*. *Archives Biochemistry and Biophysics*, 415(1), 24-33.
- Repo-Carrasco-Valencia, R., Peña, J., Kallio, H. y Salminen, S. (2009). Dietary fiber and other functional components in two varieties of crude and extruded kiwicha (*Amaranthus caudatus*). *Journal of Cereal Science*, 49(2): 219-224. doi: /10.1016/j.jcs.2008.10.003
- Rizzello, C. G., Coda, R., De Angelis, M., Di Cagno, R., Carnevali, P. y Gobetti, M. (2009). Long-term fungal inhibitory activity of water-soluble extract from *Amaranthus spp.* seeds during storage of gluten-free and wheat flour breads. *International Journal of Food Microbiology*, 131(2-3), 189-96. doi:10.1016/j.ijfoodmicro.2009.02.025
- Rodríguez-Rodríguez, J., Amaya, C. A., Caballero, P., Alanís, M. G., Aguilera, C., Báez, J. G., Moreno, S., y Núñez, M. A. (2015). Factores que influyen en el contenido de escualeno, fitoesteroles totales y esterificados en el subproducto ácidos grasos destilados de soya para su potencial aprovechamiento. *Nova Scientia*, 7(14), 268-285.
- Rosa, de la A. P., Herrera-Estrella, A., Utsumi, S. y Paredes-López, O. (1996). Molecular characterization, cloning and structural analysis of a cDNA encoding an amaranth globulin. *Journal Plant Physiology*, 149(5), 527-32.
- Saunders, R. M. y Becker, R. (1984). Amaranthus: a potential food and feed resource. En Y. Pomeranz, *Advances in cereal science and technology* (pp. 357-397). St. Paul, MN: American Association of Cereal Chemists.
- Silva, S., Pinheiro, A. C., Rodríguez, L., Figueroa, V. y Baginsky, C. (2016). Fuentes naturales de fitoesteroles y factores de producción que lo modifican. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 66(1), 17-24.
- Silva-Sanchez, C., De la Rosa, A. P. B., Leon-Galván, M. F., De Lumen, B. O., De Leon-Rodríguez, A. y González de Mejía, E. (2008). Bioactive peptides in amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) seed. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(4), 1233-1240.
- Sujak, A. y Dziwulska-Hunek, A. (2010). Minerals and fatty acids of amaranth

- seeds subjected to pre-sowing electromagnetic stimulation. *International Agrophysics*, 24(4), 375-379.
- Sujak, A., Dziwulska-Hunek, A. y Kornarzynski, K. (2009). Compositional and nutritional values of amaranth seeds after pre-sowing He-Ne laser light and alternating magnetic field treatment. *International Agrophysics*, 23(1), 81-86.
- Tandang-Silvas, M. R., Cabanos, C. S., Peña, L. D. C., De La Rosa, A. P. B., Osuna-Castro, J. A., Utsumi, S.,... y Maruyama, N. (2012). Crystal structure of a major seed storage protein, 11S proglubulin, from *Amaranthus hypochondriacus*: insight into its physico-chemical properties. *Food Chemistry*, 135(2), 819-26. doi: 10.1016/j.foodchem.2012.04.135
- Tikekar, R. V., Ludescher, R. D. y Karwe, M. V. (2008). Processing stability of squalene in amaranth and antioxidant potential of amaranth extract. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(22), 10675-10678. doi: 10.1021/jf801729m
- Tömösközi, S., Baracska, I., Schönlechner, R., Berghofer, E. y Lásztity, R. (2009). Comparative study of composition and technological quality of amaranth I. Gross chemical composition, amino acid and mineral content. *Acta Alimentaria*, 38(3), 341-347. doi: 10.1556/AAlim.38.2009.3.8
- Torres-Merlo, O. X., Vallejos-Cazar, A. F. y Castañeda-Garzón, J. M. (2017). Productos a base de amaranto como alternativas nutricionales para la lonchera escolar y su importancia en el desarrollo infantil. *Holopraxis Ciencia, Tecnología e Innovación*, 1(2), 117-139.
- Vecchi, B. y Añón, M. C. (2009). ACE inhibitory tetrapeptides from *Amaranthus hypochondriacus* 11s globulin. *Phytochemistry*, 70(7), 864-870. doi:10.1016/j.phytochem.2009.04.006
- Velasco-Lozano, A. M. (2016). Los cuerpos divinos. El amaranto: comida ritual y cotidiana. *Arqueología Mexicana*, 138, 26-33
- Venskutonis, P. y Kraujalis, P. (2013). Nutritional components of amaranth seeds and vegetables: A review on composition, properties, and uses. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 12(4), 381-412. doi:10.1111/1541-4337.12021
- Zheleznov, A. V., Solonenko, L. P. y Zheleznova, N. B. (1997). Seed proteins of the wild and the cultivated *Amaranthus* species. *Euphytica*, 97(2), 177-182.



