

## Avances en la aplicación de luz ultravioleta de onda corta (UVC) en frutas y vegetales enteros y mínimamente procesados: revisión

### Advancements in the application of short-wave ultraviolet light (UVC) in whole and fresh-cut fruit and vegetables: a review

Juan Pablo Quintero-Cerón<sup>I\*</sup>; Yanneth Bohorquez-Pérez<sup>II</sup>; Claudia Valenzuela-Real<sup>II</sup>;  
José Fernando Solanilla-Duque<sup>II</sup>.

**Resumen.** En vista del impacto que conlleva la carga microbiana contaminante sobre la superficie de los productos hortofrutícolas, los investigadores y la industria han centrado su interés en el estudio y aplicaciones de la radiación ultravioleta de onda corta por su efecto deletéreo sobre fitopatógenos, relativo bajo costo, versatilidad y nula residualidad. Recientes hallazgos han dado a conocer que esta radiación no ionizante actúa como un elicitor que a bajas dosis estimula la expresión de genes involucrados con respuestas fotomorfológicas encargadas de promover la resiliencia del tejido. Teniendo en cuenta lo manifestado, el presente artículo recoge variados y recientes estudios donde se analizan las respuestas de diversos productos hortofrutícolas frescos y mínimamente procesados a tratamientos fotoquímicos (UVC), sus limitaciones, beneficios y efectos adversos.

**Palabras clave:** radiación ultravioleta, pos-cosecha, fotoquímica, actividad antioxidante, agroindustria.

**Abstract.** In light of the impact that involves the microbial contamination on the surface of fruits and vegetables, researchers and industry have focused their interest in the study and applications of short wave ultraviolet radiation by their deleterious effect against the pathogens, relatively low cost, versatility and zero residual. Recent findings have revealed that non-ionizing radiation, acts as an elicitor that at low doses stimulates the expression of genes involved in photomorphogenic responses which are in charge of triggering the tissue resilience. Considering aforesaid, this paper summarizes varied and recent studies that analyzed the responses of different fresh and minimally processed products subjected to photochemical treatments (UVC), constrains, benefits and adverse effects.

**Keywords:** ultraviolet radiation, postharvest, photochemistry, antioxidant activity, agroindustry.

<sup>I</sup> Asistente de docencia e investigación. Grupo Cedagritol. Universidad del Tolima. CEP.73000-6299 Ibagué, Tolima, Colombia.

<sup>II</sup> Docentes de tiempo completo, Facultad de Ingeniería Agronómica. Grupo Cedagritol, Universidad del Tolima. CEP.73000-6299. Ibagué. Tolima. Colombia.

\* jupaquince@hotmail.com

## 1. Introducción

El incremento actual en la comercialización de frutas y vegetales frescos (F) como mínimamente procesados (MP) se fundamenta en la conveniencia de uso, por ser saludables y estar listos para el consumo. Sin embargo, este comportamiento en los hábitos de consumo ha estado acompañado de un aumento en la aparición de brotes causados por su contaminación con enteropatógenos (Raybaudi-Massilia et al., 2009).

Es común que tanto frutas como hortalizas se cosechen en sistemas de producción a campo abierto y, por tanto, posean el riesgo potencial de contaminarse con microorganismos que habitan y se transportan a través del suelo, aire, agua de riego, animales de diversas especies y otras fuentes. Estos, a su vez, son persistentes durante la poscosecha e inciden sobre la calidad microbiológica de los alimentos (Tournas & Kadsoudas, 2005), en especial, sobre los frutos y vegetales MP (Rojas-Graü et al., 2009).

Como respuesta a este panorama, se están implementado tecnologías de conservación no térmicas o combinadas (Allende, Tomás-Barberán, & Gil, 2006a), cuyo objetivo es minimizar pérdidas nutricionales, cambios morfológicos, añadir valor, asegurar inocuidad, minimizar la destrucción de compuestos termolábiles y producir cambios leves en los perfiles sensoriales (Herrera & Romero, 2006). Algunos de estos sistemas de conservación físicos hacen alusión a las altas presiones hidrostáticas, pulsos eléctricos de alta intensidad, campos magnéticos oscilantes e irradiaciones con fuentes ionizantes o no ionizantes, como la luz ultravioleta (UV) (Begum, Hocking, & Miskelly, 2009).

En este sentido, diversas revisiones del estado del arte discuten el uso de UVC en el tratamiento de frutos bajo condiciones industriales (Shama, 2007), sus limitaciones en el procesamiento de alimentos líquidos y sólidos (Guerrero-Beltrán & Barbosa-Cánovas, 2004), efectos bioquímicos sobre tejidos vegetales (Rivera et al., 2007), incremento de la actividad antioxidante de frutos (González-Aguilar et al., 2010) y artículos de investigación aplicada concluyen que dosis de esta radiación de onda corta (200-280 nm), específicamente a la longitud de 254 nm (UVC<sub>254</sub>), ejerce diversas repuestas en los tejidos vegetales, así como un efecto letal sobre la flora contaminante, razón por la cual se ha utilizado en la desinfección de agua para consumo humano, superficies, materiales de empaque (Bintsis et al., 2000), productos cárnicos frescos (Chun et al., 2010a) y procesados (Chun et al., 2009), frutas y vegetales en fresco y mínimamente procesados (IV Gama) (Escalona et al., 2010). Otras aplicaciones incluyen la desactivación de enzimas como polifenoloxidasas (PFO), pectinmetilesterasa y pectinasas que tienen repercusión sobre la calidad en pulpas, jugos, zumos de frutas (Falguera, Pagán & Ibarz, 2011a; Manzocco, Quarta & Dri, 2009; Pala & Toklucu, 2011), y recientemente se evalúa su uso en el control preventivo de plagas en semillas y alimentos almacenados (Begum et al., 2007; Collins & Kitchingman, 2010; Faruki et al., 2007).

Situaciones que ponen de manifiesto su versatilidad y diversidad de aplicaciones en alimentos frescos, en especial, para reducir la carga de bacterias patógenas, mohos,

levaduras, virus y mantener atributos de calidad prescindiendo del uso de tratamientos térmicos severos y adición de compuestos sintéticos (Guerrero-Beltrán & Barbosa-Cánovas, 2004). Teniendo en cuenta los aspectos descritos, el presente artículo pretende efectuar una revisión actualizada del estado del arte, enfocada en describir y discutir los impactos de la radiación UVC sobre la calidad microbiológica, nutricional, organoléptica de vegetales frescos, mínimamente procesados, y las consecuencias de su empleo combinado con otras tecnologías de conservación.

## 2. Generalidades de la luz ultravioleta

Aunque la radiación ultravioleta (UV) es potencialmente dañina, es un componente abiótico con el cual coexistimos, y ha posibilitado, a través del conocimiento de su beneficioso accionar sobre los tejidos vegetales, extender sus aplicaciones a diversas matrices alimentarias. Para las personas resulta preocupante el término *radiación*, al ser inmediatamente relacionado con efectos destructivos y carcinogénicos. Pero la tecnología de alimentos ha adoptado sus ventajas, en especial, el ser un tratamiento de conservación físico no térmico (pasteurización en frío), pues, generalmente, tiene lugar a temperaturas cercanas a la ambiente, no deja residuos en el producto alimentario, y a diferencia de la radiación X o gama, la luz UV es no ionizante, esto quiere decir que no expulsa electrones. Sin embargo, su efectividad se ve limitada por el tipo de radiación aplicada (UVA, UVB, UVC), por las dosis y el grado de penetración de ella en el producto (Alothman, Bath, & Karim, 2009a).

La región UV se ubica entre la luz visible y los rayos X en el espectro electromagnético, más exactamente en longitudes de onda que van desde 100-400 nm, rango que es subdividido en UVA (315-400 nm) normalmente responsable del bronceado, UVB (280-315 nm) fuente potencial de cáncer por quemaduras de la piel, UVC (200-280 nm) conocido como el rango germicida y de constante interés en la agroindustria y UVV (100-220 nm) por ser fuertemente absorbidas por el aire y transportarse en el vacío (Koutchma, Forney & Moraru, 2009).

En la región UVC, las propiedades germicidas atribuidas a lesiones en el DNA se incrementan en el rango de 250-274 nm, siendo valores cercanos a 260 nm la longitud de onda de máxima absorción del DNA; sin embargo, a longitudes superiores el proceso de fotoinactivación reduce su eficiencia. Las mutaciones y citotoxicidad provocadas por la fotolesión son resultado de la formación de los fotoproductos pirimidina (6-4), pirimidona y dímeros de pirimidina ciclobutano (CPD); estos constituyen entre el 20-30 % y 70-80 % del daño inducido, respectivamente, obstaculizan la transcripción, replicación de la información genética, comprometiendo así las funciones celulares llevándola a la muerte (Clingen et al., 1995).

A pesar del efecto nocivo, existen diferentes estrategias en los microorganismos, plantas y demás seres vivos para remover dichos fotoproductos (Yajima et al., 1995). Uno de ellos es la fotoreactivación enzimática, mecanismo usado para convertir los CPD en sus

formas monoméricas por acción de una fotoliasa, que como su nombre lo indica lleva a cabo la ruptura de los dímeros en presencia de luz visible o longitudes de onda superiores a los 330 nm procedentes de lámparas fluorescentes o luz solar (Kashimada et al., 1996). El otro es la reparación en condiciones de oscuridad, proceso llevado a cabo a una menor velocidad que la fotoreparación mediada por enzimas (Salcedo et al., 2007; Yamamoto et al., 2008).

Estos hallazgos han hecho que las investigaciones se interesen por determinar la susceptibilidad de microorganismos patógenos, fuente lumínica, selección de dosis y procedimientos posirradiación adecuados para evitar la fotoreversibilidad, de esta manera propendiendo a la liberación de productos seguros, que no representen un riesgo potencial. Atendiendo a estos requerimientos, se ha puntualizado que tan pronto termina la dosificación con UVC, los empaques que contienen el producto se deben almacenar en áreas refrigeradas sin incidencia de luz directa (330-480 nm) (Costa, Vicente, Civello, Chaves y Martínez, 2006). Esto se sustenta con los resultados de Locas, Demers y Payment (2008), quienes develaron que la tasa de reparación por fotoliasas en *E. Coli* es dependiente de la fuente de UV y es mayor después del uso de lámparas UV de mercurio de baja presión, mientras que en fuentes lumínicas de media presión de mercurio sucede lo contrario. La temperatura también desempeñó un papel vital, pues, los test llevados a cabo a 4 °c mostraron afectarla, en tanto que a 25 °c se estimuló dicho proceso.

### 3. Hormesis: inducción de resistencia en tejidos vegetales

Es claro que el uso de UVC en hortalizas F y MP tiene tres propósitos: a) reducir el conteo inicial de células viables tanto de bacterias, mohos y levaduras que se encuentran dispuestos sobre la superficie del alimento, b) influenciar la síntesis de fenilpropanoides y expresión de proteínas como mecanismos de defensa (Charles et al., 2009; Dixon & Paiva, 1995; González-Aguilar, 2010) y c) conservar la calidad organoléptica al ralentizar la actividad enzimática ligada con el ablandamiento de tejidos, daño por frío y el pardeamiento enzimático (Chisari et al., 2011, Falguera et al., 2012).

Los ítems a y b hacen parte de un conjunto de beneficios denominados *hormesis*, término que es definido por Stevens et al. (1996) como la aplicación de un agente potencialmente dañino en bajas dosis a organismos vivos para inducir respuestas como consecuencia de dicho estrés. Estos agentes también denominados *elicitores* pueden ser de naturaleza física o química e inducen cambios fisiológicos en el organismo. A pesar de que las plantas no poseen células ni tejidos especializados en la defensa, tienen el potencial de responder mediante la construcción de una respuesta defensiva.

