

Métodos para la determinación de la dosis de radiación ultravioleta de onda corta (uvc) en alimentos

O.T. Antonio-Gutiérrez*, A. López-Malo, E. Palou y N. Ramírez-Corona

Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental, Universidad de las Américas Puebla.

Ex hacienda Sta. Catarina Mártir, C.P.72810, San Andrés Cholula, Puebla, México.

RESUMEN

La radiación ultravioleta de onda corta (uvc) ha sido aplicada ampliamente en la desinfección de superficies de diversos materiales y en la desinfección del agua. Investigaciones de los últimos años sugieren que esta tecnología tiene la capacidad de ser aplicada en alimentos sólidos y líquidos para su desinfección, ya que posee un potente efecto esterilizador sobre diferentes microorganismos. Sin embargo, es difícil determinar las condiciones de operación óptimas para cada tipo de alimento debido a la falta de estandarización de los parámetros de proceso, siendo el más importante la dosis de radiación. Existen diferentes técnicas para la determinación de esta dosis y se emplean de manera indiferente, lo que puede ocasionar confusión al momento de analizar los resultados. Es por ello que resulta interesante conocer los métodos más empleados en la determinación de la dosis y de esta manera analizar adecuadamente cada investigación.

Palabras clave: radiación ultravioleta de onda corta, desinfección de alimentos, dosis.

ABSTRACT

The short-wave ultraviolet radiation (uvc) has been applied widely to surface disinfection of various materials and also for the disinfection of water. Researches of the recent years suggest that this technology has the ability to be applied on solids and liquids foods for their disinfection, because it has a strong sterilizing effect on different microorganism. However, it is difficult to establish the optimum operating conditions for each type of food due to the lack of standardization of process parameters, mainly of the radiation dose. There are different techniques for the determination of this dose and they are used indifferently, which can cause confusion when analyzing the results. That is why it is interesting to know the methods most used in determining the dose and thus properly analyze each investigation.

Keywords: short-wave ultraviolet radiation, food disinfection, dose.

* Programa de Doctorado
en Ciencia de Alimentos
Tel.: +52 222 229 2126
Fax: +52 222 229 2727
Dirección electrónica:
oscar.antoniogz@udlap.mx

Introducción

La radiación ultravioleta de onda corta (UVC) es una radiación de alto nivel energético y de una longitud de onda más corta que las radiaciones UVA y UVB. Comprende la mayor parte del rango de radiación ultravioleta y posee un potente efecto esterilizante, siendo a los 254 nm el mayor efecto reportado. La radiación UVC avanza en dirección rectilínea y disminuye en intensidad al alejarse de la fuente de radiación (SterilAir Inc., 2015).

Esta tecnología ha sido aplicada para la desinfección de diferentes alimentos como frutas, verduras y jugos, debido a su efecto germicida sobre los microorganismos, ya que la radiación UVC, dotada de una gran cantidad de energía, causa un efecto fotoquímico en la timina del ADN, provocando la formación de enlaces entre las timinas y obteniéndose dímeros, los cuales inhiben la replicación correcta del ADN (Koutchma, 2014).

Existen diferentes parámetros que influyen en el procesamiento de alimentos con esta tecnología. Por ejemplo, en el procesamiento de alimentos sólidos, la morfología del alimento influye de manera importante en la capacidad de desinfección. En alimentos líquidos, los sólidos suspendidos pueden afectar la manera en que se distribuye la radiación dentro del equipo UVC.

Se sabe que la dosis es uno de los parámetros más importantes a considerar en el diseño de equipos. Es muy importante determinar el valor o identificar qué factores pueden afectar la determinación de la dosis.

En la actualidad, para determinar la dosis en alimentos sólidos se cuenta con métodos bien estandarizados, pero no se cuenta con un método establecido para determinar la dosis a la que se someten los alimentos líquidos en diferentes configuraciones de equipos UVC. Esto ha contribuido a que las aplicaciones de esta tecnología en alimentos líquidos sean limitadas. Recientemente, se han propuesto diferentes técnicas para la determinación de la dosis, pero aún queda camino por recorrer para obtener un método confiable, rápido y de uso común en la industria o investigación. Es por ello que resulta interesante conocer cuáles son los métodos para determinar dosis más empleados en el procesamiento de alimentos tanto para sólidos como para líquidos, con la finalidad de identificar qué factores pueden afectarla y además, de que en futuras investigaciones puedan analizar cada uno de estos métodos y determinar cuál puede ser utilizado o empleado rutinariamente.