# Combinación de luz ultravioleta de onda corta (UVC)

con otras tecnologías como tratamientos de pasteurización de alimentos líquidos

---

D. L. Gómez-Sánchez\*, N. Ramírez-Corona y A. López-Malo

\*Trabajo de investigación de la Licenciatura en Ingeniería Química  
Correo electrónico: [nelly.ramirez@udlap.mx](mailto:nelly.ramirez@udlap.mx)

## RESUMEN

**D**urante las últimas décadas se han estudiado diferentes tecnologías emergentes para el procesamiento de alimentos líquidos con el fin de evitar los tratamientos térmicos que tienen la desventaja de modificar los atributos sensoriales del producto. Una tecnología aceptada actualmente por la FDA es el uso de luz ultravioleta de onda corta (UVC) que ha demostrado efectos esterilizantes en muchos productos líquidos; sin embargo, debido a las características particulares de cada fluido (alimento líquido), en especial en presencia de sólidos suspendidos, no se logra tener un aprovechamiento total de la luz UVC. Varios investigadores, por tanto, han buscado combinar esta tecnología con otras, tales como temperaturas moderadas, campos eléctricos pulsados, tratamientos químicos y ultrasonido, con el fin de mejorar la eficacia de los procesos. En esta revisión se presenta una comparación de la efectividad del uso de radiación UVC en combinación con otras tecnologías, sobre la inactivación de diversos microorganismos presentes en alimentos líquidos, discutiendo la existencia de efectos aditivos y/o sinérgicos durante los diferentes tratamientos.

**Palabras clave:** radiación UVC, tecnologías combinadas, alimentos líquidos.

## ABSTRACT

During the last decades, the effectiveness of different emerging technologies for liquid foods processing have been studied, in order to avoid heat treatments that may alter the organoleptic properties of the product. Currently, a new technology accepted by the FDA is the use of short-wave ultraviolet light (UVC) that has showed sterilizing effects on many food products, however, due to the particular characteristics of each fluid in liquid foods, particularly the presence of suspended solids, it is not possible to have a full use of UVC light. Several researchers have therefore attempted to combine this technology with others such as mild temperatures, pulsed electric fields, chemical treatments and ultrasound in order to improve process performances. This review presents a comparison of the effectiveness of UVC radiation in combination with other technologies, on the inactivation of several microorganisms present in liquid foods, discussing the existence of additive and / or synergistic effects during the different treatments

**Keywords:** short wave ultraviolet radiation, combined technologies, liquid foods.

## INTRODUCCIÓN

La radiación ultravioleta es una fuente ya muy conocida por sus efectos esterilizadores, germicidas y de desinfección para superficies inertes, frutas, verduras y algunos productos líquidos transparentes como el agua (Bintsis, Litopoulou-Tzanetaki y Robinson, 2000). En estos casos se utiliza una longitud de onda corta de 254 nm, comúnmente llamada UVC. La radiación UVC para el uso en productos líquidos ha sido ampliamente estudiada y es de manejo versátil, ya que se puede variar la dosis ya sea aumentando el tiempo de exposición y reduciendo la intensidad, o disminuyendo el tiempo de exposición y aumentando la intensidad (Koutchma, Forney y Moraru, 2009).

Esta tecnología tiene un efecto antimicrobiano debido a que al absorber la radiación las células microbianas presentan una ruptura de ciertos enlaces en su ADN, específicamente entre timinas y citosinas que comprometen su reproducción y conducen a su muerte debido a la imposibilidad de realizar una correcta transcripción y replicación del ADN (Guerrero-Beltrán y Barbosa-Cánovas, 2011). Su amplia aplicación se debe a una relativa facilidad de uso, es un tratamiento no térmico y no genera residuos; sin embargo, su poder de penetración es bajo y, por lo tanto, se encuentra con limitantes cuando los líquidos contienen sólidos suspendidos o no son lo suficientemente traslúcidos (Koutchma, Parisi y Patatzca, 2007). Debido a ello se ha buscado combinar con otras tecnologías con la finalidad de mejorar el efecto de la luz ultravioleta sobre los microorganismos. La combinación de tecnologías pretende reducir las desventajas que tienen estas al utilizarse de manera individual, logrando que en conjunto exista una múltiple inactivación de microorganismos gracias al aumento de los factores involucrados, garantizando al mismo tiempo la seguridad alimentaria y la aceptación sensorial (Leistner y Gorris, 1995).

Los alimentos líquidos son de fácil manejo, lo cual permite la aplicación de varios tratamientos a la vez o de manera secuencial. Sin embargo, cuando se utilizan de manera secuencial, es importante considerar el orden de aplicación de dichos tratamientos en su efectividad total, es decir que, si se busca combinar un tratamiento de radiación UVC con otra tecnología, será importante saber si los dos tratamientos son aditivos entre ellos

o si son sinérgicos. En el primer caso el orden de los tratamientos no afecta el resultado final en el procesamiento del producto y su efecto total es la suma de ambos; en el segundo caso sí importará la configuración de los equipos y la secuencia del tratamiento, es decir, si se procesa el alimento primero con la radiación UVC y luego con otra tecnología o viceversa, puesto que esto afectará al resultado final en términos de la inactivación de microorganismos, esperando un efecto total mayor que la suma de los efectos individuales (Wang *et al.*, 2011). Otro aspecto importante a considerar durante la combinación de tecnologías es la evaluación de los diferentes factores que pueden influir en la efectividad del proceso, tales como la turbidez, la viscosidad y la densidad del líquido, los sólidos suspendidos presentes, los caudales manejados, el área de exposición, la capacidad de absorción de luz UVC, entre otros factores.