Este mecanismo estrés-respuesta atribuido a la radiación UV fue recientemente corroborado por Tsormpatsidis et al. (2008) en lechugas lollo rosso (*Lactuca sativa*) bajo condiciones controladas de cultivo, en tomate de invernadero (Obande, Tucker, & Shama, 2009), en hojas de *Capsicum annuum* L. (Mahdavian et al., 2008) y plantas medicinales como *Artemisa annua* L. (Rai et al., 2011). Los investigadores encontraron que la

longitud de onda generada ( $UV_{280}$ ,  $UV_{320}$ ) y dosis no solo influyeron sobre la cantidad de hojas formadas, sino también en la acumulación de materia seca, clorofila, carotenoides y elicitación de producción de metabolitos secundarios (prolina, quercetina, rutina, antocianinas,) tarea que es mediada por la enzima fenilalanina amonio-liasa (PAL) y la sobreexpresión de genes (El Ghaouth et al., 2003; Harbaum-Pyaida et al., 2010; Shama, 2007). El incremento en la disponibilidad de compuestos fenólicos y flavonoides en frutos irradiados ejerce actividad fungistática (Cushnie & Lamb, 2005); en consecuencia, el tejido adquiere resistencia al ataque de enzimas de degradación, además la radiación UVC ha demostrado ser efectiva en retrasar cambios en los índices de color y pérdida de firmeza (Shama & Alderson, 2005; Rivera et al., 2007).

Pombo et al. (2009) encontraron que dosis de luz UVC ( $4.1 \text{ KJ/m}^2$ ) tienen el potencial de detener el ablandamiento de los tejidos en frutos de fresa, aspecto que fue explicado por la conexión entre los niveles de RNA mensajero y la firmeza de fresas (*Fragaria x ananassa Duch. Cv Aroma*) almacenadas ( $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , 96 horas). El estudio de Pombo et al. (2009) contribuyó en explicar el retraso en la senescencia hallada por Stevens et al. (2004) en tomate de mesa y la baja actividad de la enzima poligalacturonasa (PG), puesto que los frutos tratados también poseían mayor firmeza que los no irradiados. Por lo tanto, coincidieron al concluir que tal efecto hórmino puede tener repercusiones sobre PG, endonucleasas y pectinmetilesterasas (PME), enzimas que están involucradas con la degradación de la pared celular (Charles et al., 2009).

Estas proteínas también han sido afectadas en productos mínimamente procesados, como el melón troceado en cubos, debido a que se conservó su firmeza tras el tratamiento fotoquímico y se corroboró disminución de la actividad de las enzimas PG, PME, y se documentó una reducción de 18.5 % en la actividad de la polifenoloxidasas (PFO) (Chisari et al., 2011). En carambola troceada (0.5 cm de espesor) (Andrade-Cuvi et al., 2010) y hojas de lechuga (Allende & Artés, 2003) también se ha observado caída en la actividad de la PFO, hecho que fue contrario en fresas, ya que Pombo et al. (2011) encontraron que a las 10, 24 y 48 horas después de irradiado el producto ( $4.1 \text{ kJ/m}^2$ ) e inoculado con *B. Cinerea*, la actividad se incrementó marcadamente, al igual que la actividad peroxidasa (POD). Enzimas que han sido previamente relacionadas con la formación de barreras estructurales a través de la síntesis del polímero lignina (Passardi et al., 2004; Kim et al., 2007) en el caso de la POD, y quinonas por parte de la PFO, estas se han derivado como primera respuesta al ataque fúngico y ruptura de los tejidos vegetales, siendo su acumulación de importancia en la actividad antimicrobiana (Yoruk & Marshall, 2003).

De igual manera, en frutos de melocotón (*Prunus persica* L. Batsch var. Elberta) la actividad de PAL manifestó un incremento como producto de la irradiación de dichos frutos ( $0-40.0 \text{ KJ/m}^2$ ) y simultáneamente una caída en la síntesis de etileno frente al tratamiento control (Stevens et al., 1998a). A lo descrito se adiciona un efecto protector ante la mancha parda (*Monilinia fructicola*), evidenciado después de la aplicación de una dosis de  $7.5 \text{ kJ/m}^2$  (Stevens et al., 1996). No obstante, dosis superiores, así como exposición de los frutos tratados a luz visible, disminuyeron la resistencia inducida

(fotoreversibilidad). Por consiguiente, fueron susceptibles al daño por *M. Fructicola* (Stevens et al., 1998a).

En el mismo año, Stevens et al. (1998b) encontraron en tomates de mesa preinoculados con *Rhizopus stolonifer* e irradiados un retardo en la producción de carotenoides, etileno, pérdida de clorofila y paralelamente un incremento en el contenido de tomatina, putrescina y espermina. Por su parte, Jagadeesh et al. (2009) tras dosificar 3.7 kJ/m<sup>2</sup> reportaron incremento de compuestos fenólicos y vitamina C. Aspectos que podrían explicar la resiliencia de los frutos a *R. Stolonifer*, ya que el diámetro de las lesiones y porcentaje de infestación en frutos no tratados y tratados (3.6 kJ/m<sup>2</sup>) por Stevens et al. (2004) alcanzaron valores de 13.4 mm, 100 % y 5.3 mm, 47 %, respectivamente.

Esta capacidad adquirida por ciertos frutos tratados fotoquímicamente para hacer frente a la senescencia y patógenos, a pesar de haberse producido su abscisión, ha centrado la atención de los investigadores en los incrementos y variabilidad de los perfiles de proteínas relacionadas con la regulación de genes encargados de transducción de señales, repuestas de defensa y metabolismo (Charles et al., 2009). En cambio, genes concatenados con la estabilidad de la pared celular, metabolismo de lípidos y fotosíntesis han experimentado disminución (Liu et al., 2011).

Estas iniciativas de investigación encontraron síntesis de quitinasas y β-1.3-glucanasas en frutos de melocotón, tomates (3.7 kJ/m<sup>2</sup>) y fresa (Pombo et al., 2011), después de un incremento gradual de la expresión de las secuencias génicas ligadas con la activación de mecanismos bioquímicos de defensa (El Ghaouth et al., 2003), tales como la actividad glucanohidrolasa, formación de glucanasas y quitinasas, las cuales poseen un efecto antagonista sobre el crecimiento del micelio y potencial reproductivo de los hongos *Fusarium subglutinans*, *Fusarium oxysporum* (Michel-Aceves et al., 2005) y *Botrytis cinerea* (Charles et al., 2009).

### **3.1 Incremento de la actividad antioxidante mediante síntesis de metabolitos secundarios**

Las tecnologías de conservación convencionales y emergentes, como tratamientos térmicos, uso de compuestos naturales, atmósferas controladas, modificadas (recubrimientos comestibles) y radiación UVC (Oms-Oliu et al., 2008; González-Aguilar et al., 2010), también activaron sistemas antioxidantes enzimáticos y no enzimáticos como respuesta a las condiciones de estrés generadas. Por su parte, factores bióticos y abióticos del ambiente natural, como temperaturas, radiación solar, patógenos, entre otros, son algunos de los elementos que se sugieren; podrían estar vinculados con la producción de especies reactivas del oxígeno (ROS), tales como oxígeno singlete (<sup>1</sup>O<sub>2</sub>), anión superóxido (O<sub>2</sub><sup>•-</sup>), peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) y radical hidroxilo (•OH).

Con la tarea de prevenir la posible oxidación de ácidos nucleicos, proteínas, lípidos, carbohidratos, así como daños en la membrana de la célula vegetal ocasionados por ROS, esta ha desarrollado mecanismos que involucran la síntesis de metabolitos secundarios

(Pietta, 2000; Silva et al., 2002) y expresión de enzimas antioxidantes.

Al respecto, Alothman, Bhat, & Karim (2009b) al someter frutos troceados de piña (*Ananas comosus* Merr.), banano var. Pisang Mas (*Musa paradisiaca*) y guayaba del cultivar Thai sin semillas (*Psidium guajava* L.) A diferentes dosis de irradiación UVC causaron incremento en fenoles totales y flavonoides en guayaba y banano, contenido que fue proporcional al tiempo de exposición, no obstante la vitamina C decreció en todas las frutas. Aunque en piña no se observó un aumento significativo del contenido fenólico, los flavonoides se manifestaron después de 10 min de tratamiento. Como consecuencia, se causó incremento en la actividad antioxidante (FRAP: poder antioxidante de reducción férrica, estabilización del radical DPPH) en todas las frutas, en especial, en banano donde fue proporcional al nivel de estrés causado.

Una tendencia similar en la actividad antioxidante (FRAP) de la matriz alimentaria se cuantificó en arándanos (*Vaccinium corymbosum*, cvs. Collins, Bluecrop) (0-4 kJ/m<sup>2</sup>), siendo mayor la respuesta en el cultivar Bluecorp (Perkins-Veazie et al., 2008). Por su parte, Wang et al. (2009) encontraron que frutos de *V. Corymbosum* del cultivar Duke experimentaron la acumulación de 14 diferentes fitocompuestos, entre ellos resveratrol tras dosis de 2.1 y 4.3 kJ/m<sup>2</sup>. En este estudio, la actividad antioxidante evaluada por diversos métodos (DPPH, ORAC, CERH) mostró un pico tan pronto se hizo el tratamiento y sus efectos disminuyeron con el tiempo. En tomate (*Solanum lycopersicum* cv. Zhenfen 202) se detectó el mismo comportamiento bajo dosis de 4.0 y 8.0 kJ/m<sup>2</sup>, hecho que se correlacionó con el aumento de compuestos fenólicos específicos, como ácido gálico, ácido clorogénico, ácido siríngico, ácido *p*-cumarico y quercetina (Liu et al., 2012).

La industria vinícola ha hecho uso de la radiación UVC para obtener vinos enriquecidos con resveratrol, polifenol al que se le ha atribuido actividad antioxidante, anticancerígena, neuroprotectora, cardioprotectora, entre otras (Niles et al., 2003; Shin et al., 2010; Gülçin, 2010). Cantos et al. (2007) sometieron frutos cosechados de *Vitis vinifera* de cinco variedades, cuatro tintas (jaén tinto, palomino negro, rome tinto y melonera) y una blanca (palomino fino) a irradiación y posterior almacenamiento a 22 °C hasta el día máximo de inducción (3-5 días), encontrándose que cada variedad responde de forma diferente a dicho estrés; por consiguiente, el tiempo en el cual se generó el mayor contenido de resveratrol varió. Este tratamiento estimuló la síntesis de fitoalexinas en todas las variedades destacándose la melonera en la cual el contenido (4.4 mg/kg de resveratrol) representó 200 veces la cantidad que se cuantificó en las uvas control.

### 3.2 Activación del sistema enzimático antisenescencia

Es importante aclarar que las enzimas superóxido dismutasa, catalasa y peroxidasa también han mostrado incrementos cuando se superan las concentraciones de especies reactivas de oxígeno (ROS) presentes en el metabolismo celular o se afecta la homeostasis (Apel & Hirt, 2004).

Las bajas temperaturas de almacenamiento son uno de los factores que inciden en la formación de ROS, y estos parecen estar inmersos en el posterior daño por frío, puesto que se han encontrado altos niveles de formas radicálicas tan pronto se produce daño del tejido (Purvis et al., 1995; Fuller et al., 1998). Proceso oxidativo que ha evidenciado una disminución en tejidos irradiados de pimentones y bananos.

