

EFFECTOS BIOQUÍMICOS POSTCOSECHA DE LA IRRADIACIÓN UV-C EN FRUTAS Y HORTALIZAS

POSTHARVEST BIOCHEMICAL EFFECTS OF UV-C IRRADIATION ON FRUIT AND VEGETABLES

Dulce M. Rivera-Pastrana, Alfonso A. Gardea Béjar, Miguel A. Martínez-Téllez, Marisela Rivera-Domínguez y Gustavo A. González-Aguilar*

Coordinación de Tecnología de Alimentos de Origen Vegetal, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. (CIAD). Km. 0.6 Carr. A la Victoria, Apdo. Postal 1735. 83000, Hermosillo, Sonora, México. Tel. 01 (662) 289 2400 Ext. 272 Fax. 01 (662) 280-0055.

* Autor para correspondencia (gustavo@ciad.mx)

RESUMEN

The germicidal effect of UV-C irradiation has been proved in different foods as a non-thermal surface sanitation method that does not leave residues on the product and it is considered a good alternative for food preservation. UV-C irradiation at low doses has been successfully used for sanitation of fresh fruits and vegetables. Some of the beneficial effects attributed to UV-C are the defense mechanisms induced (phytoalexins), which have been positively correlated with resistance against several pathogens and reduction of physiological disorders occurring during cold storage of fruits and vegetables. Another advantage of applying UV-C is the capability to improve nutraceutical properties, due to an increase of bioactive compounds with antioxidant capacity. Moreover, due to inactivation of related enzymes, a delay of deterioration processes, ripening and senescence are some of the benefits of this technology. Its low cost and easy application makes UV-C a good alternative for fresh produce preservation. This review remarks the beneficial effects of UV-C irradiation on fruits and vegetables reducing physiological disorders during cold storage and nutritional properties of fresh produce.

Index words: Hormesis, phytoalexins, bioactive compounds, fruit preservation, mode of action.

RESUMEN

El efecto germicida de la irradiación UV-C se ha empleado diferentes alimentos como un método de desinfección superficial a temperatura ambiente que no deja residuos en el producto, por lo que se considera una buena alternativa para la conservación de alimentos. Su utilización a dosis bajas ha tenido éxito en la desinfección de frutas y hortalizas. Algunos efectos benéficos atribuidos a la irradiación UV-C son: inducción de mecanismos de defensa (síntesis de fitoalexinas), los cuales se relacionan positivamente con la resistencia a diferentes patógenos y con la reducción de desórdenes fisiológicos que ocurren durante el almacenamiento en frío; capacidad de mejorar las propiedades nutraceuticas, debido al incremento en los niveles de compuestos bioactivos con capacidad antioxidante; e inactivación

de enzimas relacionadas con los procesos de maduración y senescencia. Por su bajo costo y fácil aplicación, la irradiación UV-C es una buena alternativa para la conservación de frutas y hortalizas. En esta revisión se describen los efectos benéficos de la aplicación de irradiación UV-C en frutas y hortalizas, en reducir desórdenes fisiológicos durante el almacenamiento en frío y en las propiedades nutricionales del producto fresco.

Palabras clave: Hormesis, fitoalexinas, compuestos bioactivos, conservación de frutas, modo de acción.

INTRODUCCIÓN

El alto carácter perecedero de las frutas y hortalizas, aunado al mal manejo postcosecha y uso de tecnologías de acondicionamiento y almacenamiento inadecuadas, se traduce en elevadas pérdidas de la calidad durante su comercialización y distribución en los mercados. Sin embargo, en los últimos años se han venido desarrollando diferentes tecnologías postcosecha, que en conjunto con programas de buenas prácticas de manejo del producto, permiten reducir las pérdidas por ataque de fitopatógenos, alteraciones fisiológicas y daños mecánicos, entre otros, además de mantener una aceptable calidad.

El uso de tratamientos con fungicidas para el control del ataque de microorganismos durante la postcosecha, se ha visto restringido por los residuos que dejan en el producto y que pueden afectar la salud del consumidor. En general, los tratamientos térmicos favorecen el control de los microorganismos, pero causan cambios en la calidad visual y sensorial del producto con pérdidas de color, firmeza y aumento de algunos compuestos bioactivos (fenoles, flavonoides, fitoalexinas y otros) (Shama, 2007). Por

ello se han hecho esfuerzos para desarrollar tecnologías emergentes que utilizan sustancias antifúngicas antagonistas de origen natural y tratamientos suaves que activen los mecanismos de defensa del producto, y al mismo tiempo obtener un efecto benéfico en la calidad del producto (Shama y Alderson, 2005). Entre estos tratamientos la irradiación ultravioleta (UV) tipo C (UV-C) puede ser considerada como una nueva tecnología para prolongar la vida postcosecha de frutas y hortalizas enteras y cortadas.

El objetivo de este trabajo fue realizar una revisión de los avances sobre los efectos benéficos de la irradiación UV-C en el control del deterioro y mantenimiento de la calidad de frutas y hortalizas, mediante la inducción de respuestas bioquímicas del tejido que pueden proporcionar un efecto coadyuvante al control de fitopatógenos.

IRRADIACIÓN UV-C

La luz ultravioleta es una radiación no ionizante con una longitud de onda de 100 a 400 nm; se clasifica en tres tipos: UV-A (315-400 nm), UV-B (280-315 nm) y UV-C (200-280 nm) (Figura 1). La irradiación UV-C tiene su máximo pico de emisión a 254 nm y se ha comprobado que es en esta longitud de onda donde presenta su mayor acción germicida, por lo que ha sido ampliamente estudiada en varios tejidos vegetales (Artés y Allende, 2005).

En función de la intensidad y longitud de onda, la irradiación UV puede inducir un estrés biológico en plantas y activar algunos mecanismos de defensa de los tejidos vegetales, con la consecuente producción de fitoalexinas (Mercier, 1993b). La acumulación de estos compuestos podría estar acompañada por otros sistemas de defensa inducidos, tales como modificación de las paredes celulares, síntesis de enzimas de defensa e incluso la muerte celular.

Por las ventajas que presenta este tipo de irradiación, se ha considerado como un tratamiento alternativo para preservar la calidad de frutas y hortalizas (Maharaj *et al.*,

1999; Allende y Artés, 2003a; González-Aguilar *et al.*, 2005). El tiempo de aplicación de UV-C oscila entre 1 y 5 min, periodo que no incrementa significativamente la temperatura del tejido (1-3 °C), ni produce alteraciones o favorece los procesos deteriorativos del producto. Una ventaja es que no deja residuos y no afecta las características sensoriales (sabor y aroma) del producto. Pero la sensibilidad de los tejidos al tratamiento con UV-C difiere en función del genotipo, y en ocasiones las dosis altas pueden favorecer la oxidación de compuestos bioactivos del fruto, como vitamina C, carotenos y fenoles, así como el oscurecimiento superficial del tejido (González-Aguilar *et al.*, 2001, 2006).

EFFECTO HÓRMICO DE LA UV-C

Se han propuesto varias definiciones para el término hormesis. Según Calabrese y Baldwin (2002), hormesis es una respuesta adaptativa con características diferenciables por la relación dosis-respuesta, que es inducida por un proceso de acción directa o de sobre-estimulación a dosis bajas. En plantas equivale al efecto de la aplicación de dosis bajas de un tratamiento biótico o abiótico potencialmente dañino, que induce respuestas positivas o negativas en los tejidos contra varios tipos de estrés (Shama y Alderson, 2005). Hay evidencias del efecto positivo del tratamiento de UV-C en aumentar las propiedades nutraceuticas de los alimentos y la síntesis de compuestos que actúan con los mecanismos de defensa natural de los vegetales expuestos a estrés (Cisneros-Zevallos, 2003). La exposición de los tejidos a dosis bajas de irradiación UV puede inducir la producción de compuestos fungicidas como fitoalexinas, y retrasar procesos de maduración y senescencia. En el sector hortícola eso permite reducir las pérdidas postcosecha ocasionadas por desórdenes fisiológicos, como daño por frío, susceptibilidad al ataque de fitopatógenos, daños mecánicos, pérdida de firmeza y otros (Luckey, 1991).