La presente revisión bibliográfica está enfocada en la comparación de la efectividad del uso de diferentes tecnologías, tanto tradicionales como emergentes, en combinación con la radiación ultravioleta de onda corta sobre la inactivación de diversos microorganismos presentes en alimentos líquidos.

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 1. Luz ultravioleta de onda corta (UVC)

La luz ultravioleta de onda corta (UVC) es una tecnología que ofrece una alternativa a los tratamientos térmicos para el procesamiento de alimentos líquidos, pues, dado que no eleva significativamente la temperatura del producto, suele conservar los nutrientes y la percepción sensorial original que los consumidores buscan (López-Malo y Palou, 2005). A pesar de las múltiples aplicaciones y ventajas del uso de la radiación ultravioleta de onda corta, existen limitaciones que no permiten alcanzar las 5 reducciones logarítmicas de la población microbiana en ciertos alimentos líquidos que requiere la FDA (2000).

La limitación más importante suele ser la opacidad del producto, debido a la baja penetración de la radiación. Por lo tanto, durante el diseño de equipos UVC se busca que la luz se encuentre lo más cerca posible del medio a tratar, en caso de no ser posible, se sugiere incrementar la turbulencia en el flu-

jo para homogeneizar la radiación recibida (Koutchma, Keller, Chirtel y Parisi, 2004). A pesar de recomendaciones como esta, dado que no todos los productos líquidos son transparentes, resulta interesante buscar la combinación de otros métodos para mejorar la efectividad de los tratamientos UVC.

## 2. Combinación de radiación ultravioleta con tecnologías tradicionales

### 2.1. Tratamientos térmicos

La combinación de luz UVC con tratamientos térmicos ha sido una de las tecnologías combinadas más estudiadas, pues suele mostrar buenos resultados en la reducción lineal logarítmica de los microorganismos a tratar. Gayán *et al.* (2012) evaluaron esta combinación directamente en caldos de cultivo de soya triptona con *Salmonella entérica*, usaron 8 lámparas UVC de 8W, cada una distribuida en ocho reactores con capacidad de  $56.2 \pm 2.4$  mL en los que se varió la radiación de UVC entre 12.8 y 18.0 J/mL. Para la combinación con el tratamiento térmico, todos los reactores fueron sumergidos en un baño con temperaturas de 45 a 60 °C. Los autores obtuvieron resultados de 0.5 reducciones logarítmicas para el tratamiento de luz UVC y de 2.3 reducciones logarítmicas para el tratamiento de luz UVC combinado con baños a 55 °C, siendo este último su mejor resultado.

Gouma *et al.* (2015) realizaron un tratamiento similar al presentado por Gayán *et al.* (2012), pero evaluando el efecto de la combinación de UVC con calor sobre levaduras inoculadas en jugo de manzana comercial. Este experimento se desarrolló utilizando una dosis de UVC de 2.9 J/mL, se observaron mejores resultados con una combinación a una temperatura de 55 °C, teniendo como resultado una reducción logarítmica de 0.3 para el tratamiento con UVC y de 1.3 para el tratamiento combinado. En ambos estudios se concluyó que el pH no influye en la inactivación con luz UVC, con esta temperatura ambos reportan una sinergia entre tratamientos pues, en ambos casos, se observa que el incremento de temperatura sensibiliza al microorganismo a la luz UVC y se logra reducir la población microbiana en más de 1 log en tan solo 2.7 minutos de tratamiento.

En el estudio realizado por Gabriel *et al.* (2018) se combinó una lámpara UVC (15 W de potencia a una distancia del líquido

de 21.1 cm, logrando una dosis de entre 17.30 y 25.26 mJ/cm<sup>2</sup>), con rangos de exposición de 50 a 125 segundos. El tratamiento térmico se realizó a diferentes temperaturas (55, 57, 60 y 63 °C) para diferentes microorganismos inoculados en endospermo líquido de coco o agua de coco comercial. Los mejores resultados se obtuvieron a una temperatura de 55 °C, alcanzando más de 5 reducciones logarítmicas para los diferentes microorganismos probados, a pesar de que los patógenos muestran una mayor resistencia al tratamiento térmico. Las reducciones logarítmicas puntuales de cada microorganismo se resumen en la tabla I con el fin de compararlos con los resultados reportados en otros trabajos.

