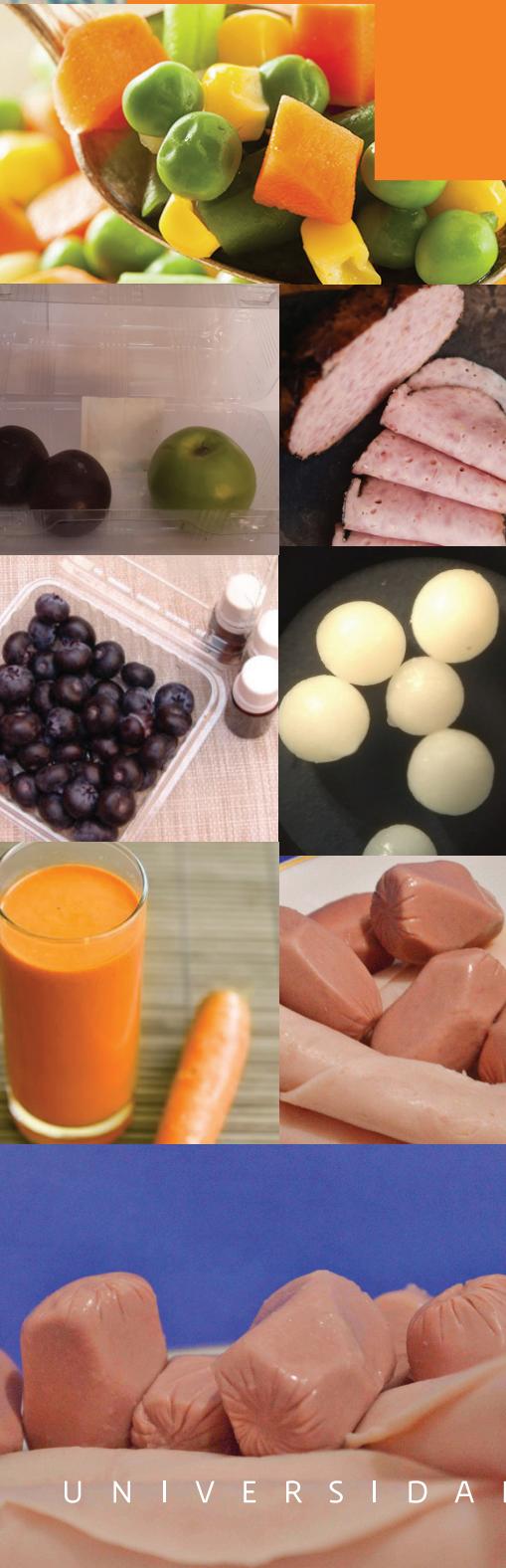


tsia

TEMAS SELECTOS DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS

UDLAP®



UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS PUEBLA

Editorial

La difusión del conocimiento a través de la publicación de artículos de revisión es una labor loable porque la búsqueda, selección y análisis de información oportuna implica un desafío, especialmente si se desea lograr un documento de calidad científica. En este sentido, la revista *TSIA: Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos* contribuye con la publicación de artículos de revisión generados por los estudiantes del Doctorado en Ciencia de Alimentos de la Universidad de las Américas Puebla. Esta tarea se ha realizado y mantenido gracias a la participación del cuerpo editorial y el equipo de edición que, en conjunto, año tras año, hacen posible la publicación de la revista.

El continuo esfuerzo de un equipo que trabaja en colaboración ha dado paso a la publicación del número 12 de nuestra revista *TSIA*, la cual me complace presentar. En este número, el lector podrá profundizar en temas relacionados con la aplicación de aceites esenciales para la conservación de alimentos frescos, la aplicación de agentes antimicrobianos en productos cárnicos listos para el consumo y los beneficios a la salud que brinda el consumo de carotenoides de alimentos. Estas contribuciones aportan datos y abordan casos que permitirán al lector reflexionar en torno a las nuevas tendencias en la ciencia y tecnología de los alimentos.

Por último, agradezco los esfuerzos que hace la Universidad de las Américas Puebla, a través de la planta de profesores científicos del Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental, y el cuerpo editorial, para mantener canales de difusión como la revista *TSIA*. Estoy seguro de que esta labor promueve en nuestros estudiantes la inquietud por la escritura y la divulgación del conocimiento que generarán con su labor científica.

Jocksan I. Morales-Camacho

Profesor

Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental

Universidad de las Américas Puebla

TSIA

Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos

UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS PUEBLA

EDITORIA RESPONSABLE

Maria Eugenia Bárcenas Pozos

CONSEJO EDITORIAL

Emma Mani López

María Teresa Jiménez Munguía

Fidel Tomás Vergara Balderas

TSIA, Año 12, volumen 12 (2018), es una publicación anual de la Universidad de las Américas Puebla, realizada y distribuida por el Departamento de Ingeniería Química y Alimentos. Ex hacienda Sta. Catarina Mártir s/n, San Andrés Cholula, Puebla, C. P. 72810.

Teléfono: (222) 229 21 26, www.udlap.mx, maria.barcenas@udlap.mx. Editora responsable: María Eugenia Bárcenas Pozos. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo número 04-2018-070912093100-102, ISSN: en trámite, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número: María Teresa Jiménez Munguía. Servicios Web y Administración de Contenidos. Ex hacienda Santa Catarina Mártir s/n, San Andrés Cholula, Puebla, C. P. 72810. Fecha de la última modificación: 11 de marzo de 2019.