Frente al tema, algunos investigadores encontraron sobreactivación del sistema antioxidante endógeno constituido por superóxido dismutasa (SOD) y CAT. Andrade-Cuvi et al. (2010) cuantificaron en carambolo troceado irradiado un aumento en la actividad de SOD los días 0 y 14 del almacenamiento. Por otro lado, CAT encargada de eliminar el peróxido de hidrógeno se mantuvo constante, lo cual fue beneficioso para disminuir la velocidad de muerte celular de los trozos. Entre tanto, Li et al. (2010) reportaron altas proporciones de las enzimas listadas y de glutatión reductasa en peras (*Pyrus bretschneideri* Rehd.). Posteriormente, Andrade et al. (2011) señalaron que la activación de la cascada antioxidativa favoreció la disminución del daño por frío en pimentones (*Capsicum annum* L. Cv Cornago).

Uno de los trabajos más completos, teniendo en cuenta el número de variables evaluadas, es el llevado a cabo por Prongprasert et al. (2011) quienes hicieron seguimiento al daño por frío y su severidad en bananos irradiados y almacenados bajo diferentes temperaturas (5 °c, 25 °c). Los interesantes hallazgos yacen en la conexión entre el incremento de PAL, la consecuente síntesis de compuestos fenólicos y altas actividades de SOD, CAT, peroxidasa, ascorbato peroxidasa y glutatión reductasa en los tratamientos con UVC. Comportamiento contrario al de los frutos control, donde se cuantificó una acumulación de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>; el estrés oxidativo desencadenó el daño por frío desde el segundo día del almacenamiento y se extendió hasta el final. Por el contrario, en los frutos irradiados, este se hizo evidente en el cuarto día y el efecto protector ante el daño oxidativo se verificó por los bajos niveles de malondialdehído, reducida degradación del ADN y expresión de genes. Los autores del estudio concluyeron que se mostraron evidencias del efecto dañino por la acumulación de ROS y la capacidad de la radiación UVC para influenciar el sistema antioxidativo, que, al final, fue el encargado de minimizar el impacto de las bajas temperaturas.

#### **4. Algunos efectos adversos de la irradiación con luz uvc<sub>254</sub>**

Como lo indican Guerrero et al. (2010), la irradiación UVC<sub>254</sub> ( $\lambda = 254$  nm) de uvas afectó positivamente la síntesis de estilbenos incrementando la disponibilidad de estas sustancias en el vino blanco; sin embargo, la calidad organoléptica, especialmente el color y sabor fue comprometida, ya que la astringencia aumentó como resultado de la presencia de otros compuestos fenólicos diferentes al resveratrol. Situación similar a la encontrada por Cantos et al. (2007), ya que los parámetros enológicos del vino producido con las variedades palomino negro y palomino fino evidenciaron una desviación de la fermentación alcohólica al detectarse ácido acético y fermentaciones secundarias que afectaron la calidad sensorial.



Cantos et al. (2007) también encontraron que estas bayas irradiadas liberaron aminas biogénicas (histamina), así como signos de pardeamiento en la epidermis de los frutos de la variedad palomino fino. Este tipo de daño fue reportado por Stevens et al. (1998a) sobre la cutícula del melocotón tras dosis de 20.0 kJ/m<sup>2</sup> y 40.0 kJ/m<sup>2</sup>. También ha sido ampliamente documentado en uvas de mesa (González-Barrio et al., 2005), tomate del cultivar Capello sometido a altas dosis (24.4 kJ/m<sup>2</sup>) (Maharaj, Arul y Nadeau, 2010), papaya Golden (Cia et al., 2007) y lechuga roja (7.1 kJ/m<sup>2</sup>) (Allende et al., 2006b). Frente a lo cual los investigadores concluyeron que dicho resultado no estaba asociado con la actividad de enzimas oxidativas (PFO, POD), sino con daño sobre el tejido tras observarse engrosamiento de las paredes celulares, pérdida de la clorofila b y presumiblemente liberación de feofitinas.

En trozos de manzana, se reportó aumento del pardeamiento tras dosis superiores a 1.2 kJ/m<sup>2</sup> (Manzocco et al., 2011a) y 14.1 ± 0.9 kJ/m<sup>2</sup> (Gómez et al., 2010). En ambos casos, las observaciones de tejidos en microscopio óptico indicaron pérdida de la compartimentalización celular, lo cual explicó el incremento en la deshidratación y se constituyó como una posible causa del pardeamiento, pues, los investigadores exponen que la ruptura del tejido permitió un mayor contacto entre el sistema enzima-sustrato encargado del pardeamiento.

Otros resultados adversos incluyen el aumento en la tasa de respiración en espinaca (Escalona et al., 2010) y calabacín (Erkan et al., 2001), ablandamiento del tejido en lechuga (*Lactuca sativa* var. Crispa) tras una dosis de 7.1 kJ/m<sup>2</sup> (Allende et al. 2006b) y la proliferación de bacterias ácido lácticas presumiblemente por eliminación de flora competitiva (Allende & Artés, 2003). En uvas de mesa aumentó la severidad de daño causado por *Botrytis cinerea* en tratamientos superiores a 4.0 kJ/m<sup>2</sup>, así como la presencia e incremento de flora acompañante en uvas irradiadas (0.3 y 0.5 kJ/m<sup>2</sup>) (Nigro, Ippolito, & Lima, 1998) y arilos de granada tratados con 0.6-13.6 kJ/m<sup>2</sup> (López-Rubira et al., 2005).

La radiación UVC puede ser deletérea para compuestos como el licopeno del tomate. De acuerdo con Jagadeesh et al. (2009), este carotenoide presente en altas concentraciones en tomate de mesa (*Lycopersicon esculentum* Mill.), y de interés por su actividad antirradical y preventiva del cáncer (Singh & Golan, 2008), es susceptible a dosis de irradiación de 3.7 kJ/m<sup>2</sup> aplicadas en poscosecha, puesto que se redujo durante el proceso de maduración, aspecto que concuerda con los resultados de Maharaj et al. (2010) si se tiene en cuenta que la síntesis de licopeno fue menor en los frutos irradiados (3.7kJ/m<sup>2</sup> y 2.4 kJ/m<sup>2</sup>) respecto del control. Estudios que contradicen lo hallado por Liu et al. (2009) después de aplicar dosis de 13.7 kJ/m<sup>2</sup>. Lo cual sugiere que la respuesta ante este elicitador dependerá de aspectos, tales como: condiciones experimentales, temperaturas de almacenamiento, exposición a otras fuentes de luz (solar, fluorescente), cultivar o variedad.

## 5. Tratamientos fotoquímicos (uvc): impacto sobre la flora fúngica

Algunas investigaciones al respecto indican que la utilización de dosis (UVC) sobre la epidermis de frutas y vegetales poseen la capacidad de disminuir las pérdidas económicas causadas por el impacto negativo de mohos fitopatógenos (Falguera et al., 2011b), por lo tanto, se han diversificado las aplicaciones, probando nuevas posibilidades *in vivo*. Es el caso del tratamiento con luz UVC en arándanos (*Vaccinium corymbosum*) de los cultivares Collins y Bluecorp que permitió reducir el ataque fúngico (10 %) producido por *Colletotrichum acutatum* y *Colletotrichum gloesporioides*. Stevens et al. (1996) y Li et al. (2010) lograron reducir el deterioro poscosecha en frutos de melocotón (Loring y Elberta) y pera causados por *Monilinia fructicola* y *Alternaria* spp., en manzanas (Golden Delicious) se disminuyó la agresividad de las pudriciones amarga y parda causadas por *C. Gloesporioides* y *Monilinia* sp., en los cítricos pomelo y tangerinas se ralentizó el daño causado por el moho verde (*Penicillium digitatum*) y específicamente en tangerinas (Marsh Seedless) la pudrición negra (*Alternaria citri*) y amarga (*Geotrichum candidum*).

Otros mohos fitopatógenos que han mostrado susceptibilidad frente a la radiación UVC son *Aspergillus flavus*, *Aspergillus niger*, *Penicillium corylophilum* y *Eurotium rubrum*. Begum, Hocking, & Miskelly (2009) evaluaron *in vitro* la susceptibilidad de los hongos anteriormente nombrados a diferentes tiempos de exposición (4644 J/m<sup>2</sup> y 0, 1.2 y 3 min) mediante tres diferentes técnicas (suspensión acuosa, difusión en placas de agar y retención de esporas en filtro de membranas), lo cual permitió conocer que *A. Flavus* sufrió una reducción de 4 log<sub>10</sub> después de 180 s de irradiación en medio acuoso, efecto contrario mostró *A. Niger* en el intervalo de 120-180 s de exposición, pues, fue resistente, llegándose a reducir tan solo en 2 log<sub>10</sub>. Por su parte, *P. Corylophilum* fue el microorganismo más sensible teniendo en cuenta que se logró reducir 3-4 log<sub>10</sub> con un tiempo de residencia de 120 s, llegándose a una completa inactivación con 180 s de exposición. En el caso de *E. Rubrum* se evidenció la disminución de células viables en 3 log<sub>10</sub> después de 60 s. Tiempos superiores a este (60 s-180 s) mostraron un número de esporas viables constante (2 × 10<sup>2</sup> ufc/ml).

Diversas cepas fúngicas son capaces de desarrollar mecanismos de defensa frente a compuestos fúngicos, razón por la cual se opta por el uso y estudio de mecanismos físicos y su modo de acción. Uno de estos organismos es *Botrytis cinerea*, fitopatógeno que posee cepas resistentes a fungicidas (Benito, Arranz, & Slava, 2000), afecta una amplia gama de drupas, como uvas, fresas, moras, y ha mostrado en estudios *in vitro* una interesante susceptibilidad a dosis (UVC) de 1 J/cm<sup>2</sup> (Marquenie et al., 2002).

En estudios *in vivo*, Nigro, Ippolito, & Lima (1998) evaluaron uvas de mesa inoculadas antes y después de la irradiación (0.1 kJ/m<sup>2</sup>-0.5 kJ/m<sup>2</sup>) y determinaron que el porcentaje de daño y diámetro de las lesiones fueron significativamente inferiores en ambos casos, resultados justificados por la síntesis de fitoalexinas y de proteínas con capacidad de degradar paredes celulares fúngicas (Charles et al., 2009). De igual manera, Mercier et al. (2001) observaron reducción en el número de infecciones mediante dosis en el rango de

0.2-2.2  $\text{kJ/m}^2$  sobre pimentones (*Capsicum annum* L. Var. Annum), siendo el aspecto más representativo el hecho de que la inoculación 24 h antes de la exposición no previno la infección, mientras que si esta es realizada después del tratamiento fotoquímico se reduce notablemente. Comportamiento que indicó un efecto inductor de resistencia a las enfermedades.

## 6. Efecto combinado: radiación uvc y otras tecnologías de conservación en la posrecolección

De acuerdo con Andrade Cuvi et al. (2011), la aplicación de luz  $\text{UVC}_{254}$  se utiliza, principalmente, como una operación, tendiente a controlar minimizar e interrumpir el crecimiento microbiano y algunos desórdenes fisiológicos. Su empleo ha mostrado interacciones aditivas o sinérgicas con inmersión previa de frutas y hortalizas en soluciones acuosas de hipoclorito de sodio, adición de compuestos antioxidantes, protección con películas y recubrimientos comestibles bioactivos (Shin et al., 2011), flora competitiva, uso de empaques rígidos, semirrígidos, modificación de atmósferas ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ) (López-Rubira et al., 2005) y bajas temperaturas de almacenamiento (Manzocco et al., 2011b). Lo cual refleja parte de la amplia versatilidad de la radiación UVC para trabajar en combinación con otros tratamientos físicos, químicos y biológicos. Teniendo en cuenta lo expuesto, este aparte sintetizará algunos estudios, recalcando su implementación en el manejo poscosecha en vegetales F y MP.