García, Ferrairo y Guerrero (2018) trataron jugo de naranja con zanahoria inoculado con la levadura *Saccharomyces cerevisiae* con dos lámparas UVC (30 W) conectadas en serie dentro de un tubo de vidrio, lo cual corresponde a una radiación de 10.6 kJ/m<sup>2</sup>. El jugo fue irradiado en rangos de tiempo de 0 a 15 minutos en una cámara provista de recirculación para mantener la temperatura en 20 o 50 °C. Durante estos experimentos se monitoreó la integridad de las membranas celulares de la levadura, en donde se encontró que la combinación de tratamientos hace daños subletales como alteraciones en la coagulación y vacuolización de la célula. Se observó que el tratamiento daña las paredes celulares, causando una deformación de estas, lo cual provoca daños estructurales que no se observan en los tratamientos aislados. Dichos autores obtuvieron 2.6 reducciones logarítmicas con radiación UVC a 20 °C y 4.7 reducciones con los tratamientos a 50 °C, lo cual indica del efecto aditivo de estas dos tecnologías.

En general, varios autores reportan una mayor inactivación de los microorganismos probados cuando se combina el tratamiento UVC con tratamientos térmicos a temperaturas de 50 a 55 °C. En la tabla I se presenta una comparación de los resultados obtenidos por diferentes autores para la combinación del uso de radiación UVC con tratamientos térmicos.

### 2.2. Adición de antimicrobianos

La adición de otro componente busca que el medio en donde se encuentran los microorganismos deje de ser apto para su supervivencia; sin embargo, cuando se trata de medios ácidos como

**Tabla I.** Comparativo de luz ultravioleta de onda corta (UVC) en combinación con tecnologías tradicionales

Tecnología combinada	Medio/alimento	Microorganismo	Dosis		Reducción logarítmica		Referencia	
			UVC	Tecnología en combinación	UVC	UVC + combinación		
Temperatura media	Caldo de soya triptona adaptada	<i>Salmonella enterica</i>	12.8-18.0 J/mL	Baño de agua a 55 °C	0.5	2.3	Gayá <i>et al.</i> , 2012	
	Jugo de manzana	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	2.9 J/mL		0.3	1.3	Gouma <i>et al.</i> , 2015	
	Endospermo líquido de coco	<i>Escherichia coli</i>	0.2526 kJ/m <sup>2</sup>		Baño de agua a 50 °C	1.82	5.94	Gabriel <i>et al.</i> , 2018
		<i>Salmonella enterica</i>	0.173 kJ/m <sup>2</sup>			0.16	5.62	
		<i>Listeria monocytogenes</i>	0.2465 kJ/m <sup>2</sup>			2.02	6.20	
	Jugo de naranja con zanahoria	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	10.6 kJ/m <sup>2</sup>		Baño de agua a 50 °C	2.6	4.7	García, Ferrairo y Guerrero, 2018
Adición de antimicrobiano	Néctar de durazno	<i>Aspergillus flavus</i>	203 kJ/m <sup>2</sup>	1000 ppm benzoato de sodio	2.8	3.2	Flores-Cervantes, <i>et al.</i> , 2013	
		<i>Aspergillus niger</i>			1.5	2.9		
	Dongchimi	Bacterias aerobias	6 kJ/m <sup>2</sup>	0.1 % extracto de semilla de uva	1.66	3.06	Choi <i>et al.</i> , 2017	
		Bacterias ácido-lácticas			2.44	3.3		
		Levaduras y hongos			1.74	2.27		
Adición de desinfectante	Arándanos	<i>Salmonella enterica</i>	27.6-33.6 kJ/m <sup>2</sup>	8 ppm cloro	1.72 ± 0.06	2.52 ± 0.10	Huang, Vries y Chen, 2018	
				2 % H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>		2.01 ± 0.27		
				80 ppm PPA		2.60 ± 0.16		
	Zanahoria cortada			8 ppm cloro		1.99 ± 0.22		3.40 ± 0.69
				2 % H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>				1.93 ± 0.31
				80 ppm PPA				3.65 ± 0.78

los jugos, también existe una resistencia mayor de los microorganismos al tratamiento con aditivos. Flores-Cervantes, Palou y López-Malo (2013) adicionaron como antimicrobianos sorbato de potasio y benzoato de sodio en concentraciones de 250 a 2,000 ppm a un néctar de durazno inoculado con diferentes hongos, *Aspergillus flavus* y *Aspergillus niger*. El néctar fue irradiado con luz UVC en dosis máximas de 203 kJ/m<sup>2</sup> en diferentes momentos del tratamiento; los resultados mostraron que la combinación UVC-benzoato de sodio (1,000 ppm) provocó hasta 3 reducciones logarítmicas, específicamente con el antimicrobiano adicionado después del tratamiento de radiación y un caudal de proceso de 1.4 L/min. Los resultados únicamente con adición de benzoato de sodio mostraron una reducción logarítmica cercana a 2.6, mientras que la simple irradiación de UVC provocó reducciones logarítmicas de 2.8 y 1.5 para *A. flavus* y *A. niger*, respectivamente.