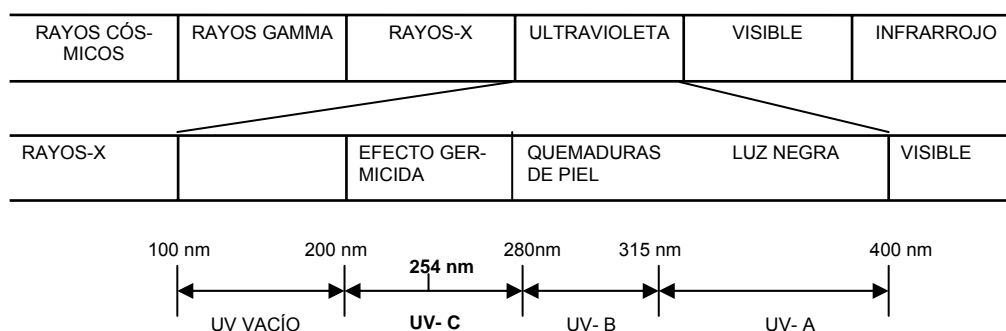


Figura 1. Espectro electromagnético (modificado de Snowball y Hornsey, 1988).

propuso que dosis bajas de irradiación UV pueden causar daño reversible al ADN al activar mecanismos de reparación inducidos por radiación, lo que sugiere que estas dosis estimulan procesos celulares y crean un cambio positivo en la homeostasis de la planta.

La irradiación UV-C se ha estudiado como un tratamiento alternativo reciente para la preservación de frutas y hortalizas (Maharaj *et al.*, 1999; Allende y Artés, 2003a; Yaun *et al.*, 2004), en frutos de fresa (*Fragaria vesca* Coville), manzana (*Pyrus malus* Borkh), mango (*Mangifera indica* L.), chabacano (*Prunus armeniaca* Blanco), durazno (*Prunus persica* L.), nectarina (*Prunus persica* L.), limón (*Citrus limon* L.), uva de mesa (*Vitis vinifera* L.), tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) y otros; también en hortalizas como cebolla (*Allium cepa* L.), zanahoria (*Daucus carota* L.) y otros (Ben-Yehoshua *et al.*, 1992; Liu *et al.*, 1993; Mercier *et al.*, 1993b; Nigro *et al.*, 1998, 2000; Maharaj *et al.*, 1999; Stevens *et al.*, 1999; González-Aguilar *et al.*, 2001, 2004, 2005; Marquenie *et al.*, 2002).

INACTIVACIÓN DE MICROORGANISMOS POR UV-C

La irradiación UV-C se utiliza como alternativa para la esterilización química, porque reduce el crecimiento de microorganismos en superficies inertes y en frutos. (Stevens *et al.*, 1998a y b). El componente UV de la luz solar es la causa principal de muerte de microorganismos en el ambiente exterior, donde la velocidad de mortalidad varía entre patógenos, dosis aplicadas y tiempos de exposición; el tiempo puede variar de unos segundos a minutos para producir la muerte de 90 a 99 % de virus o bacterias. Algunas bacterias ambientales y esporas suelen ser más resistentes y sobrevivir a exposiciones mayores. El Cuadro 1 muestra las dosis mínimas y máximas de inactivación de algunos microorganismos.

Cuadro 1. Dosis mínimas y máximas requeridas para inhibir en 100 % a diferentes microorganismos (adaptado de Guerrero-Beltrán y Barbosa-Cánovas, 2004).

Microorganismo	Intervalo germicida	
	Dosis mínima (10 ³ kgf s ⁻²)	Dosis máxima (10 ³ kgf s ⁻²)
Alga	0.220	4.200
Bacteria (vegetativo)	0.025	0.264
Bacteria (esporas)	0.220	0.462
Hongos	0.110	3.300
Virus	0.045	4.400
Levaduras	0.066	0.176

El mecanismo directo de acción de la irradiación UV-C en la inactivación microbiana reside en el daño que causa al ADN y generar así mutaciones que bloquean la replica-

ción celular, la cual si no es reparada conduce a la muerte celular (Snowball y Hornsey, 1988). La irradiación UV-C también actúa de manera indirecta al inducir mecanismos de resistencia por acumulación de compuestos fungicidas como fenoles, flavonoides y poliaminas (Nigro *et al.*, 1998; Erkan *et al.*, 2001; González-Aguilar, 2005).

La aplicación de la irradiación UV-C en frutas y hortalizas ha resultado un sistema efectivo para prolongar la vida útil de estos productos por ser letal para la mayoría de microorganismos. Baka *et al.* (1999) la aplicaron en frutos de fresa para controlar la pudrición causada por *Botrytis cinerea* y encontraron que dosis de 0.25 x 10³ kgf s⁻² resulta efectiva a temperaturas de almacenamiento de 4 a 13 °C y aumenta la vida de anaquel del fruto de 4 a 5 d. Stevens *et al.* (1997) señalaron que el tratamiento con UV-C fue efectivo para contrarrestar la pudrición causada por *Monilinia fructicola* en durazno, el deterioro por ataque de *Penicillium digitatum* en mandarina (*Citrus reticulata* Blanco) y la pudrición causada por *Rhizopus stolonifer* en tomate durante el almacenamiento. Una dosis de UV-C de 0.024 kgf s⁻² por 4 min aplicada al melón (*Cucumis melo* L.) mínimamente procesado antes y durante el corte, fue efectiva en reducir las poblaciones de levaduras, hongos y *Pseudomonas spp.* durante el almacenamiento a 10 °C; las poblaciones de microorganismos mesófilos aerobios y bacterias lácticas se redujeron sólo cuando la UV-C se aplicó durante el procesamiento (Lamikanra *et al.*, 2005).

En cambio, al evaluar varias dosis de irradiación UV-C sobre el crecimiento de microorganismos mesófilos, psicrófilos, enterobacterias, bacterias ácido-lácticas y levaduras, López-Rubira *et al.* (2005), no encontraron una respuesta clara. Por el contrario, Erkan *et al.* (2001) encontraron una reducción significativa en la población microbiana de rebanadas de calabaza después de ser tratadas con UV-C en dosis de 4.93 y 9.86 x 10³ kgf s⁻². Allende y Artés (2003a, b) también encontraron que dosis de 0.4, 0.81, 2.44, 4.07 y 8.14 x 10³ kgf s⁻² redujeron la cuenta de bacterias psicotróficas, coliformes y levaduras en lechuga (*Lactuca sativa* L.) mínimamente procesada. Marquenie *et al.* (2002) reportaron un retraso en el crecimiento fúngico (*Botrytis cinerea* y *Monilinia fructigena*) en fresa a la que se aplicó una dosis de 5 kgf s⁻² de UV-C.

Con 7.5 x 10³ kgf s⁻² de irradiación UV-C aplicada en tomate en dos etapas de maduración, se redujo el deterioro causado por *Erwinia spp.*, en frutos inoculados a diferentes tiempos durante el almacenamiento. Los frutos de tomate tratados con dosis de 3.6 y 4.8 x 10³ kgf s⁻² retrasaron en 35 % el cambio de color verde a rojo maduro, reportado como el porcentaje de frutos que alcanzaron la madurez (100 % rojo) en comparación con el obtenido con otras dosis administradas (45-100 %) (Liu *et al.*, 1993), por lo

que los autores propusieron que la reducción del deterioro es un efecto secundario del retraso en el proceso de maduración, al provocar un aumento de sustancias inhibidoras de patógenos deteriorativos durante el almacenamiento.