Revisión bibliográfica

1. Radiación ultravioleta de onda corta

1.1. Generalidades

La radiación ultravioleta (UV) tiene una longitud de onda más corta que la luz visible, y produce quemaduras u otros efectos adversos en el ser humano. Para generar la radiación UV se emplean lámparas de mercurio de baja o mediana presión. Se puede clasificar en tres tipos de acuerdo a su longitud de onda: UVA, UVB y UVC las cuales abarcan las longitudes de onda de los 100 a los 400 nm (EPA, 2010).

La radiación ultravioleta de onda corta (UVC) es una radiación que se produce entre longitudes de onda de 200 y 280 nm del espectro electromagnético. Se sabe que a una longitud de onda de 254 nm esta radiación posee un efecto esterilizante e inactiva diversos microorganismos. En la Tabla I se observan diferentes microorganismos que han sido inactivados con esta radiación al ser aplicada en alimentos líquidos a diferentes dosis de radiación. Se observa que la dosis necesaria para lograr determinada reducción logarítmica de una población de microorganismos, depende de diversos factores como el tipo de alimento que se procesa o el tipo de microorganismo. Es por este motivo que el diseño de los equipos es muy complejo (Koutchma, 2014).

La UVC causa daños en el ADN de las células expuestas a la radiación, ya que promueve la formación de enlaces entre timinas en cadenas adyacentes del ADN. Estos dímeros de timina inhiben la replicación correcta del ADN durante la reproducción de la célula. El mecanismo fundamental de la desinfección UVC, como un método físico de control microbiano, es la dimerización fotoquímica de las bases timina, de tal manera que si se forman suficientes dímeros, el ADN no se podrá duplicar (Bolton y Cotton, 2011).

1.2. Estado actual de la radiación UVC

Esta tecnología ha tenido gran aplicación en alimentos, y actualmente la FDA ha autorizado su empleo en jugos de frutas, siempre y cuando el equipo UVC logre una reducción de cinco ciclos logarítmicos de la población microbiana (FDA, 2014). Para alimentos sólidos, existe en el mercado gran cantidad de empresas que ofrecen equipos para la desinfección de la superficie del alimento, esto se debe a los diferentes estudios que se han llevado a cabo al analizar el efecto de la radiación sobre diferentes microorganismos y a diferentes condiciones de operación. Además, se ha encontrado que la radiación UVC puede tener diversos efectos sobre los alimentos sólidos, como

Tabla I. Inactivación de diversos microorganismos a diferentes dosis UVC en alimentos líquidos.

Modo de administración	Microorganismo	Dosis UV, mJ/cm ²	Reducción logarítmica
Sidra de manzana	<i>Escherichia coli</i> O157:H7	9-61	3.8
	<i>Cryptosporidium parvum</i> oocyst	14.32	5
	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	5.135	1.34
Jugo de naranja	Bacterias mesófilas aerobias	120-320 mg	2
	Levaduras, Mohos		3
	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	5.135	2.71
Néctar de mango	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	5.135	2.71
	Bacterias mesófilas aerobias, Levaduras, Mohos		2.94
	Levaduras	21.5	1.2
Jugo de piña	Mohos	21.5	1

Adaptado de Koutchma (2014).

el incremento de algunas vitaminas, lo que motiva seguir investigando a la radiación uvc aplicada a alimentos (McHugh, 2015; Basaran, 2009; Beaulieu, 2007; Fonseca y Rushing, 2006).

Sin embargo, la aplicación industrial de la uvc para alimentos líquidos es limitada. Actualmente, en EE.UU. se tiene solamente un producto en el mercado tratado con esta tecnología, el cual es un jugo de manzana. Esto se debe principalmente a que en el procesamiento de alimentos líquidos con radiación uvc los parámetros que influyen son muchos, ocasionando que el diseño de los equipos uvc sea complicado. Es por ello que la investigación de esta tecnología aplicada a alimentos líquidos continua, sobre todo para determinar las condiciones de operación óptimas para cada tipo de alimento líquido, lo que ayudará a establecer diseños más efectivos (Koutchma, 2014).