### 6.1 Tratamientos térmicos

A causa de las repercusiones negativas de los tratamientos térmicos convencionales sobre la estructura y valor biológico de tejidos vegetales, se ha propuesto su uso junto a otras técnicas de conservación, entre ellas bajas dosis de luz no ionizante. Con lo cual se busca disminuir el tiempo de exposición del alimento a las altas temperaturas para controlar la flora contaminante.

Para este fin, algunos investigadores sometieron conidias de *Botrytis cinerea* y *Monilia fructigena* a diversas temperaturas en baño termostataado con posterior aplicación de luz UVC. Sus reportes evidenciaron una afección en la viabilidad de los microorganismos como producto de un efecto conjunto (dosis: 0.01-1.5  $\text{j/cm}^2$ ;  $T^\circ$ : 35-48  $^\circ\text{C}$ ). En este caso, la sinergia de los tratamientos físicos contribuyó en la disminución de la intensidad requerida por cada uno de ellos, además el grado de susceptibilidad celular se afectó en función de la secuencia de aplicación, por ejemplo, *B. Cinerea* fue más lábil cuando el tratamiento térmico estuvo precedido de la dosis lumínica, resultado contrario al de *M. Fructigena*. En estudios desarrollados por Hamanaka et al. (2010), no fue claro si la secuencia calentamiento con infrarrojo (IR) seguida por UVC presentaron mayor eficiencia que la serie UVC-IR, pues, no se observaron diferencias sobre el grado de inactivación de esporas de los hongos *Penicillium* sp., *Aspergillus* sp., *Cladosporium* sp., *Rhizopus* sp. Y *Byssoschlamys* sp. Comportamiento similar al descrito por Marquenie et al. (2003a) quienes no encontraron diferencias entre la secuencia de los tratamientos

y el claro efecto sinérgico al combinar pulsos de luz blanca y UVC, pues, unidos (0.1 j/cm<sup>2</sup> y 120 s) causaron una disminución superior a las cuatro reducciones logarítmicas de conidias de *B. Cinerea*. Un común denominador para estos reportes fue que el grado de efectividad aumentó cuando se aplicaron las técnicas nombradas en conjunto, efecto que fue opuesto al uso independiente de los tratamientos.

A pesar de los buenos resultados observados *in vivo* por Marquenie et al. (2003a), estos no fueron consecuentes con lo encontrado en frutos de fresa expuestas a pulsos luminosos y UVC, pues, el crecimiento micelial de *B. Cinerea* no fue retrasado (Marquenie et al., 2003b). Entre tanto, estas bayas expuestas a corriente de aire caliente (45 °c, 3 h) y radiación UVC (4.1 kj/m<sup>2</sup>) lograron reducir el daño de *B. Cinerea* hasta 18 % de frutos infectados; por su parte, el control alcanzó un índice de daño de 55 % (Pan et al., 2004).

El efecto complementario fue utilizado por Neves, Vieira, & Silva (2012), en la desactivación de la enzima POD en trozos de zucchini o calabacín mediante el uso de temperaturas superiores a 85 °c y dosis de 0.1kj/m<sup>2</sup> durante el escaldado. Los resultados sugirieron la existencia de un efecto sinérgico al reducirse en 35 % la presencia de la enzima, valor que no fue alcanzado por el tratamiento tradicional. En este caso, el uso de luz UVC permitió acortar el tiempo de retención en el escaldado y facilitó el diseño de nuevas estrategias precongelamiento destinadas a productos MP.

Las técnicas combinadas también han sido beneficiosas sobre la vida de anaquel de frutos de manzana de las variedades Red Delicious y Golden Delicious. Al respecto, Hemmaty, Moallemi, & Naseri (2007) aplicaron dosis de radiación, posteriormente inmersión de estos frutos en agua adicionada con cacl<sub>2</sub> (4 %), y calentamiento (25 °c × 10 min, 38 °c × 5 min y 54 °c × 1 min), seguidamente empacaron, almacenaron (1 ± 1 °c; 85-95 % HR) y efectuaron el seguimiento de algunas variables. En este diseño, la adición de calcio se sustentó en el incremento de resistencia estructural (Hernández-Muñoz et al., 2006), disminución de desórdenes fisiológicos y patológicos vinculados con el contenido del ion en el tejido (Holb et al., 2012), así como susceptibilidad a degradación de las paredes celulares por parte de algunas enzimas (Shafiee, Taghavi, & Babalar, 2010; Ortiz, Graell, & Lara, 2011). Como resultados de las tecnologías aplicadas sobre el producto fresco se destacaron el retardo en la maduración, la conservación de la calidad y el incremento en el contenido de Ca<sup>+2</sup> en la pulpa.

## 6.2 Combinación UVC-recubrimientos y películas comestibles

Rappussi (2006) indica que la combinación de UVC (7.0 kj/m<sup>2</sup>), tiabendazol y recubrimientos comestibles estructurados a partir de diferentes proporciones de quitosano (0.5, 1.0 y 2.0 % w/v), un hidrocoloide policatiónico, arrojó resultados positivos en el control de *Guignardia citricarpa*, fitopatógeno causante de la enfermedad de punto negro en naranja valencia. Adicionalmente, la calidad del producto en fresco no se vio afectada al no encontrarse diferencias significativas en el contenido de sólidos solubles, acidez, ph y vitamina C; esto respecto del tratamiento testigo.

Por su parte, Shin et al. (2011) evaluaron este manejo tecnológico en fresas, combinando ácido fumárico (FA), radiación UVC y películas biodegradables a base de gelatina a 1 % w/v, obteniendo como resultado una reducción en la población de bacterias aeróbicas totales de 2.9 a 1.3 log UFC/g y una disminución en las poblaciones de levaduras y mohos de 2.6 a 1.0 log UFC/g, por lo cual sugieren que este tipo de mezclas favorecen el control microbiano y la calidad de las fresas almacenadas en refrigeración.

### 6.3 Combinación UVC-atmósferas modificadas pasivas (AMP)

La aplicación de UVC y atmósferas modificadas en productos mínimamente procesados se constituye en otra respuesta al manejo de productos vegetales si se tiene en cuenta que contribuyen en conservar su valor funcional y calidad de cosecha. Costa et al. (2006) indicaron que brócolis expuestos a radiación de 10 kJ/m<sup>2</sup>, empacadas en AMP bajo refrigeración, registraron disminución en la degradación de la clorofila a y b, de igual manera Cantos et al. (2003) y Piga et al. (1997) señalaron, respectivamente, que uvas de mesa y nopales sometidos a combinaciones del mismo tipo, en el primer caso, incrementaron el contenido de estilbenos especialmente tipo resveratrol y en el segundo se redujo significativamente la pérdida de peso y se concedió resistencia al daño por frío.

Por su parte, Allende et al. (2006b) registraron resultados positivos del estudio *in vivo* sobre hojas de lechuga dosificadas con 1.2, 2.4 y 7.1 kJ/m<sup>2</sup> por ambos lados de las hojas, complementado con AMP, refrigeración (5 °c) y evaluados durante 10 días. Elementos que fueron efectivos en la reducción de la flora epífita del producto. Aunque las dosis más elevadas evidenciaron las mayores inhibiciones, de igual manera generaron ablandamiento y oscurecimiento del tejido después del séptimo día. Dicho estudio concluyó que la radiación UVC aplicada en dosis adecuadas por las dos caras del producto es eficaz en la reducción de la microflora natural y el mejoramiento de la vida en anaquel de este tipo de productos MP.

En el caso de hojas de espinaca mínimamente procesadas, Artes et al. (2009) manifestaron que el efecto de radiación (0, 4.5, 7.9 y 11.4 kJ/m<sup>2</sup>), AMP y almacenamiento en refrigeración (5 y 8 °c) disminuyeron de forma efectiva el recuento de mesófilos y psicrófilos respecto de la desinfección convencional a partir de hipoclorito de sodio (150 ppm). No obstante, el producto presentó daño tisular superficial inducido por la mayor dosis (11.4 kJ/m<sup>2</sup>), así como disminución en la actividad antioxidante y contenido de polifenoles. Poniendo de manifiesto lo expuesto por Rivera et al. (2007), “[...] la susceptibilidad del tejido vegetal al tratamiento de irradiación difiere significativamente entre variedades, estados fisiológicos, composición y grosor de la piel del fruto u hortaliza, con efectos adversos cuando la intensidad es superior a la tolerada por el producto” (p. 370). En este caso, la combinación de una baja a moderada dosis como alternativa efectiva de desinfección frente al empleo del cloro, combinada con atmósferas modificadas, representó una estrategia de preservación de la calidad y contenido inicial de clorofila en hojas de espinaca MP.

## 7. Variables y condiciones de operación

Especialistas en el tema hacen hincapié en que el tamaño y geometría de los alimentos repercuten sobre el diseño y dimensiones de las cámaras de irradiación, por lo tanto, la producción de equipos a escala industrial estará limitada por las características morfológicas de los productos, especialmente, por la estructura y topografía de la superficie (Escalona et al., 2010). Estos aspectos inciden sobre la luz monocromática absorbida o incidente, pues, el grado de penetración en el tejido es muy bajo, actuando, principalmente, sobre el área expuesta y siendo menos eficiente en poros, orificios y endocarpio.

Un estudio al respecto llevado a cabo en manzanas irradiadas encontró un incremento significativo en el contenido de fenilpropanoides sintetizados en la cáscara del fruto, pero no observó respuesta en el tejido interno (pulpa), incluso variables como sólidos solubles y acidez titulable no mostraron cambios apreciables. Razón por la cual Hagen et al. (2007) y Guerrero-Beltrán & Barbosa-Cánovas (2004) aclararon que el contenido bioactivo es sintetizado mayoritariamente en el epicarpio o tejido de protección indicando que este debería ser consumido y, por ende, la dosificación debe estar homogéneamente distribuida en el total del área expuesta.

Este aspecto ha planteado el diseño de cámaras de irradiación con lámparas localizadas por una o ambas caras del producto a una distancia dependiente de las condiciones experimentales, siendo la primera opción el caso más común (Nigro, Ippolito, & Lima, 1998). El segundo sistema (ver figura 1), y con el cual se está trabajando en la Universidad del Tolima en Colombia, se basa en la ubicación de los dos grupos de lámparas a una distancia equidistante de la matriz por irradiar (Allende et al., 2006b; Kasim, Kasim, & Erkal, 2008), la cual se encuentra suspendida sobre materiales que facilitan el manejo y transporte de los hortofrutícolas; algunos autores hacen alusión a láminas de polipropileno biorientado (PPB) o mallas de poliestireno (Allende et al., 2006b; Escalona et al., 2010). Otros aspectos que se tienen en cuenta para ambos diseños consisten en reducir el incremento de la temperatura interna de la cámara de irradiación mediante adición de disipadores o ventiladores, evitar que los hortícolas de hoja ejerzan superposición y recubrir las paredes internas con materiales reflectores, como el aluminio para concentrar la luz sobre el producto, reducir su pérdida y proteger los operarios (Allende & Artes, 2003).