Al evaluar dosis de irradiación UV-C para inhibir el crecimiento de *Salmonella spp.* y *Escherichia coli* O157:H7, en muestras de manzana 'Red Delicious', lechuga de hoja verde y frutos de tomate, en un rango de $0.55-8.64 \times 10^3 \text{ kgf s}^{-2}$, Yaun *et al.*, (2004) encontraron que la dosis máxima ($8.64 \times 10^3 \text{ kgf s}^{-2}$) aplicada en manzana redujo el crecimiento de *E. coli* O157:H7 en 3.3 unidades de logaritmo, mientras que esta misma dosis en tomate inoculado con *Salmonella spp.* y lechuga inoculada con *Salmonella spp.* y *E. coli* O157:H7, sólo dio una reducción de 2.19, 2.65 y 2.79 unidades log, respectivamente. En cubos frescos cortados de sandía (*Citrulus lanatus* Schard cvs. 'Matsum' y 'Nakai') expuestos a UV-C antes de ser empacados, se encontró que una dosis de $4.2 \times 10^3 \text{ kgf s}^{-2}$ resulta óptima para reducir de 1 a 1.5 unidades log el conteo bacteriano (Fonseca y Rushing, 2006). Sin embargo, la reducción del crecimiento bacteriano por el tratamiento de UV-C es efectiva únicamente cuando se lleva a cabo un control estricto de las prácticas de seguridad e higiene. Esta disminución en la cuenta microbiana puede ser resultado de la acción directa de la UV-C sobre algunas bacterias y, además, puede generar una respuesta antiestrés en la superficie de sandía fresca cortada (Fonseca y Rushing, 2006).

La mayoría de reportes sugieren que la matriz (composición química y ordenamiento estructural) propia del alimento, juega un papel importante en el daño causado por la irradiación UV-C en el ADN de los microorganismos, ya que dosis similares de UV-C tienen efectos diferentes en el crecimiento de una misma especie microbiana (Shama *et al.*, 2005). Por ello resulta relevante la evaluación de esta tecnología en cada producto en particular y así poder definir las condiciones óptimas de aplicación y los posibles cambios en calidad.

RETRASO DE MADURACIÓN Y SENESCENCIA

Uno de los principales propósitos de las tecnologías aplicadas en postcosecha para la conservación de frutas y hortalizas, es el retraso de la maduración y senescencia; dicho retraso se encuentra bajo el control de reguladores del crecimiento entre los que el etileno y las poliaminas tienen un papel esencial. Ambos compuestos comparten un precursor común en su ruta de síntesis, y ésta se estimula en respuesta a algún tipo de estrés ambiental, como la irradiación UV-C, o en una etapa específica del desarrollo

del fruto (Kaur-Sawhney *et al.*, 2003; Shama *et al.*, 2005).

Lu *et al.* (1991) reportaron que el tratamiento de UV-C en frutos de manzana y durazno retrasa el proceso de maduración, retraso que sugieren está íntimamente relacionado a una mayor resistencia al deterioro. Los frutos de tomate tratados con dosis de 3.6 y $4.8 \times 10^3 \text{ kgf s}^{-2}$ presentaron cambios menores en el color externo (de verde a rojo) que con otras dosis administradas (Liu *et al.*, 1993). De acuerdo con Barka *et al.* (2000b), hay cambios en firmeza y maduración de tomates por reducción en la actividad de enzimas de degradación de la pared celular, como: poligalacturonasa (EC 3.2.1.15), pectin metilesterasa (EC 3.1.1.11), celulasa (EC 3.2.1.4), xilanasa (EC 3.2.1.8) y β -D-galactosidasa (EC 3.2.1.23), con una dosis baja de irradiación UV-C ($3.7 \times 10^3 \text{ kgf s}^{-2}$). Según Barka *et al.* (2000b), la exposición a UV-C reduce la degradación enzimática de la pared celular (DEPC), por lo que estas enzimas pueden ser blanco de la irradiación UV-C para inducir proteólisis o disminuir su síntesis *de novo*, lo que explica el retraso en el proceso de maduración y senescencia ocasionado por la dosis hórmica de UV-C. La exposición a UV-C reduce la pérdida de firmeza en frutos de fresa; un factor determinante de la vida postcosecha de éste y otros frutos está relacionado con una baja conductividad de la membrana, lo que indica un estado de senescencia menos avanzado (Baka *et al.*, 1999).

La actividad antisenescente de las poliaminas radica en su alta capacidad para secuestrar radicales libres. Maharaj *et al.* (1999) sostienen que las poliaminas suprimen la degradación de la pared celular y la actividad de la poligalacturonasa en tomate, y al parecer mediante un mecanismo similar al del calcio, al involucrar la formación de enlaces catiónicos cruzados con ácido péctico y otros polisacáridos. Trozos de melón procesados bajo irradiación UV-C retienen mejor la firmeza que los frutos testigos y tratados después del corte, al parecer por un mecanismo similar al encontrado en tomate, y relacionado con la inactivación de enzimas de degradación de pared celular (Lamikanra *et al.*, 2005). Stevens *et al.* (1998b) atribuyeron el retraso de la maduración de tomate tratado con UV-C a los altos niveles de putrecina y espermina encontrados en el tejido; al mismo tiempo observaron un aumento en el alcaloide tomatina en el fruto después de 72 h del tratamiento, que correlacionó con la tolerancia a *Rhizopus stolonifer*.

INDUCCIÓN DE OTRAS RESPUESTAS BIOQUÍMICAS

El tratamiento postcosecha de irradiación UV-C en productos hortícolas frescos, puede inducir diferentes respuestas bioquímicas entre genotipos, etapas de

maduración, dosis del tratamiento y condiciones de almacenamiento. En mango fresco cortado, las aplicaciones de 1 y 3 min de irradiación UV-C fueron efectivas en disminuir el índice de oscurecimiento y la actividad de polifenoloxidasas (EC 1.10.3.1), mientras que las dosis altas incrementaron ambos efectos; los tiempos de 3 y 5 min resultaron óptimos para reducir el crecimiento microbiano, y para mantener la calidad del fruto durante 14 d en almacenamiento a 5 °C (González-Aguilar *et al.*, 2006).

El tratamiento de racimos de brócoli (*Brassica oleracea* L.) con luz UV-C (4, 7, 10 ó 14 x 10³ kgf s⁻²) retrasó la degradación de clorofila a 20 °C (Costa *et al.*, 2006); la dosis de 1 x 10⁴ kgf s⁻² permitió retener mayores niveles de clorofila pero resultó en menor contenido de feofitinas comparado con otras dosis, con excepción de la de 7 x 10³ kgf s⁻². Durante el almacenamiento, el tratamiento con 1 x 10⁴ kgf s⁻² de UV-C a 20 °C ocasionó retrasos en la aparición de color amarillo y de la degradación de clorofilas a y b, e incrementó el contenido de feofitinas. La actividad de la enzima clorofilasa (EC. 3.1.1.14) disminuyó con la aplicación de irradiación UV-C, mientras que la actividad de Mg-dequelatasa (EC. 6.6.1.1) aumentó inmediatamente después del tratamiento, aunque después de 4 a 6 h la actividad fue menor que la de los controles. El brócoli tratado con UV-C (1 x 10⁴ kgf s⁻²) a 20 °C presentó una tasa de respiración baja y una capacidad antioxidante mayor, respuestas que son benéficas (Costa *et al.*, 2006). González-Aguilar *et al.* (2004) encontraron que el tratamiento de UV-C en duraznos aumentó la síntesis de etileno y poliaminas, los cuales se relacionaron con un menor deterioro y

síntomas de daño por frío durante el almacenamiento a 5 °C.