Choi, Park, Yang y Chun (2017) adicionaron un antimicrobiano proveniente del extracto de semillas de uvas (GSE, por sus siglas en inglés) a un caldo tradicional de China (*dongchimi*). Durante el tratamiento el caldo fue irradiado con 4 lámparas UVC de 20 W, cada una a una distancia de 15 cm, posterior a esto se disolvió el extracto en el caldo a diferentes concentraciones. Estos autores encontraron que la mejor combinación de UVC-GSE se obtiene al utilizar una dosis de 6 kJ/cm<sup>2</sup> de radiación UVC y al adicionar 0.1 % del extracto, aumentando las reducciones logarítmicas de diferentes tipos de bacterias y levaduras de un rango de 1.66-2.44 a rangos de 2.27-3.3. En este estudio se concluyó que la adición de antimicrobianos es más efectiva después de que el alimento ha sido irradiado con UVC, lo cual es consistente con lo reportado por Flores-Cervantes, Palou y López-Malo (2013).

Huang, Vries y Chen (2018) evaluaron la adición de agentes desinfectantes como cloro, peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) y ácido peroxiacético (PPA). Estos autores realizaron sus experimentos con diferentes verduras sumergidas en caldos inoculados con *Salmonella entérica*, la fuente de luz UVC fue provista por cuatro lámparas de 90 cm y 265 W, cada una a 17 cm de distancia de la mezcla a tratar (dosis de 27.6-33.6 kJ/m<sup>2</sup>). Los resultados muestran que la adición de agentes desinfectantes o antimicrobianos resulta en una mejoría del proceso y que el tratamiento puede ser utilizado indirectamente para

alimentos sólidos. En la tabla I se muestran únicamente los resultados para el tratamiento con arándanos frescos y zanahoria cortada, en los que se observa que el cloro y el PPA en concentraciones de 8 ppm y 80 ppm, respectivamente, son de los desinfectantes más efectivos, y en combinación con UVC logran reducir la población microbiana de *S. entérica* en más de 2.5 ciclos logarítmicos.

### 3. Combinación de radiación ultravioleta con tecnologías emergentes

Durante los últimos años diversos investigadores han evaluado métodos alternativos a los tratamientos térmicos, o bien a la adición de agentes germicidas, considerados la tecnología convencional más utilizada, con la finalidad de minimizar el cambio en las propiedades nutricionales y organolépticas de los alimentos tratados. Estas tecnologías, conocidas como tecnologías emergentes, incluyen el uso de fuentes de energía como luz ultravioleta, ultrasonido, pulsos eléctricos, pulsos de luz, microondas, o bien la combinación de dos o más de estos tratamientos, siendo los más efectivos el uso de luz ultravioleta, pulsos eléctricos y ultrasonido. En la siguiente sección se discutirán algunos resultados de la efectividad de tratamientos combinados al utilizar UVC con otras tecnologías emergentes.

#### 3.1. Campos eléctricos pulsados

Una alternativa de combinación de tratamientos es el uso de campos eléctricos pulsados (PEF, por sus siglas en inglés), un tratamiento no térmico que tiene un mecanismo de inactivación que provoca daños celulares irreversibles por la formación de poros en la membrana celular de microorganismos deterioradores o patógenos presentes en alimentos, fenómeno llamado electroporación (Hamilton y Sale, 1967).

Gachovska *et al.* (2008) realizaron experimentos con jugo de manzana inoculado con *Escherichia coli* en el cual se alcanzaron las mayores reducciones con campos eléctricos de 162 J/mL y 11.3 pulsos, junto con un tratamiento de luz UVC con una lámpara de longitud de 30 cm y un tiempo de exposición de 2.94 segundos (caudal de 8 mL/min).

Noci *et al.* (2008) trataron la flora microbiana nativa de un jugo de manzana fresco con una potencia de 30 W de luz UVC a 30 cm del jugo y 100 pulsos de 15 Hz y 1  $\mu$ s, con un

caudal del líquido de 15.75 mL/min (tiempo de residencia de 6.67 segundos). Dichos autores reportaron reducciones logarítmicas mayores a 5 sin importar el orden para realizar el tratamiento, mientras que el solo uso de la luz UVC tuvo reducciones de 2 a 3.5 log.

Palgan *et al.* (2011) también realizaron combinaciones con este tipo de tecnologías, en donde utilizaron campos eléctricos pulsados de 18 Hz por un pulso de 1  $\mu$ s. El jugo de manzana y arándano utilizado, inoculado con *E. coli* o *Pichia fermentans*, se procesó a una temperatura de 20 °C con un flujo de 20.8 mL/min y se expuso a un campo eléctrico de 34 kV/cm por 93  $\mu$ s. El flujo volumétrico dentro de la lámpara UVC fue de 176 mL/min con un tiempo de residencia de 30 segundos dentro de la unidad. Después de su tratamiento, los investigadores alcanzaron resultados cercanos a 6 reducciones logarítmicas, sin que el orden de los tratamientos afectara este valor. Como puede observarse, la combinación de PEF-UVC muestra efectos aditivos, mas no sinérgicos entre ellos.