2. Parámetros importantes en el procesamiento de alimentos sólidos con radiación UVC

Una gran variedad de alimentos sólidos han sido tratados con radiación UVC entre los cuales destacan frutas, verduras, quesos y carnes (Basaran, 2009; Beaulieu, 2007; Fonseca y Rushing, 2006; Lyon, Fletcher y Berrang, 2007). Sablani *et al.* (2015), llevaron a cabo un estudio sobre la inactivación de *Penicillium expansum* en la superficie de diferentes frutas (manzana, fresa, cereza y frambuesa), concluyendo que existe una reducción significativa de este microorganismo. Lamikanra, Kueneman, Ukuku y Bett-Garber (2005) evaluaron los efectos de la radia-

ción uvc sobre rebanadas frescas de melón, encontrando que el aroma y la textura se mantenían con el tiempo y que además, existía una reducción significativa de diferentes microorganismos. Los estudios anteriores son útiles para indicar que la radiación uvc puede ser empleada tanto en alimentos sin procesar como en alimentos ya procesados listos para el consumo.

De la mayoría de las investigaciones consultadas, se puede concluir que los parámetros más importantes en el procesamiento de alimentos sólidos con radiación uvc son: la morfología del alimento, la distribución de la radiación, la distancia de la fuente de radiación al alimento y la dosis a la que es sometido. Otros factores como la presión, temperatura y composición del alimento, no tienen un efecto importante en la calidad final del alimento y en el diseño de equipos (Koutchma, 2014). Cada parámetro puede tener un efecto significativo en el producto final. La distribución de la radiación sobre el alimento, está relacionada con el diseño del equipo, y generalmente, el diseño es tal que cada punto del alimento recibe la misma radiación a nivel superficial. En cuanto a la distancia de la fuente de radiación al alimento, en equipos que procesan grandes cantidades de alimentación, no es posible mantener al alimento cerca de la lámpara, lo cual sería lo ideal, y los equipos se diseñan en base al diámetro y longitud del túnel donde circulará el alimento, tomando como base la dosis mínima de radiación para eliminar determinado microorganismo (Reyco Systems, 2015). Sin embargo, la distancia a la cual se encuentra el alimento puede variar, por distintos motivos,

desde una sobrealimentación al equipo o por el tamaño del propio alimento, por lo que es muy importante un diseño que considere estos problemas (uv Technology Inc., 2014).

Si la morfología del alimento es irregular, la radiación uvc no penetrará en espacios ocultos o que se encuentren cubiertos por sustancias extrañas, un buen ejemplo pueden ser las lechugas. Aunque todos los parámetros pueden tener un efecto significativo en el producto, la dosis es la que determina si un alimento fue desinfectado adecuadamente. Diferentes alimentos sólidos sometidos a tratamientos con radiación uvc requieren una dosis mínima necesaria para la inactivación de determinado microorganismo. Sin embargo; si esta dosis suministrada es mucho mayor a la recomendada, se pueden presentar diversos problemas como perdidas de vitaminas, cambios de color o textura (Haro-Maza y Guerrero-Beltrán, 2013).

3. Método para la determinación de la dosis UVC en el procesamiento de alimentos sólidos

Para determinar la dosis suministrada a alimentos sólidos, la mayoría de los autores emplean ecuaciones sencillas y los cálculos necesarios son bastante simples. La siguiente ecuación ha sido utilizada para determinar la dosis suministrada a una gran variedad de alimentos como frutas, verduras y carnes (Lyon et al., 2007).

$$D = I * t \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde: **D** es la dosis de radiación uvc por unidad de área y se expresa en J/cm^2 , **I** se refiere a la intensidad de la radiación medida a la misma distancia a la que se localiza el alimento y se expresa en W/cm^2 , mientras que **t** es el tiempo durante el cual el alimento es expuesto, en segundos.

Esta dosis permite diseñar adecuadamente los equipos, ya que al determinar un área aproximada total a procesar del alimento en cuestión y multiplicarse por la dosis, se puede determinar un número de lámparas necesario para suministrar la energía requerida o la velocidad de procesamiento (Reyco Systems, 2015).