**Figura 1.** Cámara de irradiación con luz UVC generada mediante lámparas de mercurio de baja presión

La orientación de los vegetales también ha sido blanco de estudio; en el caso de las cebollas de bulbo, Rodrigues et al. (2010) indican que se han ubicado en bandejas giratorias mientras la fuente lumínica es dispuesta sobre la parte superior y, posteriormente, se cambia la posición del tejido vegetal para asegurar una aplicación equilibrada. Liu et al. (2009) y Maharaj et al. (2010) en sus experimentos giran el alimento, y establecen tiempos de residencia para favorecer un tratamiento uniforme. En otras experiencias, efectúan la irradiación del producto en las zonas laterales (2) y los extremos del fruto (cáliz y base). Adicionalmente, el producto se ubica aleatoriamente sobre diferentes zonas del campo de irradiación haciendo uso de tiempos e intensidad para alcanzar las dosis requeridas (Stevens et al., 1998). En el caso de productos troceados, la dosificación habitualmente se ha realizado sobre el producto contenido en el empaque primario, rotando el empaque sobre su mismo eje hasta cuatro veces para homogenizar la aplicación (Alothman, Bath, & Karim, 2009b). En otros estudios los autores mezclan, rotan el producto (repollo) y paralelamente irradian; para concluir con el envasado y almacenamiento (Ruiz, Questa, & Rodríguez, 2010).

Las dosis se han cuantificado mayoritariamente con radiómetros digitales en evaluaciones sobre fresas (Pombo et al., 2009), espinaca (Escalona et al., 2010), melocotones (Stevens et al., 1998), arándanos (Perkins-Veazie et al., 2008), variedades de uva de mesa y producción de vino (Nigro, Ippolito, & Lima 1998; Cantos et al., 2007; Guerrero et al., 2010), cebollas de bulbo rojas y blancas (Rodríguez et al., 2010), tomate de mesa (Jagadeesh et al., 2009), melón, piña, banano y guayaba precortados (Chisari et al., 2011; Alothman, Bath, & Karim, 2009b), entre otros. Siendo una metodología cuantitativa sencilla y de bajo costo, lo que facilita confrontar resultados obtenidos en el laboratorio con estudios de su misma naturaleza llevados a cabo a escala industrial. El uso de lámparas de mercurio de baja presión con pico de emisión a 254 nm, una longitud de onda de alta capacidad germicida, además del uso de radiómetros por actinometría química (Rahn, 1997), usada recientemente por Gómez et al. (2010) en troceados de manzana y biosimetría (Obande & Shama, 2011), hacen parte de los elementos de emisión de luz y control recientemente utilizados.

Es importante aclarar que un aumento en la dosis de radiación no es siempre consecuente con los beneficios posibles, ya que en algunos casos influenciaron daño severo a nivel celular (Manzocco et al., 2011a) y generaron resistencia en los microorganismos (Nigro, Ippolito, & Lima, 1998). Por lo tanto, se deberán llevar a cabo estudios tendientes a conocer la hormesis producida sobre cada tipo de producto, prestando especial atención a las dosis cuantificadas, condiciones de almacenamiento, exposición a la luz visible (Gómez et al., 2010) y relación dosis-respuesta.

Como se puede observar en la tabla 1, se han sintetizado valores de dosis y descripción de la hormesis en productos frescos y mínimamente procesados tratados fotoquímicamente en poscosecha. Sin embargo, la luz UVC es flexible y ha permitido realizar tratamientos precosecha, especialmente diseñados para cultivos en invernadero, como es el caso del tomate de mesa que ha mostrado respuestas benéficas (Obande, Tucker, & Shama, 2011).

**Tabla 1.** Tratamientos fotoquímicos (UVC<sub>254</sub>) en productos hortofrutícolas: efectos y alcances

PRODUCTO IRRADIADO	F. O M.P.	TIEMPO DE EXPOSICION O DOSIS	IMPLICACIONES DE SU USO	REFERENCIA
Arándanos ( <i>Vaccinium corimbosum</i> ) cvs Collins, Bluecrop	F	0 - 4 kJ/m <sup>2</sup>	No se produjo cambios en la firmeza ni en la pérdida de peso. El cultivar Bluecorp sufrió incremento en el contenido de antocianos, siendo proporcional con la intensidad del tratamiento (2 y 4 KJ/m <sup>2</sup> )	Perkins-Veazie et al., (2008)
Banano Musa (Grupo AAA , subgrupo Cavendish) cv. Cavendish	F	0, 0.02, 0.03, y 0.04 kJ/m <sup>2</sup>	Activación de PAL, síntesis de fenoles, activación de enzimas antioxidantes y consecuente disminución del daño por frío (5 °C).	Pongprasert et al., (2011).
Brócoli ( <i>Brassica oleracea</i> L. Var. Italica) cv. Iron	F	10 kJ/m <sup>2</sup>	Conservación de altos niveles de clorofila, justificado por baja expresión de feofitinasas.	Büchert, Cive- llo & Martínez (2011)
Carambola ( <i>Averroha carambola</i> L.)	MP	0 y 13 kJ/m <sup>2</sup>	Reducción del pardeamiento enzimático y de la pérdida de firmeza. Menor tasa de crecimiento de mohos. Aumentó el contenido de flavonoides y fenoles totales.	Andrade-Cuvi et al., (2010)
Cebollas de bulbo blancas y rojas ( <i>Allium cepa</i> L.) Var. Blanca de Póvoa y Roja de Póvoa	F	2.5, 5, 10, 20 y 40 kJ/m <sup>2</sup>	Después de 1 semana de preservación se observó un aumento en el contenido de flavonoides el cual fue proporcional a la dosis recibida por el tejido.	Rodrigues et al., (2010)



Champiñones ( <i>Agaricus bisporus</i> )	F	0 – 3.15 kJ/m <sup>2</sup>	Dosis de 0.45–3.15 kJ/m <sup>2</sup> causaron reducción de <i>Escherichia coli</i> O157:H7 preinoculada en el orden de 0.67–1.13 log <sub>10</sub> CFU g <sup>-1</sup> . UV incrementó pardeamiento enzimático, se vio afectada la actividad antioxidante, acumulación de fenoles y ácido ascórbico.	Guan, Fang & Yang, (2012).
Ensalada lista para comer (Zanahoria rallada, lechuga, achicoria, repollo)	MP	0.1, 0.2, 0.4, 0.6 y 0.8 kJ/m <sup>2</sup>	Ensalada preinoculada con bacterias patógenas e irradiadas con dosis de 0.8 kJ/m <sup>2</sup> disminuyeron en 2.16 y 2.57 log <sub>10</sub> CFU/g las poblaciones de <i>Escherichia coli</i> O157:H7 y <i>Listeria monocytogenes</i> respectivamente.	Chun, Kim & Song, (2010b).
Espinaca ( <i>Spinacia oleracea</i> L.)	MP	0, 2.4, 7.2, 12 y 24 KJ/m <sup>2</sup>	Respiración del tejido vegetal fue superior en las hojas irradiadas que en el control. No se observó daño sobre la superficie del tejido lo cual fue corroborado por microscopía electrónica (SEM).	Escalona et al., (2010)
Fresa ( <i>Fragaria x ananasa</i> , Duch. Cv Aroma)	F	4,1 kJ/m <sup>2</sup>	Reducción en ablandamiento en los frutos tratados y almacenados a 20°C durante 96 horas. El efecto hormico afecta la expresión de un conjunto de genes relacionados con la degradación de la pared celular.	Pombo et al., (2009)
Lechuga “Lollo Rosso” ( <i>Lactuca sativa</i> )	MP	0.4, 0.81, 2.44, 4.07, y 8.14 kJ/m <sup>2</sup>	Incremento en tasa de respiración, disminución en el crecimiento de psicrófilos, coliformes, mohos y levaduras. Dosis de 8.14 kJ/m <sup>2</sup> fue la más efectiva así como aumentó brillo en el tejido. Dosis de 2.44, 4.07 y 8.14 kJ/m <sup>2</sup> disminuyeron pardeamiento.	Allende & Artés, (2003)

Manzana <i>(Malus pumila)</i> var. Granny Smith	MP	$0, 5.6 \pm 0.3;$ $8.4 \pm 0.5$ y $14.1$ $\pm 0.9$ kJ/m <sup>2</sup>	Ruptura de membranas y posterior pardeamiento, reducción en la carga microbiana inicial. Se sugiere previa inmersión en ácido ascórbico y $\text{CaCl}_2$	Gómez et al., (2010)
Manzana <i>(Malus domestica</i> Borkh.) Var. Pink Lady	MP	0, 1.6, 6.0, 12.0 y 24.0 kJ/m <sup>2</sup>	Reducción $1 - 2 \log_{10}$ en flora contaminante viable. Dosis superiores a 1.2 kJ/m <sup>2</sup> causaron ruptura de membranas y fenómenos oxidativos. A bajas dosis, una película protectora comestible se formó y obstaculizó la pérdida de humedad.	Manzocco et al., (2011a)
Mango <i>(Mangifera indica)</i> cv Haden	F	2.46, 4,96 kJ/m <sup>2</sup>	Disminución en el porcentaje de daño y extensión de la vida útil. Incremento de fenoles, flavonoides, y actividad de enzimas lipoxigenasa y PAL.	Gonzalez-Aguilar et al., (2007).
Melocotón <i>(Prunus persica L.</i> Batsch) var. Elberta	F	0, 4.5, 7.8, 20 y 40 kJ/m <sup>2</sup>	Generación de resistencia frente al ataque de frutos preinoculados con <i>Monilia fructicola</i> . Se retardó la maduración e incremento de actividad de fenilalanina amoniliasa.	Stevens et al., (1998)
Melocotón <i>(Prunus pérsica cv Jefferson)</i>	F	8220 mw/m <sup>2</sup> tiempo de 3, 5, 10, 15 y 20 min	Reducción de daño por hongos Pardeamiento y daño por exposición de moderado a severo. Se estimuló la producción de etileno Acumulación de espermina y espermidina después de la exposición a la irradiación Incremento en los niveles de putrescina. Producción de compuestos reguladores del crecimiento vegetal	González-Aguilar et al., (2004).
Melón <i>(Cucumis melo L.)</i>	MP	1.4 – 13.7 kJ/m <sup>2</sup>	Una dosis de 4.1 kJ/m <sup>2</sup> produjo una leve reducción en la flora contaminante sin afectar calidad general.	Fonseca & Rushing, (2006)