EFFECTOS SOBRE EL METABOLISMO DE COMPUESTOS FENÓLICOS

El tratamiento de UV-C ha estimulado la síntesis de la enzima fenilalanina amonio-liasa (EC 4.3.1.5) (PAL), que es clave en la síntesis de fenilpropanoides, y dado lugar a la formación de fenoles, fitoalexinas y ligninas con capacidad antifúngica (Figura 2) (Ryalls *et al.*, 1996). Otro ejemplo de la activación de esta ruta es la biosíntesis de quercetinas (flavonoles), que se ve estimulada por la irradiación UV-B en el pericarpio de manzana cv. ‘Jonathan’ y se presenta una correlación positiva entre la síntesis de antocianinas y quercetina, lo cual sugiere que el metabolismo de ambas sustancias es un proceso foto-dependiente (Bakhshi y Arakawa, 2006; Arakawa, 1988).

La aplicación de UV-C en duraznos aumenta la síntesis de fenilalanina amonio-liasa y disminuye la síntesis de etileno, lo cual prolonga la vida de anaquel del fruto al retrasar la maduración (Stevens *et al.*, 1997,1998a). También Ryalls *et al.* (1996) reportaron un incremento en la síntesis de las fitoalexinas escoporona y escopoletina en naranja (*Citrus sinensis* Osbeck) y otros cítricos, en respuesta al tratamiento con UV-C, y con esto aumentó la resistencia del fruto a diversos patógenos (D’Hallewin *et al.*, 2000; Ben-Yehoshua *et al.*, 1992).

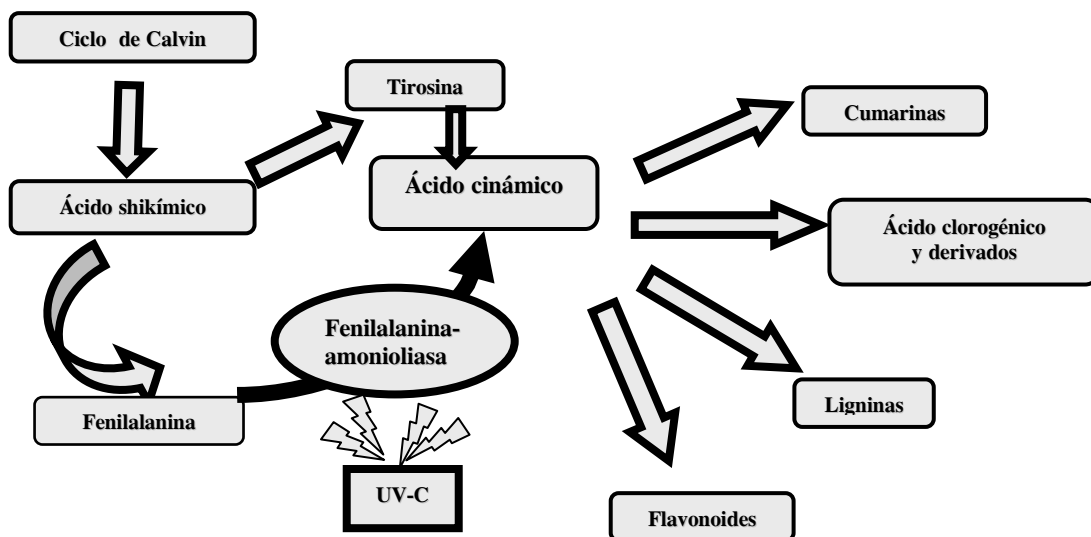


Figura 2. Activación de la síntesis de fenilpropanoides por efecto de la irradiación UV-C modificado de (Lea y Leegood, 1999).

La irradiación UV-C resulta efectiva para inducir la acumulación de la fitoalexina 6-metoximeleina en rebanadas de zanahoria, a una dosis óptima de 2.2 kgf s⁻² y una temperatura de almacenamiento de 20 °C. Los niveles máximos se alcanzan después de 72 h y posteriormente se degrada el compuesto acumulado, mientras que a bajas temperaturas (1-4 °C) la acumulación de 6-metoximeleina es más lenta, y alcanza niveles más altos y estables a los 35 d (Mercier *et al.*, 1993a). Contradictoriamente, la aplicación de UV-C y calor en frutos de fresa, no afectó de manera significativa el contenido de sólidos solubles totales ni la acidez titulable, pero disminuyó la síntesis de compuestos fenólicos en los frutos (Pan *et al.*, 2004).

En uva de mesa cv. 'Superior', el tratamiento postcosecha de UV-C incrementó los niveles de estilbenos, específicamente de resveratrol-trans, compuesto de importancia para la salud cardiovascular. Sin embargo, si el tratamiento es muy severo puede tener como consecuencia el oscurecimiento del fruto durante el almacenamiento (González-Barrio *et al.*, 2005).

La acción del corte bajo luz UV-C en melón induce una respuesta antioxidante porque aumenta la acumulación de la enzima ascorbato peroxidasa (EC.1.11.1.11) (Lamikanra *et al.*, 2005). El procesamiento del fruto de melón bajo luz ultravioleta parece reducir la actividad de la enzima esterasa en el fruto cortado y la mantiene en niveles bajos durante el almacenamiento, donde la esterasa predominante es la carboxilesterasa o β-esterasa (EC 3.1.1.1) cuya actividad se cree está regulada por metaloproteasas, específicamente por la metal-exoproteasa (EC. 3.3.2). La degradación de ésteres por acción de la esterasa puede ser una respuesta de adaptación al daño o corte de los tejidos del fruto. Sin embargo, la degradación de ésteres aunada a la producción de fitoalexinas, parece ser uno de los pasos importantes en la pérdida de la apariencia de fresca durante el almacenamiento de algunos frutos frescos cortados. Puesto que la mayoría de los compuestos volátiles responsables del aroma de los frutos son ésteres, la inactivación de la esterasa en frutos mínimamente procesados bajo UV-C retrasará la pérdida de aroma en el producto, para así mantener la calidad organoléptica del fruto fresco (Lamikanra *et al.*, 2005).

Recientemente se ha hecho énfasis en el uso del tratamiento de UV-C en uvas, debido al aumento de compuestos bioactivos y antifúngicos. Según Nigro *et al.* (1998), el tratamiento de UV-C produjo un claro efecto protector contra *Botrytis cinerea*, el cual se atribuyó a la inducción de las enzimas PAL y peroxidasa (EC. 1.11.1.7), y a la inducción de fitoalexinas, principalmente al compuesto resveratrol (3, 5,4' trihidroxiestilbeno). En los Cuadros 2, 3 y 4 se presentan los efectos causados por el tratamiento de

UV-C en diferentes frutos de clima templado, tropical y subtropical, además de algunas hortalizas, así como las dosis óptimas probadas para cada uno.

González-Aguilar *et al.* (2006) observaron una disminución significativa en el deterioro causado por *Penicillium* en mangos frescos cortados y un aumento en los niveles de fenoles totales y flavonoides en el tejido, después del tratamiento con UV-C. En otro estudio con mango entero, González-Aguilar *et al.* (2007b) reportaron un aumento en la actividad de PAL y en los contenidos de fenoles y flavonoides totales, como resultado de la exposición a la irradiación UV-C a dosis de 0.25 y 0.5 kgf s⁻², atribuible a la activación de una respuesta de defensa antiestrés.