Es importante mencionar que la intensidad de la fuente de radiación debe ser medida a la distancia a la cual los alimentos serán colocados, ya que pueden existir pérdidas de radiación por diversos motivos, como la funda de cuarzo o partículas suspendidas en el aire. En este punto, la medición de la intensidad es la que puede llevarse a cabo con distintos instrumentos, por ejemplo: radiómetros o semiconductores. Los radiómetros son dispositivos que detectan la radiación total que incide en un sensor. Pueden estar acoplados a un detector térmico, que

consiste en una superficie negra donde toda la radiación incidente es convertida a calor; lo cual produce una corriente proporcional a la radiación incidente. También pueden emplear un detector fotónico, que consiste en una photocelda con un catodo sensible a la radiación uv que convierte el flujo de fotones incidente en corriente. Estos tipos de detectores son muy sensibles, pero su sensibilidad varía con la longitud de onda, si la radiación incidente es monocromática, la conversión es muy fácil. Sin embargo, si la fuente emite en un amplio rango, es necesario conocer la distribuciónpectral de la fuente y la sensibilidad espectral del detector para convertir las lecturas del radiómetro en radiación (Bolton y Cotton, 2011).

Ciertos semiconductores absorben sólo en la región uv, por ejemplo el diamante (190-230 nm), SiC (210-380 nm) y GaN (250-370 nm) que además son insensibles a la luz visible. Estos semiconductores pueden ser incorporados al circuito electrónico y de esta forma servir como sensores de luz en los reactores uv. No obstante, los circuitos basados en sensores uv tienden a decaer con el tiempo, por lo que es necesario calibrarlos periódicamente (Bolton y Cotton, 2011).

4. Parámetros importantes en el procesamiento de alimentos líquidos con radiación uvc

Diversos estudios se han llevado a cabo para la aplicación de la radiación uvc en alimentos líquidos, principalmente para la inactivación de diferentes microorganismos (Rossito et al., 2012; Gang, Chaolin, y Peng, 2011; Koutchma, Parisi y Patazca, 2007). La irradiación de leche por Rossito et al. (2012), logró la reducción de microorganismos coliformes, mesófilos y psicrótrofos en más de cinco ciclos logarítmicos; sin embargo, los autores detectaron un sabor desagradable en la leche, siendo las dosis altas las que posiblemente afectaron el sabor de la leche, lo cual lo relacionaron con una oxidación lipídica promovida por una exposición prolongada a la radiación uvc. En estudios llevados a cabo sobre jugos de uva, piña, manzana, entre otros; se ha encontrado que diversos factores afectan la inactivación microbiana, como sólidos suspendidos, turbidez y transmisión (Koutchma, 2014; Usaga, Worobo, Moraru y Padilla-Zakour, 2015). Adicionalmente, los sólidos insolubles, la viscosidad, densidad y la dosis, son otros factores que también pueden afectar la inactivación (Koutchma, 2014). Mientras que otros factores como la temperatura, pH y °Bx no tienen un efecto significativo en la efectividad de esta tecnología (López-Díaz, López-Malo y Palou, 2013).

Cada uno de estos parámetros puede afectar los resultados principalmente de la inactivación microbiana. Por ejemplo, los efectos de los sólidos insolubles sobre la inactivación de

E.coli fueron estudiados por Usaga *et al.* (2015). De sus resultados los autores concluyen que si existe un efecto negativo en la inactivación de *E. coli* inoculada en jugo de manzana ya que la inactivación fue menor en comparación con un jugo clarificado, lo cual puede evitarse al incrementar la dosis de radiación. Otro estudio llevado a cabo por Antonio-Gutiérrez, López-Malo, Ramírez-Corona y Palou (2014), encontró que la dosis de radiación uvc afecta negativamente en el color de los jugos, al estudiar la inactivación de *Saccharomyces cerevisiae* en jugo de uva. El estudio anterior muestra que la dosis es el parámetro más importante a considerar al procesar alimentos líquidos con radiación uvc. Las altas dosis se recomiendan para una total inactivación; sin embargo, esto puede afectar en las cualidades sensoriales de los alimentos como el color o sabor, por lo tanto encontrar la dosis adecuada para cada alimento es vital.

5. Métodos para la determinación de la dosis UVC en el procesamiento de alimentos líquidos

Existen diferentes métodos para la determinación de la dosis aplicada a alimentos líquidos, siendo el método de biodosimetría el más empleado (Li, Qiang, Wang, Bolton y Lian, 2013). Los diferentes métodos cuentan con principios bien fundamentados y se abordan los más empleados en alimentos líquidos.