Melón ( <i>Cucumis melo</i> L.) Var. Reticulatus	MP	0,04 kJ/s <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> (30, 90 y 120 s. De exposición)	Reducción del pardeamiento 'browning' y actividad de enzi- mas PME y PG.	Chisari et al., (2011)
Melón ( <i>Cucumis melo</i> L.) Var. Reticulatus)	MP	0, 1.2, 6.0 y 12.0 kJ/m <sup>2</sup>	Disminución en la pérdida de humedad en el producto, mejo- ramiento de sabor y conserva- ción de calidad microbiológica.	Manzocco, Da Pieve & Maifre- ni, (2011b)
Papaya ( <i>Carica papaya</i> ) var. Golden	F	0, 0.2, 0.4, 0.84, 1.3, 2.4 kJ/m <sup>2</sup>	No se produjo inducción de resistencia ante <i>Colletotrichum</i> <i>gloesporioides</i> , ni detención en los procesos infecciosos evaluados <i>in vivo</i> . Tejidos ex- puestos fueron susceptibles a pardeamiento.	Cia et al., (2007)
Pimientos rojos ( <i>Capsi- cum annum</i> L.) Cv Cornago	F	0, 10, 20 kJ/m <sup>2</sup>	Disminución en el daño por frío (10 kJ/m <sup>2</sup> ), y pérdida de peso en productos almacenados en refrigeración (0 °C).	Andrade Cuvi et al., 2011
Repollo blanco ( <i>Brassica oleracea</i> ) var. Capitata	MP	0,6 y 1,2 J/cm <sup>2</sup>	Conservación de las propieda- des organolépticas No se observaron cambios consi- derables en fenoles ni activi- dad antioxidante	Ruiz, Qüesta & Rodríguez, (2010).
Sandía ( <i>Citrullus lanatus</i> Thunb) cv Fashion	MP	1.6, 2.8, 4.8 y 7.2 kJ/m <sup>2</sup> .	Incremento en tasa respira- toria, y malos olores por dosis de 4.8 y 7.2 kJ/m <sup>2</sup> . Bajas dosis arrojaron una calidad general aceptable hasta el día 11 de la prueba.	Artés-Her- nández et al., (2010).
Tomate ( <i>Lycopersicon sculentum</i> Mill).	F	3.7 kJ/m <sup>2</sup>	Reducción del contenido de li- copeno y síntesis de vitamina C y fenoles.	Jagadeesh et al., (2009)
Tomate ( <i>Lycopersicon sculentum</i> ) var. Capello	F	0, 3,7 y 24,4 kJ/m <sup>2</sup>	Retraso en la degradación de clorofila y acumulación de li- copeno. Dosis de 3.7 kJ/m <sup>2</sup> permitieron acumular más ca- rotenoides totales. Dosis de 24, 4 kJ/m <sup>2</sup> genero daño irreversible en tejido.	Maharaj et al., (2010)

Tomate ( <i>Lycopersicon sculentum</i> ) cv Red Ruby	F	13,7 kJ/m <sup>2</sup>	Del 4 – 21 día después del tratamiento el contenido de licopeno se incrementó hasta 6 veces en la epidermis. No se tuvo efecto sobre el contenido de β-caroteno ni sobre el contenido de SST.	Liu et al., (2009)
Tomate ( <i>Lycopersicon sculentum</i> Mill) var. Better Boy	F	3,6 kJ/m <sup>2</sup>	Incremento en la firmeza de los frutos Descenso en la actividad de enzima PG Resistencia al ataque por <i>Rhizopus stolonifer</i>	Stevens et al., (2004)
Tomate ( <i>Lycopersicon sculentum</i> Mill.) Cv. Trust	F	3.7 kJ/m <sup>2</sup>	Afecto expresión de proteínas asociadas con el ablandamiento del tejido, incremento en síntesis de glucanasas y quitinasas.	Charles et al., (2009)
Uva de mesa ( <i>Vitis vinifera</i> L.) Cv Italia	F	Rango desde 0,125 – 4 kJ/m <sup>2</sup>	Dosis superiores a 1 kJ/m <sup>2</sup> generaron manchas y decoloración. Dosis de 0,125 kJ/m <sup>2</sup> y 0,5 kJ/m <sup>2</sup> disminuyeron la infección y diámetro del daño en los tejidos causado por <i>B. Cinerea</i> .	Nigro, Ippolito & Lima (1998)
Uva ( <i>Vitis vinifera</i> ) Var. Tintas y blancas: Jaén tinto, Palomino negro, etc.	F	510 W/ 60 s.	Inducción de resveratrol y otros estilbenos como piceatanol y viniferinas.	Cantos et al., (2007)
Zapallo anco ( <i>Cucurbita moschata</i> D.)	MP	0, 2.08 y 3.14 kJ/m <sup>2</sup>	Se extendió la vida útil del zapallo mínimamente procesado, y se mantuvo calidad sensorial e inocuidad. El contenido de betacaroteno, acidez y azúcares fueron similares frente al control.	Sgroppo & Sosa, (2009)

F: Producto entero fresco

MP: Producto mínimamente procesado

## 8. Conclusiones

Diversos estudios amparan los alcances y beneficios de la radiación ultravioleta de onda corta mediante su diversidad de aplicaciones en la agroindustria de productos hortícolas frescos y mínimamente procesados. Su uso no se encuentra circunscrito a la reducción de flora contaminante; por el contrario, los nuevos hallazgos permiten pensar que cada producto tendrá diversas respuestas ante este mecanismo de estrés, las cuales deberán ser evaluadas previamente, en vista de los posibles efectos adversos que conllevan las altas dosis. Los estudios recientes se han centrado en determinar los mecanismos por los cuales se genera resistencia en los tejidos desde el ámbito molecular, campo de estudio que ha traído interesantes respuestas, como el determinarse cambios en los perfiles de proteínas a través de la expresión de genes relacionados con patogenicidad, maduración, hasta la activación del sistema enzimático antisenescencia. Para la agroindustria, el uso de UVC representa una posibilidad para minimizar pérdidas poscosecha, incremento del contenido bioactivo, actividad antioxidante y ofrecer productos estables microbiológicamente. Se observan oportunidades interesantes en productos mínimamente procesados y su uso como tratamiento combinado para retardar o evitar pardeamiento enzimático.

## Agradecimientos

Los autores manifiestan su agradecimiento al programa Jóvenes Investigadores de la Red de Universidades Públicas del Eje Cafetero (Red Alma Mater), por la beca de formación en investigación entregada al autor principal, y de igual forma a la Universidad del Tolima y la Oficina de Investigaciones y Desarrollo Científico proyecto 70111.

## Referencias

- Allende, A., & Artés, F. (2003). UV-C radiation as a novel technique for keeping quality of fresh processed Lollo Rosso' lettuce. *Food Research International*, 36, 739-746.
- Allende, A., Tomás-Barberan, F. A., & Gil, M. I. (2006a). Minimal processing for healthy traditional foods. *Trends in Food Science and Technology*, 17, 513-519.
- Allende, A., mcevoy, J. L., Luo, Y., Artés, F., & Wang, C. Y. (2006b). Effectiveness of two-sided UV-C treatments in inhibiting natural microflora and extending the shelf-life of minimally processed 'Red Oak leaf' lettuce. *Food Microbiology*, 23, 241-249.
- Alothman, M., Bath, R., & Karim, A. A. (2009a). Effects of radiation processing on phytochemicals and antioxidants in plant produce. *Trends in Food Science and Technology*, 20, 201-212.
- Alothman, M., Bath, R., & Karim, A.A. (2009b). UV radiation-induced changes of antioxidant capacity of fresh-cut tropical fruits. *Food Science and Emerging Technologies*, 10, 512-516.

- Álvarez, E., Ospina, C. A., Mejía, J. F., & Llano, G. A. (2002). Caracterización morfológica, patogénica y genética del agente causal de la antracnosis (*Colletotrichum gloeosporioides*) en guanábana (*Annona muricata*) en el Valle del Cauca. *Fitopatología Colombiana*, 28(1), 1-8.
- Andrade-Cuvi, M. J., Moreno-Guerrero, C., Henríquez-Bucheli, A., Gómez-Gordillo, A., & Concellón, A. (2010). Influencia de la radiación UVC como tratamiento postcosecha sobre carambola (*Averrhoa carambola L.*) Mínimamente procesada almacenada en refrigeración. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 11(1), 18-27.
- Andrade Cuvi, M. J., Vicente, A. R., Concellón, A., & Cháves, A. R. (2011). Changes in red pepper antioxidants as affected by UV-C treatments and storage at chilling temperatures. *LWT Food Science and Technology*, 44, 1666-1671.
- Apel, K., & Hirt, H. (2004). Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. *Annual Review of Plant Biology*, 55, 373-399.
- Artés-Hernández, F., Robles, P. A., Gómez, P. A., Tomás-Callejas, A., & Artés, F. (2011). Low UV-C illumination for keeping overall quality of fresh-cut watermelon. *Postharvest Biology and Technology*, 55, 114-120.
- Begum, M., Hocking, A. D., & Miskelly, D. (2009). Inactivation of food spoilage fungi by ultra violet (UVC) irradiation. *International Journal of Food Microbiology*, 129, 74-77.
- Begum, M., Parween, S., & Faruki, S. I. (2007). Combined effect of UV-radiation and triflumuron on the progeny of *Alphitobius diaperinus* (Panzer) (Coleoptera: Tenebrionidae) at different storage period. *University Journal of Zoology, Rajshahi University*, 26, 45-48.
- Benito, E. P., Arranz, M., & Eslava, A. P. (2000). Factores de patogenicidad de *Botrytis cinerea*. *Revista Iberoamericana de Micología*, 17, S43-S46.
- Bintsis, T., Litopoulou-Tzanetaki, E., & Robinson, R. K. (2000). Existing and potential applications of ultraviolet light in the food industry e a critical review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80, 637-645.
- Büchert, A. M., Civello, P. M., & Martínez, G. A. (2011). Effect of hot air, UV-C, white light and modified atmosphere treatments on expression of chlorophyll degrading genes in postharvest broccoli (*Brassica oleracea L.*) Florets. *Scientia Horticulturae*, 127, 214-219.
- Cantos E., Espín, J., Fernández M., Oliva, J., & Tomás-Barberán, F. (2003). Postharvest UV-C-irradiated grapes as a potential source for producing stilbene-enriched red

- wines. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51, 1208-1214.
- Cantos, E. E., Guerrero, R. F., Puertas, B., Jiménez, M. J., & Jurado, M. S. (2007). Tratamiento poscosecha de uva de vinificación con radiación UVC para obtención de vinos enriquecidos en resveratrol. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 8(2), 112-120.
- Charles, M. T., Tano, K., Asselin, A., & Arul, J. (2009). Physiological basis of UV-C induced resistance to *Botrytis cinerea* in tomato fruit. V. Constitutive defense enzymes and inducible pathogenesis-related proteins. *Postharvest Biology and Technology*, 51, 414-424.
- Chisari, M., Barbagallo, R. N., Spagna, G., & Artes, F. (2011). Improving the quality of fresh-cut melon through inactivation of degradative oxidase and pectinase enzymatic activities by UV-C treatment. *International Journal of Food Science and Technology*, 46, 463-468.
- Chun, H. H., Kim, J. Y., Lee, B. D., Yu, D. J., & Song, K. B. (2010a). Effect of UV-C irradiation on the inactivation of inoculated pathogens and quality of chicken breasts during storage. *Food Control*, 21(3), 276-280.
- Chun, H., Kim, J., & Song, K. (2010b). Inactivation of foodborne pathogens in ready-to-eat salad using UV-C irradiation. *Food Science and Biotechnology*, 192(2), 547-551.
- Chun, H., Kim, J., Chung, K., Won, M., & Song, K. B. (2009). Inactivation kinetics of *Listeria monocytogenes*, *Salmonella enterica* serovar Typhimurium, and *Campylobacter jejuni* in ready-to-eat sliced ham using UV-C irradiation. *Meat Science*, 83, 599-603.
- Cia, P., Pascholati, S. F., Benato, E. A., Camili, E. C., & Santos, C. E. (2007). Effects of gamma and UV-C irradiation on the postharvest control of papaya anthracnose. *Postharvest Biology and Technology*, 43, 366-373.
- Clingen, P. H., Arlett, C. F., Roza, L., Mori, T., Nikaido, O., & Green, M. H. L. (1995). Induction of cyclobutane pyrimidine dimers, pyrimidine (6-4) pyrimidine photoproducts, and Dewar valence isomers by natural sunlight in normal human mononuclear cells. *Cancer Research*, 55, 2245-2248.
- Collins, D. A., & Kitchingman, L. (2010). The effect of ultraviolet C radiation on stored-product pests. 10th International Working Conference on Stored Product Protection (pp. 632-636). Doi 10.5073/jka.2010.425.153
- Costa, L., Vicente, A. R., Civello, P.M., Cháves, A. R., & Martínez, G. A. (2006). UV-C treatment delays postharvest senescence in broccoli florets. *Postharvest Biology and Technology*, 39, 204-210.