CAMBIOS EN MEMBRANA Y PARED CELULAR

La pared y membrana celular son organelos blanco de la irradiación UV-C, ya que los componentes de membrana (fosfolípidos y glicolípidos) y de pared (proteínas y ligninas), absorben energía en el rango ultravioleta; al mismo tiempo la UV-C genera especies reactivas de oxígeno que causan estrés oxidativo que afecta la estabilidad de la pared y de la membrana celular. Una respuesta de defensa a este efecto involucra el aumento o activación de compuestos antioxidantes y la inactivación de enzimas en algunos sistemas vegetales (Foyer *et al.*, 1994). Barka *et al.* (2000a) encontraron dos etapas de respuesta a los cambios en la peroxidación de marcadores lipídicos de membrana, en tomates expuestos a tratamiento con UV-C a una dosis hórmica de 3.7 x 10³ kgf s⁻²; durante los primeros 5 d de almacenamiento seguidos al tratamiento, observaron una inducción de marcadores lipídicos de peroxidación (compuestos como lipofuscina, malondialdehído, aldehídos, pentano, etano, peróxido de hidrógeno, y flujo de electrolitos como potasio y calcio). Se postula que la inducción se debe a que la membrana celular es el primer blanco de la irradiación UV-C. Una segunda fase ocurre a los 5 d de almacenamiento, donde los niveles de estos marcadores se encuentran por abajo de los de frutos testigo, por efecto de inducción de un mecanismo de reparación o de defensa. Los cambios en la peroxidación lipídica durante esta fase, al parecer son efecto de los procesos de maduración o senescencia del fruto, más que del tratamiento de UV-C. Esto sugiere que en una primera fase el incremento rápido de especies reactivas de oxígeno después de la irradiación puede activar uno o más mecanismos antioxidantes y desintoxicantes, lo cual incrementa la actividad de enzimas peroxidases (Barka *et al.*, 2000b).

Cuadro 2. Efectos del tratamiento de UV-C en frutos de clima templado.

Especie (variedad)	Dosis (10 ³ kgf s ⁻²)	Efecto	Mecanismo de acción	Referencia
Durazno (‘Elberta, Loring’)	7.5	Protección contra <i>Monilinia fructicola</i>	Mejor protección lograda con UV-C en combinación con CaCl ₂ y <i>Debaromyces hansenii</i> .	Stevens <i>et al.</i> (1997)
Durazno (‘Jefferson’)	0.41-2.46	Reducción de síntomas de daño por frío y aumento de vida de almacenamiento.	Aumento en los niveles de poliaminas en el epicarpio, como respuesta de defensa.	González-Aguilar <i>et al.</i> (2004)
Durazno (‘Elberta’)	0.84-40 (óptimo 7.5)	Protección contra <i>M. fructicola</i> . Retrasa maduración.	Suprime síntesis de etileno, aumenta actividad de enzima fenilalanina amonioliasa e incrementa el número de levaduras antagonistas <i>Debaromyces hansenii</i> en la superficie del fruto.	Stevens <i>et al.</i> (1998)
Fresa (‘Kent’)	0.25-1.0	Resistencia a <i>B. cinerea</i> .	Los frutos tratados con la dosis más baja mostraron menor tasa de senescencia, y extendieron la vida útil en 4-5 días.	Baka <i>et al.</i> (1999)
Fresa (‘Elsanta’)	0.5-15	Resistencia a <i>B. cinerea</i> y <i>Monilinia fructigena</i> .	Redujo el desarrollo fúngico en todas las dosis. La combinación de UV-C y bajas temperaturas permite la aplicación efectiva de dosis más bajas.	Marquenie <i>et al.</i> (2002)
Manzana (‘Red Delicious’)	7.5	Defensa contra deterioro por <i>P. expansum</i>	La aplicación temprana (96 h previas a la inoculación del patógeno) enciende mecanismos de defensa y prepara a fruto para contrarrestar la infección.	De Capdeville <i>et al.</i> (2002)
Pera (‘Gialla’)	0.75	No tiene efecto contra el deterioro. Causa daño en dermis del fruto.		Piga <i>et al.</i> (1997)
Cereza (varios cultivos)	0.5-15.0	No presenta efecto sobre desarrollo de <i>Botrytis cinerea</i> y <i>Monilinia fructigena</i>		Marquenie <i>et al.</i> (2002)
Uva (‘Italia’)	0.125-4.0	Disminuye incidencia de deterioro por <i>B. cinerea</i> .	La irradiación previa (24-48 h) a la inoculación disminuye la aparición del hongo; a dosis mayores de 1 (10 ³ kgf s ⁻²) induce decoloración de piel.	Nigro <i>et al.</i> (1998)

Cuadro 3. Efectos del tratamiento de UV-C en frutos tropicales y subtropicales.

Especie (variedad)	Dosis (10^3 kgf s^{-2})	Efecto	Mecanismo de acción	Referencia
Limón (‘Eureka’)	0-15	Reduce deterioro por <i>P. digitatum</i> . Incrementa niveles de escoporona.	La reducción de deterioro sólo se presenta si la inoculación del patógeno es aplicada al menos 24 h antes de la UV-C.	Ben-Yehoshua <i>et al.</i> (1992)
Mango (‘Tommy Atkins’)	4.9 y 9.9	Incrementa resistencia a deterioro. Mejor apariencia y textura comparada con testigos no tratados.	Inducción de espermidina y putrescina. La dosis mayor induce senescencia.	González-Aguilar <i>et al.</i> (2001)
Mango (‘Haden’)	2.46-4.93	Aumenta contenido fenoles y flavonoides totales y aumenta actividad enzimática de LOX.	Respuesta de defensa contra estrés oxidativo y activación de enzima PAL.	González-Aguilar <i>et al.</i> (2007)
Naranja (‘Biondo Comune’, ‘Washington Navel’, ‘Tarocco’, ‘Valencia’ ‘Late’)	0.5-3.0	Reduce deterioro.	Dosis de $0.5 \times 10^3 \text{ kgf s}^{-2}$ fue efectiva en la reducción de deterioro. Dosis mayores ($1.5 \times 10^3 \text{ kgf s}^{-2}$) aumentaron este efecto sólo en frutos recién cosechados. Incremento de escoporona y escopoletina en todas las variedades, proporcional a la dosis suministrada.	D’ Hallewin <i>et al.</i> (1999)
Naranja (‘Shamouti,’ ‘Valencia’)	0.2-15	Resistencia a <i>P. digitatum</i> .	Incremento en niveles de escoporona después de la irradiación UV, en todas las dosis probadas.	Rodov <i>et al.</i> (1992)
Kumkuat (‘Nagami’)	0.2-15	Aumenta niveles de escoporona. Disminuye deterioro.	Aumenta síntesis de escoporona en todas las dosis de UV-C, y no se presenta signos de deterioro por <i>P. digitatum</i> después de dos semanas de almacenamiento a bajas temperaturas.	Rodov <i>et al.</i> (1992)
Toronja (‘Star Ruby’)	0.5-3.0	Retraso de deterioro y aumento en síntesis de escoporona y escopoletina.	Dosis mayores de $1.5 (10^3 \text{ kgf s}^{-2})$ causan pardeamiento y necrosis del tejido irradiado.	D’ Hallewin <i>et al.</i> (2000)
Mandarina (‘Dancy’)	1.3	Inactivación de <i>P. digitatum</i> .	Mayor efectividad del tratamiento en combinación con CaCl_2 y <i>Debaromyces hansenii</i> .	Kinay <i>et al.</i> (2005)

Cuadro 4. Efectos del tratamiento de UV-C en hortalizas.