5.1. Actinometría

Un actinómetro es un compuesto químico sensible a la radiación uvc, el cual es expuesto a la longitud de onda de interés y los cambios fotoquímicos resultantes son determinados analíticamente. El proceso de actinometría se puede definir como un sistema químico por el cual el número de fotones absorbidos de un haz de luz en un espacio definido de un reactor químico se determina al transcurrir determinado tiempo. Este sistema químico que puede ser líquido, sólido o gas produce una reacción inducida por la radiación de determinada longitud de onda para la cual el rendimiento cuántico es conocido. La medición de la velocidad de reacción permite el cálculo del flujo de fotones absorbidos. El rendimiento cuántico se define como la relación entre el número de eventos (por ejemplo: moléculas formadas o destruidas) y el número de fotones absorbidos de la longitud de onda en estudio (IUPAC, 2005).

En la determinación, una celda que contiene un producto químico, se inserta en el reactor y se expone a la radiación UV. El cambio químico genera otro producto durante el tiempo de exposición. A partir del nuevo producto y de la cantidad producida se puede determinar el total de fotones incidentes en la muestra. Diferentes requisitos son necesarios para que una

sustancia sea estable y pueda ser útil en el sistema, por ejemplo; la fotorreacción debe ser reproducible bajo condiciones experimentales fácilmente controlables, los componentes químicos deben ser térmicamente estables, el actinómetro debe ser fácil de obtener y de preferencia debe ser comercial y además, los métodos analíticos deben ser simples (IUPAC, 2005).

Se observa que este método depende principalmente del actinómetro o sistema fotoquímico, y los más utilizados son ferrioxalato y yoduro/yodato, los cuales son sustancias que al ser expuestas a la radiación experimentan una fotodescomposición. Sin embargo, la temperatura, las propiedades ópticas del líquido y la absorbancia por diferentes sustancias, pueden ocasionar errores en la determinación de la dosis y son precisamente estos problemas los que hacen que este método no sea tan empleado en alimentos líquidos, a pesar de ser un método exacto y reproducible. Un estudio llevado a cabo por Adhikari, Koutchma y Bowden (2005), para evaluar al 4, 4', 4"-tris-di-Bhidroxietil amino trifenil acetonitrilo como actinómetro en el procesamiento de jugo de manzana con uvc, demostró que la absorbancia y turbidez del jugo afectaron en la determinación de la dosis; sin embargo, los autores concluyen que este actinómetro puede ser usado rutinariamente. El actinómetro no se ha probado con otros jugos, por lo que es necesario llevar a cabo más estudios en otros alimentos líquidos y con otras sustancias que puedan ser empleadas como actinómetros.

5.2. Biodosimetría

Este método es el más empleado para determinar la dosis en la desinfección de agua pura, y al igual que el anterior, presenta ventajas y desventajas. La biodosimetría es un método práctico y utiliza microorganismos no patógenos para la determinación de la dosis en un intervalo amplio de condiciones de operación (Li *et al.*, 2013).

En este método, un líquido es inoculado con un microorganismo y bombeado al equipo uvc. La inactivación del microorganismo se analiza con técnicas de recuento comunes de microbiología y se determina al comparar los microorganismos viables en la muestra a la entrada y salida del equipo uvc. En general, este método se divide en dos partes, en la primera parte se determina una curva para relacionar la dosis y las reducciones logarítmicas del microorganismo objetivo en un sistema estático y sirve para determinar un promedio de la dosis. Una vez determinada esta curva se procede a analizar el sistema en estado continuo, y al determinar el número de microorganismos supervivientes se relaciona la dosis promedio para obtener una dosis equivalente de reducción (Koutchma, 2014).

Este método fue empleado por Koutchma y Parisi (2004),

para calcular la dosis suministrada a jugo de manzana en reactores de tubos concéntricos. Encontraron que las propiedades ópticas de los jugos generan variaciones de la dosis, lo cual afecta la desinfección del jugo. Esta es una posible desventaja de este método ya que todos los alimentos líquidos presentan este problema. Otra posible desventaja es que se requiere hacer los análisis para cada condición de operación como velocidad de flujo o microorganismo en cuestión (EPA, 2010).