- Cushnie, T. P. T., & Lamb, A. J. (2005). Antimicrobial activity of flavonoids. *International Journal of Antimicrobial Agents*, 26, 343-356.
- Dixon, R. A., & Paiva, N. L. (1995). Stress-induced phenylpropanoid metabolism. *Plant Cell*, 7, 1085-1097.
- El Ghaouth, A., Wilson, C. L., & Callahan, A. M. (2003). Induction of chitinase,  $\beta$ -1,3-glucanasa, and phenylalanine ammonia lyase in peach fruit by UV-C treatment. *Biological control*, 93(3), 349-355.
- Erkan, M., Wang, C. Y., & Krizek, D. T. (2001). UV-C irradiation reduces microbial population and deterioration in *Cucurbita pepo* fruit tissue. *Environmental and Experimental Botany*, 45, 1-9.
- Escalona, V. H., Aguayo, E., Martínez-Hernández G, B., & Artés, F. (2010). UV-C doses to reduce pathogen and spoilage bacterial growth *in vitro* and in baby spinach. *Postharvest Biology and Technology*, 56, 223-231.
- Falguera, V., Pagán, J., Garza, S., Garvín, A., & Ibarz, A. (2011b). Ultraviolet processing of liquid food: A review. Part 2: Effects on microorganisms and on food components and properties. *Food Research International*, 44, 1580-1588.
- Falguera, V., Pagán, J., Garza, S., Garvín, A., & Ibarz, A. (2012). Inactivation of polyphenol oxidase by ultraviolet irradiation: protective effect of melanins. *Journal of Food Engineering*, 110(2), 305-309.
- Falguera, V., Pagán, J., & Ibarz, A. (2011a). Effect of UVC irradiation on enzymatic activities physicochemical properties of apple juices from different varieties. *LWT-Food Science and Technology*, 44, 115-119.
- Faruki S. I., Das D. R., Khan A. R., & Khatun M. M. (2007). Effects of ultraviolet (254nm) irradiation on egg hatching and adult emergence of the flour beetles, *Tribolium castaneum*, *T. Confusum* and the almond moth, *Cadra cautella*. *Journal of Insect Science*, 7(36), 1-6.
- Fonseca, J. M., & Rushing, J. W. (2006). Effect of ultraviolet-C light on quality and microbial population of fresh-cut watermelon. *Postharvest Biology and Technology*, 40(3), 256-261.
- Fuller, M., Hopwood, J. J., Anson, D. S., & Sala, J. M. (1998). Involvement of oxidative stress in chilling injury in cold-stored mandarin fruits. *Postharvest Biology and Technology*, 13, 255-261.
- Gómez, P. L., Alzamora, S. M., Castro, M. A., & Salvatori, D. M. (2010). Effect of ultraviolet-C light dose on quality of cut-apple: Microorganism, color and compression behavior. *Journal of Food Engineering*, 98, 60-70.



- González-Aguilar, G., Wang, C. Y., & Buta, G. J. (2004). UV-C Irradiation reduces breakdown and chilling injury in peaches during cold storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84, 415-422.
- González-Aguilar, G. A., Zabaleta-Gatica, R., & Tiznado-Hernández, M. E. (2007). Improving postharvest quality of mango 'Haden' by UV-C treatment. *Postharvest Biology and Technology*, 45, 108-116.
- González-Aguilar, G., Villa-Rodrigues, J. A., Ayala-Zabala, J. F., & Yahia, E.M. (2010). Improvement of the antioxidant status of tropical fruits as a secondary response to some postharvest treatments. *Trends in Food Science and Technology*, 21, 475-482.
- González-Barrio, R., Salmenkallio-Marttila, M., Tomás-Barberán, F.A., Cantos, E., & Espín, J. C. (2005). Etiology of UV-C-induced browning in var. Superior white table grapes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53, 5990-5996.
- Guan, W., Fan, X., & Yan, R. (2012). Effects of UV-C treatment on inactivation of Escherichia coli O157:H7, microbial loads, and quality of button mushrooms. *Postharvest Biology and Technology*, 64, 119-125.
- Guerrero, R. F., Puertas, B., Fernández, M. I., Piñeiro, Z., & Cantos-Villar, E. (2010). UVC-treated skin-contact on both white wine quality and resveratrol content. *Food Research International*, 43, 2179-2185.
- Guerrero-Beltrán, J. A., & Barbosa-Cánovas, G. V. (2004). Advantages and limitations on processing foods by UV light. *Food Science and Technology International*, 10(3), 137-147.
- Gülçin, I. (2010). Antioxidant properties of resveratrol: a structure–activity insight. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 11, 210-218.
- Hagen, S. F., Borge, G. I. A., Bengtsson, G. B., Bilger, W., Berge, A., Haffner, K.,... (2007). Phenolic contents and other health and sensory related properties of apple fruit (*Malus domestica* Borkh., cv. Aroma): Effect of postharvest UV-B irradiation. *Postharvest Biology and Technology*, 45(1), 1-10.
- Hamanaka, D., Atungulu, G. G., Tanaka, F., & Uchino, T. (2010). Effect of combining infrared heating with ultraviolet irradiation on inactivation of mold spores. *Food Science Technology Research*, 16(4), 279-284.
- Harbaum-Piayda, B., Walter, B., Bengtsson, G. B., Hubbermann, E. M., Bilger, W., & Schwarz, K. (2010). Influence of pre-harvest UV-B irradiation and normal or controlled atmosphere storage on flavonoid and hydroxycinnamic acid contents of pak choi (*Brassica campestris* L. Ssp. *Chinensis* var. *Communis*). *Postharvest Biology and technology*, 56, 202-208.

- Hemmaty, S., Moallemi, N., & Naseri, L. (2007). Effect of UV-C radiation and hot water on the calcium content and postharvest quality of apples. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 5(4), 559-568.
- Hernández-Muñoz, P., Almenar, E., Ocio, M. J., & Gavara, R. (2006). Effect of calcium dips and chitosan coatings on postharvest life of strawberries (*Fragaria x ananassa*). *Postharvest Biology and Technology*, 39, 247-253.
- Herrera, A. M., & Romero de Ávila, M. D. (2006). Innovaciones en el procesado de alimentos: tecnologías no térmicas. *Revista Médica Universidad de Navarra*, 50(4), 71-74.
- Holb, I. J., Balla, B., Vámos, A., & Gáll, J. M. (2012). Influence of preharvest calcium applications, fruit injury, and storage atmospheres on postharvest brown rot of apple. *Postharvest Biology and Technology*, 67, 29-36.
- Jagadeesh, S. L., Charles, M. T., Garipey, Y., Goyette, B., Raghavan, G. S. V., & Vigneault, C. (2009). Influence of postharvest UV-C hormesis on the bioactive components of tomato during post-treatment handling. *Food Bioprocess and Technology*. DOI 10.1007/s11947-009-0259-y
- Kashimada, K., Kamiko, N., Yamamoto, K., & Ohgaki, S. (1996). Assessment of photoreactivation following ultraviolet light disinfection. *Water Science and Technology*, 33, 261-269.
- Kasim, M. U., Kasim, R., & Erkal, S. (2008). UV-C treatments on fresh-cut green onions enhanced antioxidant activity, maintained green color and controlled 'telescoping'. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 6(3), 63-67.
- Kim, Y.-H., Lim, S., Han, S.-H., Lee, J.-C., Song, W.-K., Bang, ... Kwak, S.-S., (2007). Differential expression of 10 sweet potato peroxidases in response to sulfur dioxide, ozone, and ultraviolet radiation. *Plant Physiology and Biochemistry*, 45, 908-914.
- Koutchma, T. N., Forney, L. J., Moraru, C. I. (2009). Principles and applications of UV technology. En Koutchma, T. N., Forney, L. J., Moraru, C. I. (eds.), *Ultraviolet light in food technology: Principles and applications* (pp. 1-31). Boca Ratón, FL: CRC Press.
- Li, J., Zhang, Q., Cui, Y., Yan, J., Cao, J., Zhao, Y. & Jiang, W. (2010). Use of UV-C treatment to inhibit the microbial growth and maintain the quality of Yali pear. *Journal of Food Science*, 75: M503-M507.
- Liu, L. H., Zabarar, D., Bennett, L. E., Aguas, P., & Woonton, B.W. (2009). Effects of UV-C, red light and sun light on the carotenoid content and physical qualities of tomatoes during post-harvest storage. *Food Chemistry*, 115, 495-500.

- Liu, C. Cai, L., Han, X., & Ying, T. (2011). Temporary effect of postharvest UV-C irradiation on gene expression profile in tomato fruit. *Gene*, 486, 56-64.
- Liu, C., Cai, L., Lu, X., Han, X., & Ying, T. (2012). Effect of postharvest UV-C irradiation on phenolic compound content and antioxidant activity of tomato fruit during storage. *Journal of Integrative Agriculture*, 11(1), 159-165.
- Locas, A., Demers, J., & Payment, P. (2008). Evaluation of photoreactivation of *Escherichia coli* and enterococci after UV disinfection of municipal wastewater. *Canadian Journal of Microbiology*, 54(11), 971-975.
- López-Rubira, V., Conseca, A., Allende, A., & Artés, F. (2005). Shelf life and overall quality of minimally processed pomegranate arils modified atmosphere packaged and treated with UV-C. *Postharvest Biology and Technology*, 37(2), 174-185.
- Maharaj, R., Arul, J., & Nadeau, P. (2010). UV-C Irradiation of tomato and its effects on color and pigments. *Advances in Environmental Biology*, 4(2), 308-315.
- Mahdavian, K., Ghorbanli, L., & Kalantari, K. M. (2008). The Effects of ultraviolet radiation on the contents of chlorophyll, flavonoid, anthocyanin and proline in *Capsicum annuum* L. *Turkish Journal of Botany*, 32, 25-33.
- Manzocco, L., Quarta, B., & Dri, A. (2009). Polyphenoloxidase inactivation by light exposure in model systems and apple derivatives. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 10, 506-511.
- Manzocco, L., Da Pieve, S., Bertolini, A., Bartolomeoli, I., Maifreni, M., Vianello, A., & Nicoli, M. C. (2011a). Surface decontamination of fresh-cut apple by UV-C light exposure: Effects on structure, colour and sensory properties. *Postharvest Biology and Technology*, 61, 165-171.
- Manzocco, L., Da Pieve, S., & Maifreni, N. (2011b). Impact of UV-C light on safety and quality of fresh-cut melón. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 12, 13-17.
- Marquenie, D., Geeraerd, A. H., Lammertyn, J., Soontjents, C., Van Impe, J. F., Michiels, C. W., & Nicolai, B. M. (2003a). 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, 185-196.
- Marquenie, D., Lammertyn J., Geeraerd A. H., Soontjents, C., Van Impe, J. F., Nicolai, B. M., & Michiels, C. W. (2002). Inactivation of conidia of *Botrytis cinerea* and *Monilinia fructigena* using UV-C and heat treatment. *International Journal of Food Microbiology*, 74, 27-35.