Especie (variedad)	Dosis (10^3 kgf s^{-2})	Efecto	Mecanismo de acción	Referencia
Brócoli (‘Cicco’)	10	Retrasa degradación de clorofila y aumenta capacidad antioxidante.	Disminuye la actividad de enzimas peroxidasas, aumenta actividad de clorofila en almacenamiento. No hay un efecto directo de UV-C en las moléculas de clorofila y la acumulación de feofitinas, posiblemente a través de un mecanismo bioquímico que depende de muchos factores.	Costa <i>et al.</i> (2006)
Champiñón (‘A. bisporus’ y ‘A. bitorquis’)	0.295-1.47 ($\times 10^{-3}$)	Aumenta la síntesis de vitamina D2.	Se activa un mecanismo antioxidante en respuesta a UV-C, que induce la síntesis de ergosterol.	Mau <i>et al.</i> (1998)
Chile (‘Bell Boy’, ‘Delphin’)	0.22-2-20 (0.88 óptimo para <i>B. cinerea</i>)	Resistencia a infecciones naturales y <i>B. cinerea</i> .	Todas las dosis protegen contra infecciones naturales, mientras que para <i>B. cinerea</i> sólo hay protección si se inocula artificialmente después de la irradiación, no antes.	Mercier <i>et al.</i> (2001)
Tomate (‘Tuskegee 80-130’, ‘Floradade’, ‘Better Boy’)	1.3-40	Protección contra <i>Alternaria alternata</i> , <i>Botrytis cinerea</i> , <i>Rhizopus stolonifer</i> .	Dosis de 3.6 y $4.8 \times 10^3 \text{ kgf s}^{-2}$ retrasan maduración.	Liu <i>et al.</i> (1993)
Tomate (‘Tuskegee 80-130’, ‘Floradade’)	3.6	Inactivación de <i>Rhizopus stolonifer</i> .	Mayor efecto de inactivación en combinación con CaCl_2 y <i>Debaromyces hansenii</i> .	Stevens <i>et al.</i> (1997)
Tomate (‘Capello’)	3.7-24.4	Retraso de senescencia.	Posible relación entre el incremento de niveles de putrescina y el retraso de maduración. A la menor dosis se logra retraso en senescencia por 7 días.	Maharaj <i>et al.</i> (1999)

De igual manera, González-Aguilar *et al.* (2007b) reportaron incremento de actividad enzimática de lipoxigenasa (EC. 1.13.11.12) en frutos de mango entero del cultivar ‘Haden’ al ser expuestos a UV-C (0.25 - 0.5 kgf s^{-2}). Esta respuesta se presenta como defensa contra el estrés oxidativo generado por diferentes tipos de estrés ambiental, incluyendo la irradiación UV-C. Se ha visto que el tejido incrementa los niveles de otras enzimas asociadas al deterioro como quitinasa, glucanasas y fenilalanina amonio liasa, en respuesta al tratamiento con UV-C, en duraznos (El Ghaouth *et al.*, 2003), naranjas (Porat *et al.*, 2001) y mangos (González-Aguilar *et al.*, 2007b).

VALOR NUTRICIONAL AGREGADO

Se han reportado casos en los que la UV-C ha modificado las propiedades nutricionales de frutas y hortalizas. Entre los cambios observados se encuentran la acumulación de fitoalexinas y el incremento de algunas vitaminas y antioxidantes. Mau *et al.* (1998) lograron incrementar los niveles de vitamina D2 en champiñones (*Agaricus bisporus* J E Lange y *A. bitorquis* Qué.) en 104 y 232 %, con dosis de UV-C de 0.295 y 1.471 kgf s^{-2} , respectivamente. En cambio, en el control de pudrición de camote (*Ipomoea batatas* L.) cv. ‘Jewel’ causada por *Fusarium* (Stevens *et*

al., 1999), las raíces tratadas con UV-C (0.48 kgf s^{-2}) presentaron altos niveles de almidón.

Cantos *et al.* (2001, 2002, 2003) han reportado la síntesis de estilbenos inducida por la irradiación UV-C en uvas para mesa y vino, como es el caso de los compuestos fenólicos resveratrol (3, 5,4'-trihidroxiestilbeno) y piceatanol (3, 5,3',4',-tetrahidroxiestilbeno). Los frutos de pimiento rojo (*Capsicum annum* L. cv. 'Zafiro') irradiados con UV-C a $7 \times 10^3 \text{ kgfs}^{-2}$, mostraron un aumento inmediato en la capacidad antioxidante durante el almacenamiento a 10°C ; dicha capacidad disminuyó tanto en frutos tratados como no tratados, pero a los 18 d de almacenamiento los frutos tratados mostraron mayor nivel de antioxidantes (Vicente *et al.*, 2005).

En mango fresco cortado e irradiado con UV-C se reportó un incremento significativo de la actividad antioxidante (ORAC), el cual puede correlacionarse con aumentos en los contenidos de fenoles y flavonoides totales (González-Aguilar *et al.*, 2007a). El tratamiento de UV-C indujo la síntesis de antocianinas en frutos de fresa y manzana, con lo que se mejoró la calidad nutricional del producto (Baka *et al.*, 1999; Dong *et al.*, 1995). Se ha sugerido entonces la aplicación de UV-C para la producción de alimentos funcionales. En el caso específico de resveratrol, que posee propiedades que protegen contra problemas cardiovasculares, aumenta en el tejido de uva como consecuencia del tratamiento con UV-C (Bradamante *et al.*, 2003; Cantos *et al.*, 2002). El mejoramiento de alguna de las propiedades nutricionales de frutas y hortalizas puede ser un aliciente para la aplicación de irradiación UV-C como tecnología postcosecha.

EFECTOS ADVERSOS

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. Por tanto, la irradiación de UV-C puede tener efectos adversos cuando la intensidad es superior a la tolerada por el producto. El principal efecto dañino ocurre con dosis muy altas y se manifiesta como manchado y decoloración de la piel, y su intensidad varía con el tiempo de exposición a la UV-C. En tomate, el aumento de la dosis a un nivel superior a $2 \times 10^4 \text{ kgf s}^{-2}$ causó maduración anormal y pardeamiento del exocarpio, similar al escaldado por sol, así como decoloración indeseable del endocarpio (Maharaj *et al.*, 1999, Liu *et al.*, 1993). Marquenie *et al.* (2002) trataron fresas con dosis de 1.0 y 1.5 kgf s^{-2} , las cuales afectaron la apariencia del cáliz y causaron oscurecimiento y deshidratación de las hojas. Mau *et al.* (1998) lograron incrementar los niveles de vitamina D2 en champiñones con la dosis más baja probada (0.295 kgf s^{-2}), pero

también se presentó una decoloración superficial que afectó la aceptabilidad del producto. Un efecto importante observado en uva de mesa cv. 'Superior' es el pardeamiento ocasionado por un bajo contenido de clorofila *b* con el correspondiente aumento de feofitinas (productos de la degradación de clorofila), contrario a lo observado generalmente en que las enzimas polifenoloxidasas y peroxidasa (EC 1.11.1.7) son las responsables de esta reacción. También se ha reportado engrosamiento de la pared celular del pericarpio de las bayas, debido al aumento de celulosa, hemicelulosa y material lipídico, que puede considerarse como una respuesta similar al daño físico o una barrera contra el ataque de patógenos (González-Barrio *et al.*, 2005).

Si se ha de llevar la aplicación de la irradiación UV-C a escala industrial también se deben implementar medidas de seguridad, ya que la exposición de seres humanos puede provocar efectos adversos como inflamación de córnea, enrojecimiento retardado de la piel e importantes efectos en el sistema inmune. Se pueden minimizar los riesgos para el personal expuesto a una fuente cercana de irradiación UV-C mediante la implementación de sencillas medidas de seguridad, como uso de equipos de protección (lentes, guantes y protectores para la piel), además de capacitación sobre los efectos adversos a la salud (Shama *et al.*, 2007).