5.3. Otros

Los métodos descritos anteriormente para la determinación de la dosis en el procesamiento de alimentos líquidos, brindan resultados muy confiables y reproducibles; sin embargo, para su empleo requieren de mucho tiempo y pueden producir subproductos contaminantes. Es por ello, que algunos autores han propuesto otras formas más prácticas de determinar la dosis. Un ejemplo de método rápido para la determinación de la dosis fue desarrollado por Keyser, Müller, Cilliers, Nel y Gouws (2008). Los autores proponen que la dosis puede ser calculada por unidad de volumen del líquido a procesar para expresar la dosis en J/L. En realidad, el cálculo es muy sencillo y solo se toma en cuenta la velocidad de flujo y la potencia de la lámpara, lo que se observa en la siguiente ecuación:

$$D = P/q \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde: **P**, es la potencia máxima de la lámpara en Watts, y **q**, el gasto volumétrico de la muestra líquida en L/s. Por lo tanto, la dosis (**D**) se expresa en J/L.

De acuerdo a los autores, la dosis calculada por este método ofrece un margen de error pequeño y es posible utilizarse siempre y cuando los tiempos de procesamiento sean cortos, es decir, de algunos minutos.

Otro método, el cual es relativamente sencillo, ha sido empleado por Orlowska, Koutchma, Kostrzynska, Tang y Defelic (2014), el cual considera que la penetración de la radiación es limitada, ya que disminuye conforme el grosor de la película de líquido a tratar aumenta. Para utilizar las siguientes ecuaciones es necesario considerar que el líquido dentro del equipo está completamente mezclado y que sus propiedades son constantes a lo largo del sistema, por lo que el coeficiente de absorción o la turbidez no cambian. Las siguientes ecuaciones describen los cálculos necesarios para encontrar la dosis tomando en cuenta las consideraciones anteriores:

$$I = \left(\frac{I_0}{(\alpha^*d)} \right) (1 - \exp(-\alpha^*d)) \quad (\text{Ec. 3})$$

$$E = I * t \quad (\text{Ec. 4})$$

$$t = v/q \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde: **I**, es la intensidad de la radiación medida en la superficie de la funda de cuarzo; α , es el coeficiente de absorción del líquido; **d**, es el grosor de la película de líquido a irradiar; **I**, la intensidad real de procesamiento; **E**, la dosis tomada en cuenta la intensidad real (**I**) y el tiempo de residencia (**t**). El tiempo de residencia se calcula al dividir el volumen del equipo (**v**) sobre la velocidad de flujo (**q**). Esta manera de determinar la dosis conlleva menores errores en los cálculos debido a que se asemeja a la situación real del equipo en cuanto a las pérdidas por radiación. Sin embargo, las pérdidas solo se determinan al incluir el coeficiente de absorción del líquido y no incluye las perdidas por otros parámetros como partículas suspendidas.

Conclusión

La radiación ultravioleta de onda corta ya es una tecnología que se emplea a nivel industrial, sobre todo para el procesamiento de alimentos sólidos. En el caso de alimentos líquidos, si bien su aplicación es limitada, ya se conocen los distintos parámetros de procesamiento que deben ser evaluados para diseñar equipos uvc efectivos. La dosis es el factor más importante a considerar en el diseño, y sobre todo es necesario conocer los métodos más empleados para su determinación. Los resultados obtenidos hasta ahora hacen que la radiación uvc sea una tecnología muy prometedora para la industria alimentaria.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP) por el apoyo y financiamiento.

Referencias

Adhikari, C., Koutchma, T. y Bowden, T. (2005). Evaluation of HHEVC (4, 4', 4"-tris-di-B-hydroxyethyl aminotripheny-