### 3.2. Ultrasonido

El ultrasonido (US), al igual que los campos eléctricos pulsados, ha sido considerado como método emergente y no térmico para el tratamiento de alimentos líquidos. Su mecanismo de inactivación consiste en la formación, evolución y posterior implosión de burbujas y microburbujas en el proceso, debido al fenómeno de cavitación que produce y que por consecuencia provoca daño celular (Knorr, Zenker, Heinz y Lee, 2004).

Autores como Char, Mitilinaki, Guerrero y Alzamora (2010), Palgan *et al.* (2011) y Antonio-Guriérrez, López-Malo, Ramírez-Corona y Palou (2017) han reportado un efecto sinérgico entre los tratamientos de luz ultravioleta junto con el uso de ultrasonido, en los cuales se alcanzan desde 2 hasta 6 reducciones logarítmicas.

Char, Mitilinaki, Guerrero y Alzamora (2010) evaluaron el efecto de combinar UVC con US durante el tratamiento de jugo de naranja inoculado con *E. coli*, encontrando un efecto sinérgico cuando se irradia primeramente el jugo (utilizando una lámpara

UVC, 90 cm de 100 W) por periodos de 5 a 20 minutos y posteriormente se utiliza un ultrasonido (20 kHz con amplitud de 95  $\mu$ m) con un flujo de 0.2 L/min. Dichos autores obtienen reducciones logarítmicas de *E. coli* cercanas a 1.8 y 1.9 con los tratamientos individuales de UVC y US respectivamente, y una reducción muy similar cuando realizan el tratamiento consecutivo UVC-US. Sin embargo, al realizar los dos tratamientos de forma simultánea, logran aumentar las reducciones logarítmicas hasta 3.5, demostrando una sinergia entre ambos.

Palgan *et al.* (2011) evaluaron el efecto de ambas tecnologías (UVC y US) para el tratamiento de jugo de manzana y arándano inoculado con *E. coli* o *Pichia fermentans*. Dado que el ultrasonido provoca aumento de temperatura en la muestra, el jugo se mantuvo en un baño de -15 °C para ser tratado con un ultrasonido de 20 kHz con una amplitud de 23  $\mu$ m y 750 W de potencia. La dosis de energía de la lámpara UVC con una potencia de 30 W fue de 5.3 J/cm<sup>2</sup> para un flujo de 176 mL/min con un tiempo de residencia de 30 segundos dentro de la unidad. Al combinar ambas tecnologías se observaron reducciones logarítmicas mayores a 6 para los 2 microorganismos probados.

Antonio-Gutiérrez, López-Malo, Ramírez-Corona y Palou (2017) evaluaron el efecto de la atomización ultrasónica (20 kHz al 100 % de amplitud) en combinación con luz UVC, para el tratamiento de jugos de toronja y mandarina comercial inoculados con *S. cerevisiae*. Los jugos tratados fueron bombeados y atomizados por el US directamente a la luz UVC a una velocidad de 1.1 mL/s y procesado 3 veces. Los autores evaluaron 6 configuraciones con lámparas UVC de 35 cm de largo y diferentes espacios anulares entre la lámpara y la carcasa de acero inoxidable, evaluando también la conveniencia de utilizar o no dicha carcasa. El arreglo más efectivo se obtuvo al utilizar la lámpara dentro de la carcasa de acero inoxidable con el espacio anular más grande (5 cm de diámetro), logrando una mayor superficie de contacto de las moléculas atomizadas con el ultrasonido, además de mejorar la distribución de la luz UVC gracias al reflejo. Como resultado en esta última

configuración se obtuvieron casi 3 reducciones logarítmicas de *S. cerevisiae*, mientras que los otros arreglos alcanzaban un máximo de 1.5 reducciones.

En la tabla II se muestra un resumen de estas tecnologías combinadas, se observa que la combinación tanto de ultra-

sonido como de campos eléctricos pulsados junto con la luz UVC da mejores resultados en cuanto a la reducción de población microbiana. Sin embargo, cabe destacar que para los casos con mayor inactivación los tiempos de radiación continúan siendo altos (de 20 a 30 minutos de exposición).

**Tabla II.** Comparativo de luz ultravioleta de onda corta en combinación con tecnologías emergentes

Tecnología combinada	Medio	Microorganismo	Dosis		Reducción logarítmica		Referencia
			UVC	Tecnología en combinación	UVC	UVC + combinación	
Campos eléctricos pulsados	Jugo de manzana	<i>Escherichia coli</i>	30 cm*	60 kV/cm	3.46	5.33-5.35	Gachovska <i>et al.</i> , 2008
	Jugo de manzana fresco	Flora microbiana nativa	30 min*	40 kV/cm	2.2	6.2-7.1	Noci <i>et al.</i> , 2008
	Jugo de arándano y manzana	<i>Escherichia coli</i>	53 kJ/m <sup>2</sup>	34 kV/cm	1.9	6.1	Palgan <i>et al.</i> , 2011
<i>Pichia fermentans</i>				1.8	6.0		
Ultrasonido	Jugo de naranja	<i>Escherichia coli</i>	20 min*	20 kHz	1.8	3.5	Char <i>et al.</i> 2010
	Jugo de arándano y manzana	<i>Escherichia coli</i>	53 kJ/m <sup>2</sup>	20 kHz	1.9	6.1	Palgan <i>et al.</i> , 2011
		<i>Pichia fermentans</i>			1.8	6.0	
	Jugo de toronja	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	3.13 J/mL	20 kHz	0.23 ± 0.02	2.77 ± 0.08	Antonio-Gutiérrez <i>et al.</i> , 2017
Jugo de mandarina	0.35 ± 0.11				2.88 ± 0.02		

\*No se reporta dosis.