CONCLUSIONES

La irradiación ultravioleta tipo C se emplea como desinfectante en frutos y hortalizas frescos, porque es un tratamiento que no deja residuos y no genera cambios indeseables en las características sensoriales y nutritivas del producto. La efectividad del tratamiento de irradiación con UV-C depende de muchos factores, como la dosis administrada, la fuente de luz, la especie y el cultivar, entre otros. Al tomar en cuenta que algunas respuestas naturales de defensa inducidas por la UV-C proporcionan un valor nutricional agregado al alimento, se requiere profundizar sobre los cambios en el metabolismo del producto, como son la síntesis de compuestos fenólicos, antioxidantes y antisenescentes, a partir de los efectos visibles en la maduración y calidad organoléptica. Las aplicaciones potenciales de esta tecnología incluyen el retraso de la maduración durante el almacenamiento, reducción de desórdenes fisiológicos, y aumento de fitoalexinas, antioxidantes o vitaminas. El tratamiento de UV-C podría considerarse como una herramienta complementaria a la refrigeración y al envasado para preservar la calidad organoléptica y nutricional, y aumentar la comercialización de alimentos mínimamente procesados.

Aún son escasos los reportes sobre los efectos bioquímicos de UV-C en frutos enteros y frescos cortados de

origen tropical y subtropical expuestos a bajas temperaturas de almacenamiento, por lo que se requiere realizar estudios sobre el aumento en la síntesis de compuestos bioactivos que incrementan el valor nutricional y aceptación del consumidor. Además, persiste la necesidad de diseñar equipos e instalaciones adecuadas para llevar a cabo la aplicación de esta tecnología a nivel comercial como parte del procesamiento mínimo de productos hortofrutícolas.

BIBLIOGRAFÍA

- Allende A, F Artes (2003a) UV Radiation as a novel technique to preserve quality of fresh processed "Lollo Rosso" lettuce. *Food Res. Internatl.* 36:739-746.
- Allende A, F Artes (2003b) Combined ultraviolet-C and modified atmosphere packaging treatments for reducing microbial growth of fresh processed lettuce. *Food Sci. Technol.* 36:739-746.
- Artes F, A Allende (2005) Processing lines and alternative preservation techniques to prolong the shelf-life of minimally fresh processed leafy vegetables. *Eur. J. Hort. Sci.* 70:231-245.
- Arakawa O (1988) Photoregulation of anthocyanin synthesis in apple fruit under UV-B and red light. *Plant Cell Physiol.* 29:1385-1389.
- Baka M, J Mercier, F Corcuff, F Castaigne, J Arul (1999) Photochemical treatment to improve storability of fresh strawberries. *J. Food Sci.* 68:1068-1072.
- Bakhshi D, O Arakawa (2006) Effects of UV-B irradiation on phenolic compound accumulation and antioxidant activity in 'Jonathan' apple influenced by bagging, temperature and maturation. *J. Food Agric. Env.* 4:75-79.
- Barka E A, S Kalantari, J Makhlof, J Arul (2000a) Effects of UV-C irradiation on lipid peroxidation markers during ripening of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) fruits. *Aust. J. Plant Physiol.* 27:147-152.
- Barka E A, S Kalantari, J Makhlof, J Arul (2000b) Impact of UV-C irradiation on the cell wall-degrading enzymes during ripening of tomato (*Lycopersicon esculentum* L) fruit. *J. Agric. Food Chem.* 48:667-671.
- Ben-Yehoshua S, V Rodov, J J Kim, S Carmeli (1992) Preformed and induced antifungal materials of citrus fruits in relation to the enhancement of decay resistance by heat and ultraviolet treatments. *J. Agric. Food Chem.* 40:1217-1221.
- Bradamante S, L Barengi, F Piccinini, A A E Bertelli, R De Jonge, P Beemster, J W De Jong (2003) Resveratrol provides late-phase cardioprotection by means of a nitric oxide- and adenosine-mediated mechanism. *Eur. J. Pharmacol.* 465 :115-123.
- Calabrese E J, L A Baldwin (2002) Defining hormesis. *Human Exp. Toxicol.* 21:91-97.
- Cantos E, J C Espin, F A Tomas-Barberan (2001) Postharvest induction modeling method using UV irradiation pulses for obtaining resveratrol-enriched table grapes: A new 'functional' fruit?. *J. Agric. Food Chem.* 49:5052-5058.
- Cantos E, J C Espin, F A Tomas-Barberan (2002) Postharvest stilbene enrichment of red and white table grape varieties using UVC irradiation pulses. *J. Agric. Food Chem.* 50:6322-6329.
- Cantos E, J C Espin, M J Fernandez, J Oliva, F A Tomas-Barberan (2003) Postharvest UV-C irradiated grapes as a potential source for producing stilbene-enriched red wines. *J. Agric. Food Chem.* 51:1208-1214.
- Cisneros-Zevallos L (2003) The use of controlled postharvest abiotic stresses as a tool for enhancing the nutraceutical content and adding-value of fresh fruits and vegetables. *J. Food Sci.* 68:1560-1565.
- Costa L, A R Vicente, P M Civallo, A R Chaves, G A Martinez (2006) UV-C treatment delays postharvest senescence in broccoli florets. *Postharv. Biol. Technol.* 39:204-210.
- De Capdeville G, C L Wilson, S V Beer, J R Aist (2002) Alternative disease control agents induce resistance to blue mold in harvested "Red Delicious" apple fruit. *Phytopathology* 92: 900-908.
- D'Hallewin G, M Schirra, E Manueddu, A Piga, S Ben-Yehoshua (1999) Scopone and scopoletin accumulation and ultraviolet-C induced resistance to postharvest decay in oranges as influenced by harvest date. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 124: 702-707.
- D'Hallewin G, M Schirra, M Pala, S Ben-Yehoshua (2000) Ultraviolet C irradiation at 0.5 kJ m⁻² reduces decay without causing damage or affecting postharvest quality of Star Ruby grapefruit (*C. paradise Macf.*). *J. Agric. Food Chem.* 48: 4571-4575.
- Dong Y H, D Mitra, A Kootstra, C Lister, L Lancaster (1995) Postharvest stimulation of skin color in 'Royal Gala' apple. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 120:95-100.
- El Ghaouth, A, C L Wilson, A M Callahan (2003) Induction of chitinase, β -1,3-glucanase, and phenylalanine ammonia lyase in peach fruit by UV-C treatment. *Phytopathology* 93:349-355.
- Erkan M, C Y Wang, D T Krizek (2001) UV-C irradiation reduces microbial populations and deterioration in *Cucurbita pepo* fruit tissue. *Env. Exp. Bot.* 45:1-9.
- Fonseca J M, J W Rushing (2006) Effect of ultraviolet-C light on quality of fresh-cut watermelon. *Postharv. Biol. Technol.* 40:256-261.
- Foyer C H, P Descourvières, K J Kunert (1994) Protection against oxygen radicals: an important defense mechanism studied in transgenic plant. *Plant Cell Env.* 17:507-523.
- González-Aguilar G A, C Y Wang, G J Buta, D T Krizek (2001) Use of UV-C irradiation to prevent decay and maintain postharvest quality of ripe 'Tommy Atkins' mangoes. *Internatl. J. Food Sci. Technol.* 36:767-773.
- González-Aguilar G A, C Y Wang, G J Buta (2004) UV-C irradiation reduces breakdown and chilling injury of peaches during cold storage. *J. Food Sci. Agric.* 84:415-422.
- González-Aguilar G A, J F Ayala-Zavala, J Rivera-López, R Zavaleta-Gatica, M A Villegas-Ochoa, W Tejedor-Espinoza (2005) Reducción de deterioro en frutos de mango, durazno y nectarina utilizando irradiación ultravioleta. *Ciencia de la Frontera* 3:49-57.
- González-Aguilar G A (2005) Sanitizantes utilizados: *In: Nuevas Tecnologías de Conservación de Productos Vegetales Frescos Cortados.* G A González-Aguilar, A A Gardea, F Cuamea-Navarro (eds). Logiprint Digital S. de R.L. de C.V. Guadalajara, Jal. México. pp:271-285.
- González-Aguilar G A, M A Villegas-Ochoa, F Cuamea-Navarro, J F Ayala-Zavala (2006) Efecto de la irradiación UV-C sobre la calidad de mango fresco cortado. *In: I Simposio Ibero-Americano de Vegetales Frescos Cortados.* G A González-Aguilar y F Cuamea-Navarro (eds). pp: 59-64.
- González-Aguilar G A, M A Villegas-Ochoa, Martínez-Téllez, A A Gardea, J F Ayala-Zavala (2007a). Improving antioxidant capacity of fresh-cut mangoes treated with UV-C. *J. Food Sci.* 72:197-202.
- González-Aguilar G A, R Zavaleta-Gatica, M E Tiznado-Hernández (2007b) UV-C Irradiation activates the defense response in mango 'Haden' fruit. *Postharv. Biol. Technol.* 45:108-116.
- González-Barrío R, M Salmenkallio-Marttila, F A Tomas-Barberan, E Cantos, J C Espín (2005) Etiology of UV-C-induced browning in var. Superior white table grapes. *J. Agric. Food Chem.* 53:5990-5996.
- Guerrero-Beltrán J A, G V Barbosa-Cánovas (2004) Review: Advantages and limitations on processing foods by UV light. *Food Sci. Technol. Internatl.* 10:137-147.
- Kaur-Sawhney R, A F Tiburcio, T Altabella, A W Galston (2003) Polyamines in plants: An overview. *J. Cell Mol. Biol.* 2:1-12.