- Marquenie, D., Michiels, C. W., Van Impe, J. F., Schrevels, E., & Nicolai, B. N. (2003b). Pulsed white light in combination with UV-C and heat to reduce storage rot of strawberry. *Postharvest Biology and Technology*, 28, 455-561.
- Mercier, J., Baka, M., Reddy, B., Corcuff, R., & Arul, J. (2001). Shortwave ultraviolet irradiation for control of decay caused by *Botrytis cinerea* in bell pepper: induced resistance and germicidal effects. *Journal of American Society for Horticultural Science*, 126(1), 128-133.
- Michel-Aceves, A. C., Otero-Sánchez, M. A., Rebolledo-Domínguez, O., Lezama-Gutiérrez, R., & Ochoa-Moreno, M. G. (2005). Producción y efecto antagónico de quitinasas y glucanasas por *Trichoderma* spp. En la inhibición de *Fusarium subglutinans*, *Fusarium oxysporum*. *Revista Chapingo. Serie Horticultura*, 11(2), 273-278.
- Neves, F. I. G., Vieira, M. C., & Silva, C. L. M. (2012). Inactivation kinetics of peroxidase in zucchini (*Cucurbita pepo* L.) By heat and UV-C radiation. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 13, 158-162.
- Nigro, F., Ippolito, A., & Lima, G. (1998). Use of UV-C light to reduce Botrytis storage rot of table grapes. *Postharvest Biology and Technology*, 13, 171-181.
- Niles, R. M., mcfarland, M., Weimer, M. B., Redkar, A., & Fu, Y. (2003). Resveratrol is a potent inducer of apoptosis in human melanoma cells. *Cancer Letters*, 190, 157-163.
- Obande, M. A., & Shama, G. (2011). The use of biosimetry to measure the UV-C dose delivered to a sphere, and implications for the commercial treatment of fruit. *Journal of Food Engineering*, 104, 1-5.
- Obande, M. A., Tucker, G. A., & Shama, G. (2009). Effect of pre-harvest UV-C treatment of tomatoes (*Solanum lycopersicon* Mill.) On ripening and pathogen resistance. *Postharvest Biology and Technology*, 62, 188-192.
- Oms-Oliu, G., Soliva-Fortuny, R., & Martin-Belloso, O. (2008). Using polysaccharide-based coatings to enhance quality and antioxidant properties of fresh-cut melon. *LWT-Food Science and Technology*, 41, 1862-1870.
- Ortiz, A., Graell, J., & Lara, I. (2011). Preharvest calcium applications inhibit some cell wall-modifying enzyme activities and delay cell wall disassembly at commercial harvest of 'Fuji Kiku-8' apples. *Postharvest Biology and Technology*, 62, 161-167.
- Pala, C. U. & Toklucu, A. K. (2011). Effect of UVC-light on anthocyanin content and other quality parameters of pomegranate juice. *Journal of Food Composition and Analysis*, 24, 790-795.

- Pan, J., Vicente, A. R., Martínez, G. A., Chaves, A. R., & Civello, P. M. (2004). Combined use of UV-C irradiation and heat treatment to improve postharvest life of strawberry fruit. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84, 1831-1838.
- Passardi, F., Penel, C., & Dunand, C., (2004). Performing the paradoxical: How plant peroxidases modify the cell wall. *Trends in Plant Sciences*, 9, 534-540.
- Perkins-Veazie, P., Collins, J. K., & Howard, L. (2008). Blueberry fruit response to postharvest application of ultraviolet radiation. *Postharvest Biology and Technology*, 47, 280-285.
- Piga, A., d'hallewin, G., d'aquino, S., & Agabbio, M. (1997). Influence of film wrapping and UV irradiation on cactus pear quality after storage. *Packaging Technology and Science*, 10, 59-68.
- Pietta, P. (2000). Flavonoids as antioxidants. *Journal of Natural Products*, 63, 1035-1042.
- Pombo, M. A., Dotto, M. C., Martínez, G. A., & Civello, P. M. (2009). UV-C irradiation delays strawberry fruit softening and modifies the expression of genes involved in cell wall degradation. *Postharvest Biology and Technology*, 51, 141-148.
- Pombo, M. A., Rosli, G. H., Martínez, G.A., & Civello, P. M. (2011). UV-C treatment affects the expression and activity of defense genes in strawberry fruit (*Fragaria × ananassa*, Duch.). *Postharvest Biology and Technology*, 59, 94-102.
- Pongprasert, N., Sekosawa, Y., Sugaya, S., & Gemma, H. (2011). The role and mode of action of UV-C hormesis in reducing cellular oxidative stress and the consequential chilling injury of banana fruit peel. *International Food Research Journal*, 18, 721-729.
- Rahn, R. O. (1997). Potassium iodide as a chemical actinometer for 254 nm radiation: use of iodate as an electron scavenger. *Photochemistry and Photobiology*, 66, 450-455.
- Rai, R., Prasad, M. R., Suchi, S. S., Shukla, A., Kumar, R. S., & Pandey-Rai, S. (2011). UV-B and UV-C pre-treatments induce physiological changes and artemisinin biosynthesis in *Artemisia annua* L.-An antimalarial plant. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 105, 216-225.
- Rapussi, M. C. (2006). Efeito da quitosana e da radiação UV-C no controle de Guignardia citricarpa em laranja pós-colheita (Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2006). Dissertação internacional, 69, 83.
- Raybaudi-Massilia, R. M., Mosqueda-Melgar, J., Soliva-Fortuny, R., & Martín-Belloso, O. (2009). Control of pathogenic and spoilage microorganisms in fresh-cut fruits

- and fruit juices by traditional and alternative natural antimicrobials. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 8, 157-180.
- Rivera-Pastrana, D. M., Gardea, B. M., Martínez-Téllez, M. A., Rivera-Domínguez, M., & González-Aguilar, G. A. (2007). Efectos bioquímicos poscosecha de la irradiación UV-C en frutas y hortalizas. *Revista Fitotécnica Mexicana*, 30(4), 361-372.
- Rodríguez, A. S., Pérez-Gregorio, M. R., García-Falcón, M. S., Simal-Gándara, J., & Almeida, D. P. F. (2010). Effect of post-harvest practices on flavonoid content of red and white onion cultivars. *Food Control*, 21, 878-884.
- Rojas-Graü, M. A., Oms-Oliu, G., Soliva-Fortuny, R., & Martín-Belloso, O. (2009). The use of packaging techniques to maintain freshness in fresh-cut fruits and vegetables: a review. *International Journal of Food Science and Technology*, 44, 875-889.
- Ruiz, L. G. A., Qüesta, A. G., & Rodríguez, S. (2010). Efecto de la luz UV-C sobre las propiedades antioxidantes y calidad sensorial de repollo mínimamente procesado. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 11(1), 101-108.
- Salcedo, I., Andrade, J. A., Quiroga, J. M., & Nebot, E. (2007). Photoreactivation and dark repair in UV-treated microorganisms: Effect of temperature. *Applied and Environmental Microbiology*, 73(5), 1594-1600.
- Sgroppo, S. C., & Sosa, C. A. (2009). Zapallo anco (*Cucurbita moschata*, D.) Fresco cortado tratado con luz UV-C. *FACENA*, 25, 7-19.
- Shafiee, M., Taghavi, T. S., & Babalar, M. (2010). Addition of salicylic acid to nutrient solution combined with postharvest treatments (hot water, salicylic acid, and calcium dipping) improved postharvest fruit quality of strawberry. *Scientia Horticulturae*, 124, 40-45.
- Shama, G. & Alderson, P. (2005). UV hormesis in fruits: a concept ripe for commercialization. *Trends in Food Science and Technology*, 16, 128-136.
- Shama, G. (2007). Process challenges in applying low doses of ultraviolet light to fresh produce for eliciting beneficial hermetic responses. *Postharvest Biology and Technology*, 44, 1-8.
- Shin, J. A., Lee, H., Lim, Y., Koh, Y., Choi, J. H., & Park, E. (2010). Therapeutic effects of resveratrol during acute periods following experimental ischemic stroke. *Neuroimmunology*, 227, 93-100.
- Shin, Y., Jang, S., Song, H., & Song, K. B. (2011). Effects of combined fumaric acid-UV-C treatment and rapeseed protein-gelatin film packaging on the postharvest quality of

- ‘Seolhyang’ strawberries. *Food Science and Biotechnology*, 20(4), 1161-1165.
- Silva, M. M., Santos, M. R., Caroço, G., Rocha, R., Justino, G., & Mira, L. (2002). Structure-antioxidant activity relationships of flavonoids: a re-examination. *Free Radical Research*, 36(11), 1219-1227.
- Singh, P. & Goyal, G.K. (2008). Dietary lycopene: Its properties and anticarcinogenic effects. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 7, 255-270.
- Stevens, C., Wilson, C. L., Lu, J. Y., Khan, V. A., Chalutz, E., Droby, S.,... West, M. (1996). Plant hormesis induced by ultraviolet light-C for controlling postharvest diseases of tree fruits. *Crop Protection*, 15(2), 129-134.
- Stevens, C., Khan, V. A., Lu, J. Y., Wilson, C. L., Pusey, P. L., Kabwe, M. K.,... Droby, S. (1998a). The germicidal and hormetic effects of UV-C light on reducing brown rot disease and yeast microflora of peaches. *Crop Protection*, 17(1), 75-84.
- Stevens, C., Liu, J., Khan, V. A., Lu, J. Y., Wilson, C. L.,... Droby, S. (1998b). Application of hormetic UV-C for delayed ripening and reduction of *Rhizopus* Soft Rot in tomatoes: the effect of tomatine on storage rot development. *Journal of Phytopathology*, 146, 211-221.
- Stevens, C., Liu, J., Khan, V. A., Lu, J. Y., Kabwe, M. K., Wilson, C. L.,... Droby, S. (2004). The effects of low-dose ultraviolet light-C treatment on polygalacturonase activity, delay ripening and *Rhizopus* soft rot development of tomatoes. *Crop Protection*, 23, 551 -554.
- Tournas, V. H. & Katsoudas, E. (2005). Mould and yeast flora in fresh berries, grapes and citrus fruits. *International Journal of Food Microbiology*, 105, 11-17.
- Tsormpatsidis, E., Henbest, R. G. C., Davis, F. J., Battey, N. H., Hadley, P. & Wagstaffe, A. (2008). UV irradiance as a major influence of growth, development and secondary products of commercial importance in Lollo Rosso lettuce ‘Revolution’ grown under polyethylene films. *Environmental and Experimental Botany*, 63, 232-239.
- Wang, C. Y., Chen, C. & Wang, S. (2009). Changes of flavonoid content and antioxidant capacity in blueberries after illumination with UV-C. *Food Chemistry*, 117, 426-431.
- Yajima, H., Takao, M., Yasuhira, S., Zhao, J. H., Ichii, C., Inoue, H. & Yasui, A. (1995). A eukaryotic gene encoding an endonuclease that specifically repairs DNA damaged by ultraviolet light. *The EMBO Journal*, 14(10), 2393-2399.
- Yamamoto, A., Tanbir, N., Hirouchi, T., Teranishi, M., Hidema, J., Morioka, H. & Yamamoto, K. (2008). Temperature-sensitive photoreactivation of cyclobutane

thymine dimer in soybean. *Journal of Radiation Research*, 49(2), 189-196.

Yoruk, R. & Marshall, M. R., (2003). Physicochemical properties and function of plant polyphenol oxidase: a review. *Journal of Food Biochemistry*, 27, 361-422.

Referencia	Fecha de recepción	Fecha de aprobación
Juan Pablo Quintero-Ceron, Yanneth Bohorquez- Perez, Claudia Valenzuela-Real, José Fernando Solanilla-Duque. Avances en la aplicación de luz ultravioleta de onda corta (UVC) en frutas y vegetales enteros y mínimamente procesados: revisión. <i>Revista Tumbaga (2013), 8, 29-60</i>	Día/mes/año 23/10/2012	Día/mes/año 18/03/2013