#### 4. Factores que afectan en la combinación de tecnologías con la radiación UVC

De la revisión presentada se observa que todos los tratamientos siguen siendo dependientes de las características del fluido, sobre todo en factores de absorbancia y turbidez. Como se discutió a lo largo de la presente revisión, cuando los medios que utilizan los diferentes autores presentan una mayor turbidez y absorbancia (jugos de naranja, zanahoria, mandarina y néctar de durazno), la inactivación que se puede lograr es menor que los casos en los que se trabaja con medios que tienen una menor absorbancia y turbidez (jugos de arándano, manzana y agua de coco). Este resultado es debido a que a mayor turbidez existe una menor transmitancia de la luz (Koutchma, Forney y Moraru, 2009), es decir, que la opacidad del producto se torna en una protección al microorganismo al que se quiere eliminar y afecta el aprovechamiento de la radiación ultravioleta. Si bien las características ópticas del jugo continúan siendo una limitante, las condiciones de procesamiento tales como velocidad y régimen de flujo, espesor de la película a tratar, intensidad de la radiación y configuración del equipo pueden contribuir a mejorar el área de contacto de la luz con el líquido y la penetración de la radiación a través de este.

Por otro lado, se ha observado que la efectividad de la luz UVC se puede mejorar cuando se combina con otras tecnologías, particularmente cuando actúan de manera sinérgica. En muchos casos los autores mencionan una mejoría del proceso si la aplicación de la tecnología alternativa, ya sea tradicional o emergente, se realiza después de la radiación de la muestra. Esto puede deberse a los mecanismos de acción a niveles de ADN que provoca la luz ultravioleta; una vez que la radiación UVC ha causado rupturas en los enlaces del ADN, la posterior exposición de los microorganismos a otra tecnología, como la adición de componentes antimicrobianos (o desinfectantes), o bien el uso de calor, ultrasonido o PEF, daña aún más a las células gracias a sus mecanismos de inestabilización celular. En el caso particular de los PEF combinados con el UVC, se observa que el orden de los procesos no afecta en el rendimiento del tratamiento, proba-

blemente debido a que el daño por la electroporación, así como el daño a nivel de ADN, es efectivo solo para aquellas células sanas, por lo que el deceso de los microorganismos es el mismo sin importar si la electroporación se hace previa o posteriormente al daño causado por la luz UVC.

## CONCLUSIONES

El uso de luz UVC ha sido estudiado en los últimos años como una alternativa no térmica para el procesamiento de alimentos líquidos, particularmente para jugos de frutas inoculados con diferentes microorganismos de interés. Las dosis reportadas en los diferentes trabajos varían desde los 0.1 a los 203 kJ/m<sup>2</sup>, de 2 a 18 J/mL y de 20 a 30 minutos de exposición, algunos autores reportan que es posible obtener buenos resultados con dosis bajas. Sin embargo, su aplicación se encuentra limitada por las propiedades ópticas del alimento a procesar, ya que la presencia de sólidos suspendidos y/o componentes colorantes puede reducir significativamente el correcto aprovechamiento de la radiación ultravioleta. Con la finalidad de incrementar el efecto de la luz UVC, o aprovechar más un factor de inactivación de manera simultánea, se ha evaluado la combinación de diferentes tecnologías junto con la UVC. Si bien es difícil comparar los tratamientos en términos de dosis recibidas, ya que depende de diferentes factores como el tipo de lámpara, arreglo, tiempo de residencia, espesor de película, etc., queda claro que la combinación de tratamientos mejora la eficiencia en la inactivación de diferentes microorganismos que deterioran los alimentos líquidos, particularmente en aquellos casos en los que se observan efectos sinérgicos, como la combinación de UVC con PEFs.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP) por el apoyo y el financiamiento.