- Kinay P, F Yildiz, F Sen, M Yildiz, I Karacali. (2005)** Integration of pre- and postharvest treatments to minimize *Penicillium* decay of 'Satsuma' mandarins. *Postharv. Biol. Technol.* 37:31-36.
- Lamikanra O, D Kueneman, D Ukuku, K L Bett-Garber (2005)** Effect of processing under ultraviolet light on the shelf life of fresh-cut cantaloupe melon. *J. Food Sci.* 70:534-61539.
- Lea P J, R C Leegood (1999)** *Plant Biochemistry and Molecular Biology.* John Wiley and Sons. Chichester, England. 364 p.
- Liu J, C Stevens, V A Khan, J Y Lu, C L Wilson, O Adeyeye, M K Kabwe, P L Pusey, E Chalutz, T Sultana, S Droby (1993)** Application of ultraviolet-C light on storage rots and ripening of tomatoes. *J. Food Protect.* 56:868-872.
- López-Rubira V, A Conesa, A Allende, F Artes (2005)** Shelf life and overall quality of minimally processed pomegranate arils modified atmosphere package and treated with UV-C. *Postharv. Biol. Technol.* 37:174-185.
- Lu J Y, C Stevens, V A Khan, M Kabwe, C L Wilson (1991)** The effect of ultraviolet irradiation on shelf-life and ripening of peaches and apples. *J. Food Qual.* 14:299-305.
- Luckey T D (1991)** *Radiation Hormesis.* CRC Press. Boca Raton, Florida, USA. pp:33-45.
- Maharaj R, J Arul, P Nadeau (1999)** Effect of photochemical treatment in the preservation of fresh tomato (*Lycopersicon esculentum* cv. 'Capello') by delaying senescence. *Postharv. Biol. Technol.* 15:13-23.
- Marquenie D, C W Michiels, A H Geeraerd, A Schenk, C Soontjens, J F Van Impe, B M Nikolai (2002)** Using survival analysis to investigate the effect of UV-C and heat treatment on storage rot of strawberry and sweet cherry. *Internatl. J. Food Microbiol.* 73:187-196.
- Mau J L, P R Chen, J H Yang (1998)** Ultraviolet irradiation increased vitamin D2 content in edible mushrooms. *J. Agric. Food Chem.* 46:5269-5272.
- Mercier J, J Arul, R Ponnampalam, M Boulet (1993a)** Induction of 6-methoxymellein and resistance to storage pathogens in carrot slices by UV-C. *J. Phytopathol.* 137:44-54.
- Mercier J, J Arul, C Julien C (1993b)** Effect of UV-C on phytoalexin accumulation and resistance to *Botrytis cinerea* in stored carrots. *J. Phytopathol.* 139:17-35.
- Mercier J, M Baka, B Reddy, R Corcuff, J Arul (2001).** Shortwave ultraviolet irradiation for control decay caused by *Botrytis cinerea* in bell pepper. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 126:128-133.
- Nigro F, A Ippolito, G Lima (1998)** Use of UV-C light to reduce Botrytis rot of table grapes. *Postharv. Biol. Technol.* 13:171-181.
- Nigro F, A Ippolito, V Lattanzio, D D Venere, M Salerno (2000)** Effect of ultraviolet-C light on postharvest decay of strawberry. *J. Plant Pathol.* 82:29-37.
- Pan J, A Vicente, G Martinez, A Chaves, M Civeello (2004)** Combined use of UV-C irradiation and heat treatment to improve postharvest life of strawberry fruit. *J. Sci. Food Agric.* 84:1831-1838.
- Piga A, G D'Hallewin, S D'Aquino, M Aggabbio (1997)** Influence of film wrapping and UV irradiation on cactus pear quality after storage. *Packaging Technol. Sci.* 10:59-68.
- Porat R, V Vinokur, D Holland, T G McCollum, S Droby (2001)** Isolation of a citrus chitinase cDNA and characterization of its expression in response to elicitation of fruit pathogen resistance. *J. Plant Physiol.* 158:1585-1590.
- Rodov V, S Ben-Yehoshua, J J Kim, B Shapiro, Y Itta (1992)** Ultraviolet illumination induces scoporone production in kumquat and orange fruit and improves decay resistance. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 117:788-792.
- Ryalls J A, U H Neuenschwander, M G Willits, A Molina, H Y Steiner, M D Hunt (1996)** Systemic acquired resistance. *Plant Cell* 8:1809-1819.
- Shama G, P Alderson (2005)** UV hormesis in fruits: a concept ripe for commercialization. *Trends Food Sci. Technol.* 16:128-136.
- Shama G (2007)** Process challenges in applying low doses of ultraviolet light to fresh produce for eliciting beneficial hormetic responses. *Postharv. Biol. Technol.* 44:1-8.
- Snowball M R, I S Hornsey (1988)** Purifications of water supplies using ultraviolet light. *In: Developments in Food Microbiology.* R K Robinson (ed). Elsevier Applied Science Publishers. London. pp:171-191.
- Stevens C, V A Khan, J Y Lu, C L Wilson, P L Pusey, E C K Igwegbe (1997)** Integration of ultraviolet (UV-C) light with yeast treatment for control of postharvest storage rots of fruits and vegetables. *Biol. Control* 10:98-103.
- Stevens C, V A Khan, J Y Lu, C L Wilson, P L Pusey, M K Kabwe (1998a)** The germicidal and hormetic effects of UV-C light on reducing brown rot disease and yeast microflora of peaches. *Crop Protect.* 17:75-84.
- Stevens C, J Liu, V A Khan, J Y Lu, C L Wilson, E C K Igwegbe, M K Kabwe, E Chalutz, S Droby (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. *J. Phytopathol.* 146:211-221.
- Stevens C, V A Khan, J Y Lu, C L Wilson, E Chalutz, S Droby, M K Kabwe, O Haung, O Adeyeye, P L Pusey, A Y A Tang (1999)** Induced resistance of sweetpotato to *Fusarium* root by UV-C hormesis. *Crop Protect.* 18:463-470.
- Vicente A R, C Pineda, L Lemoine, P M Civeello, G A Martinez, A R Chaves (2005)** UV-C treatments reduce decay, retain quality and alleviate chilling injury in pepper. *Postharv. Biol. Technol.* 35:69-78.
- Yaun B R, S S Sumner, J D Eifert, J E Marcy (2004)** Inhibition of pathogens on fresh produce by ultraviolet energy. *Internatl. J. Food Microbiol.* 90:1-8.