- lacetonitrile) dye as a chemical actinometer in model buffers for UV treatment of apple juice and cider. *Food Science and Technology*, 38(7), 717-725.
- Antonio-Gutiérrez, O., López-Malo, A., Ramírez-Corona, N. y Palou, E. (2014). Reactor design and its effect on the inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* in grape juice. Cartel. *IFT Annual Meeting*. New Orleans, EE.UU.
- Basaran, P. (2009). Reduction of *Aspergillus parasiticus* on hazelnut surface by UV-C treatment. *International Journal of Food Science and Technology*, 44(9), 1857-1863.
- Beaulieu, C. (2007). Effect of UV irradiation on cut cantaloupe: terpenoids and esters. *Journal of Food Science*, 72(4), 272-281.
- Bolton, J. y Cotton, C. (2011). *The ultraviolet disinfection handbook*. Colorado: American Water Works Association.
- EPA (Environmental Protection Agency). (6 de mayo del 2010). Radiación Ultravioleta. Obtenido de <http://www.epa.gov/sunwise/es/radiacionuv.html>.
- FDA (Food and Drug Administration). (16 de diciembre del 2014). The Juice HACCP Regulation. Obtenido de <http://www.fda.gov/Food/GuidanceRegulation/Juice/ucm072981.htm>
- Fonseca, M. y Rushing, J. (2006). Effect of ultraviolet-C light on quality and microbial population of fresh-cut watermelon. *Postharvest Biology and Technology*, 40(3), 256-261.
- Gang, L., Chaolin, L. y Peng L. (2011). UV inactivation of milk related microorganisms with a novel electrodeless lamp apparatus. *Journal European Food Research and Technology*, 233, 79-87.
- Haro-Maza, J. y Guerrero-Beltrán, J. (2013). Efecto de la radiación UV-C en frutas y verduras. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, 7(1), 68-77.
- IUPAC. (2005). Chemical actinometry. Technical Report. International union of pure and applied chemistry organic and biomolecular chemistry división. *Pure Applied Chemistry*, 76(12), 2105-2146.
- Keyser, M., Müller, A., Cilliers, F., Nel, W. y Gouws, A. (2008). Ultraviolet radiation as a non-thermal treatment for the inactivation of microorganisms in fruit juice. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 9(3), 348-354.
- Koutchma, T. (2014). *Preservation and Shelf Life Extension - UV Applications for Fluid Foods*. Londres: Academic Press.
- Koutchma, T., Parisi, B. y Patazca, E. (2007). Validation of UV coiled tube reactor for fresh juices. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 6(3), 319-328.
- Koutchma, T. y Parisi, B. (2004). Biodosimetry of *E. coli* UV inactivation in model juices with regard to dose and RTD distribution in annular UV reactor. *Journal of Food Science*, 69(1), 14-22.
- Lamikanra, O., Kueneman, D., Ukuku, D. y Bett-Garber, K. (2005). Effect of processing under ultraviolet light on the shelf life of fresh-cut cantaloupe melón. *Journal of Food Science*, 70(9), 535-539.
- Li, M., Qiang, Z., Wang, C., Bolton, J. y Lian, J. (2013). Development of monitored tunable biodosimetry for fluence validation in an ultraviolet disinfection reactor. *Separation and Purification Technology*, 117, 12-17.
- López-Díaz, A., López-Malo, A. y Palou, E. (2013). Modeling inactivation kinetics of *Saccharomyces cerevisiae* subjected to various treatments with shortwave ultraviolet irradiation (UVC). Cartel. *IFT Annual Meeting*. Chicago, EE.UU.
- Lyon, S., Fletcher, D. y Berrang, M. (2007). Germicidal ultraviolet light to lower numbers of *Listeria monocytogenes* on broiler breast fillets. *Poultry Science*, 86, 964-967.
- McHugh, T. (2015). UV processing of mushrooms enhances vitamin D content. *Food Technology*, 69(3), 74-76.
- Orlowska, M., Koutchma, T., Kostrzynska, M., Tang, J. y Defelic, C. (2014). Evaluation of mixing flow conditions to inactivate *Escherichia coli* in opaque liquids using pilot-scale Taylor-Couette UV unit. *Journal of Food Engineering*, 120, 100-109.
- Reyco Systems. (07 de abril del 2015). UVC light applied within the Tumbling Drum. Obtenido de <http://www.reycosystems.com/solutions/uv-drum/>
- Rossitto, P., Cullor, S., Crook, J., Parko, J., Sechi, P. y Cenci-Goga, S. (2012). Effects of UV irradiation in a continuous turbulent flow UV reactor on microbiological and sensory characteristics of cow's milk. *Journal of Food Protection*, 75(12), 2197-2207.
- Sablani, S., Syamaladevi, R., Adhikari, A., Lupien, S., Dugan, F., Bhunia, K. y Khingra, A. (2015). Ultraviolet-C light inactivation of *Penicillium expansum* on fruit surfaces. *Food Control*, 50, 297-303.
- SterilAir Inc. (24 de febrero del 2015). Teoría Básica de la Radiación UVC. Obtenido de <http://www.sterilair.com/es/competencia/competencia/basicos-uv.html>
- Usaga, J., Worobo, R., Moraru, C. y Padilla-Zakour, O. (2015). Time after apple pressing and insoluble solids influence the efficiency of the UV treatment of cloudy apple juice. *Food Science and Technology*, 62(1), 218-224.
- UV Technology Inc. (24 de febrero del 2014). Surface disinfection. Obtenido de <http://www.uvtechnology.co/air.html>.