## REFERENCIAS

- Antonio-Gutiérrez, O., López-Malo, A., Ramírez-Corona, N. y Palou, E. (2017). Enhancement of uvc-light treatment of tangerine and grapefruit juices through ultrasonic atomization. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 39, 7-12.
- Bintsis, T., Litopoulou-Tzanetaki, E. y Robinson, R. K. (2000). Existing and potential applications of ultraviolet light in the food industry: A critical review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80(6), 637-645.
- Caminiti, I. et al. (2011). Impact of selected combinations of non-thermal processing technologies on the quality of an apple and cranberry juice blend. *Food Chemistry*, 124(4), 1387-1392.
- Char, C. D., Mitilinaki, E., Guerrero, S. N. y Alzamora, S. M. (2010). Use of high-intensity ultrasound and uv-c light to inactivate some microorganisms in fruit juices. *Food Bioprocess Technology*, 3(6), 797-803.
- Choi, E. J., Park, H. W., Yang, H. S. y Chun, H. H. (2017). Effects of combined treatment with ultraviolet-c irradiation and grape seed extract followed by supercooled storage on microbial inactivation and quality of dongchimi. *LWT-Food Science and Technology*, 85(A), 110-120.
- FDA (Food Drug Administration). (2000). 21 CFR Part 179: irradiation in the production, processing and handling of food.
- Flores-Cervantes, D. X., Palou, E. y López-Malo, A. (2013). Efficacy of individual and combined uvc light and food antimicrobial treatments to inactivate *Aspergillus flavus* or *A. niger* spores in peach nectar. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 20, 244-252.
- Gabriel, A. A., Ostonal, J. M., Cristobal, J. O., Pagal, G. A. y Armada, J. V. E. (2018). Individual and combined efficacies of mild heat and ultraviolet-c radiation against *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella enterica*, and *Listeria monocytogenes* in coconut liquid endosperm. *International Journal of Food Microbiology*, 277, 64-73.
- Gachovska, T. K., Kumar, S., Thippareddi, H., Subbiah, J. y Williams, F. (2008). Ultraviolet and pulsed electric field treatments have additive effect on inactivation of *E. coli* in apple juice. *Journal of Food Science*, 73(9), 412-417.
- García, M. G., Ferrairo, M. y Guerrero, S. (2018). Effectiveness of uv-c light assisted by mild heat on *Saccharomyces cerevisiae* KE 162 inactivation in carrot-orange juice blend studied by flow cytometry and transmission electron microscopy. *Food Microbiology*, 73, 1-10.
- Gouma, M., Gayán, E., Raso, J., Condón, S. y Álvarez, I. (2015). Inactivation of spoilage yeasts in apple juice by uv-c light and in combination with mild heat. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 32, 146-155.
- Guerrero-Beltrán, J. A. y Barbosa-Cánovas, G. V. (2011). Ultraviolet-c light processing of liquid food products. En H.Q. Zhang, G.V. Barbosa-Cánovas, V. M. Balasubramaniam, C. P. Dunne, D.F. Farkas, J.T.C. Yuan, *Nonthermal Processing Technologies for Food* (1a Ed., 262-270). Inglaterra: Wiley-Blackwell and IFT Press.
- Hamilton, W. A. y Sale, A. J. H. (1967). Effects of high electric fields on microorganisms. II. Mechanism of action of the lethal effect. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)*, 148(3), 789-800.
- Huang, R., de Vries, D. y Chen, H. (2018). Strategies to enhance fresh produce decontamination using combined treatments of ultraviolet, washing and disinfectants. *International Journal of Food Microbiology*, 283, 37-44.
- Knorr, D., Zenker, M., Heinz, V. y Lee, D. U. (2004). Applications and potential of ultrasonics in food processing. *Trends in Food Science and Technology*, 15(5), 261-266.
- Koutchma, T., Keller, S., Chirtel, S. y Parisi, B. (2004). Ultraviolet disinfection of juice products in laminar and turbulent flow reactors. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 5(2), 179-189.
- Koutchma, T. N., Forney, L. J. y Moraru, C. I. (2009). *Ultraviolet Light in Food Technology Principles and Applications* (1a ed.). Florida: CRC Press.
- Koutchma, T. N., Parisi, B. y Patazca, E. (2007). Validation of uv coiled tube reactor for fresh juices. *Journal of Environmental Sciences*, 6(3), 319-328.
- Leistner, L. y Gorris, L. (1995). Food preservation by hurdle technology. *Trends in Food Science & Technology*, 6(2), 41-46.
- López-Malo, A. y Palou, E. (2005). Ultraviolet light and food preservation. En Barbosa-Cánovas, G. V., Tapia, M. S. y Cano, M. P., *Novel Food Processing Technologies*. (1a ed., 405-422). Madrid: CRC Press.
- Noci, F., Riener, J., Walkling-Ribeiro, M., Cronin, D. A., Morgan, D. J. y Lyng, J. G. (2008). Ultraviolet irradiation and pulsed electric fields (PEF) in a hurdle strategy for the preservation of fresh apple Juice. *Journal of Food Engineering*, 85, 141-146.
- Palgan, I., Caminiti, I. M., Muñoz, A., Noci, F., Whyte, P., Morgan, D. J., ... y Lyng, J. G. (2011). Combined effect of selected non-thermal technologies on *Escherichia coli* and *Pichia fermentans* inactivation in an apple and cranberry juice blend and on product shelf life. *International Journal of Food Microbiology*, 151(1), 1-6.
- Wang, S., Meckling, K. A., Marcone, M. F., Kakuda, Y. y Tsao, R. (2011). Synergistic, additive, and antagonistic effects of food mixtures on total antioxidant capacities. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(3), 960-968.

**UDLAP<sup>®</sup>**

Departamento de Ingeniería Química,  
Alimentos y Ambiental