UDLAP®

Contenido

Volumen 12

Editorial

Artículos de Revisión

- 5 Combinación de tecnologías de envasado con la aplicación de aceites esenciales en la conservación de alimentos frescos**
M. J. Paris y A. López-Malo
- 20 Antimicrobianos en productos de carne de ave listos para el consumo**
L. Lastra-Vargas, A. López-Malo y E. Palou-García
- 30 Los beneficios del consumo de carotenoides**
M. A. González-Peña, J. D. Lozada-Ramírez, L. Toxqui-Abascal y A. E. Ortega-Regules

Combinación de tecnologías de envasado con la aplicación de aceites esenciales en la conservación de alimentos frescos

M. J. Paris* y A. López-Malo

Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental, Universidad de las Américas Puebla. Ex hacienda Santa Catarina Mártir, C.P. 72810, San Andrés Cholula, Puebla, México.

Resumen

La combinación de aceites esenciales con sistemas de envasado activo o en atmósfera modificada está siendo investigada como una alternativa para el control del deterioro microbiano en alimentos frescos. Por eso, el propósito de este trabajo fue revisar el estado del arte de dicho tema, además de proveer información relevante y reciente sobre aspectos relacionados con la actividad antimicrobiana de aceites esenciales y con los sistemas de envasado mencionados. Los aceites esenciales, destacando los de tomillo, romero y clavo, presentan una notoria efectividad antimicrobiana contra mohos, levaduras y bacterias. Además, la utilización de aceites esenciales (incorporados en polímeros tales como almidón o polietileno) en sistemas de envasado activo resulta en la reducción o completa inhibición del crecimiento microbiano. Al combinar aceites esenciales con diferentes condiciones de atmósfera modificada, se reduce el deterioro por microorganismos en alimentos frescos, extendiéndose su vida de anaquel.

Palabras clave: aceite esencial · actividad antimicrobiana · envasado activo · atmósfera modificada

Abstract

The combination of essential oils with active packaging or modified atmosphere is being investigated as an alternative for the control of microbial spoilage in fresh food. Therefore, the purpose of this review was to examine the state of the art of this topic, in addition to providing relevant and recent information on related aspects about essential oils, antimicrobial activity, and active and modified packaging. After the review, it is emphasized that essential oils from thyme, rosemary and clove essential oils, present remarkable antimicrobial activity against molds, yeasts and bacteria. Furthermore, their application (impregnated in polymers such as starch or polyethylene) in active packages, results in microbial growth reduction or complete inhibition. On the other hand, the combination of essential oils with different modified atmosphere conditions reduces microbial spoilage in fresh food, extending their shelf life.

Keywords: essential oil · antimicrobial activity · active packaging · modified atmosphere



Programa de Doctorado
en Ciencias de Alimentos

Tel: +52 222 229 2126

Dirección electrónica:

maria.dasilvagabrielaparisdl@udlap.mx

maria.barcenas@udlap.mx

Introducción

La disponibilidad de alimentos frescos, incluyendo los listos para consumir, ha aumentado en los últimos años, debido a la creciente demanda por productos no procesados y al estilo de vida acelerado de la sociedad actual. Sin embargo, los alimentos frescos presentan una vida de anaquel bastante reducida, en parte debido a la acción microbiana.

Los aceites esenciales, como antimicrobianos naturales, son una alternativa a los antimicrobianos sintéticos y su potencial antimicrobiano es, actualmente, objeto de amplio estudio. Por otro lado, la selección cuidadosa de sistemas de envasado adecuados para cada tipo de alimento fresco es fundamental para garantizar las condiciones óptimas de almacenamiento del alimento. El envasado activo y el envasado en atmósfera modificada son dos sistemas que han demostrado ser efectivos en el control antimicrobiano. Asimismo, se ha investigado la posibilidad de combinar el potencial de los aceites esenciales con los sistemas de envasado activo o en atmósfera modificada, para la preservación de alimentos. Motivándose en lo descrito anteriormente, la revisión de aspectos relacionados con la actividad antimicrobiana de aceites esenciales y su combinación con sistemas de envasado activo o en atmósfera modificada será el enfoque principal de esta revisión.

Revisión bibliográfica

1. Aceites esenciales: actividad antimicrobiana

Los aceites esenciales son metabolitos secundarios de plantas y se encuentran constituidos por un conjunto de compuestos volátiles, generalmente de bajo peso molecular, responsables de su bioactividad (Reyes-Jurado, Franco-Vega, Ramírez-Corona, Palou y López-Malo, 2015; Ribeiro-Santos, Andrade, de Melo y Sanches-Silva, 2017a). Pueden ser encontrados en pequeñas cantidades en diversos órganos de la planta, tales como flores, brotes, frutos, tallos, raíces, semillas y hojas. Juegan un papel importante en la protección de la planta, actuando como antibacterianos, antifúngicos, antivirales, insecticidas, o bien, protegiéndolas de los herbívoros. Así, cuando son aplicados en alimentos, desarrollan un papel semejante, actuando como agentes antimicrobianos, además de poseer otras propiedades. Su composición, influída por factores genéticos, fisiológicos y ambientales, y por el método de extracción, va a repercutir en su actividad antimicrobiana (Quesada, Sendra, Navarro y Sayas-Barberá, 2016). Normalmente, el compuesto mayoritario del aceite esencial es el responsable de su

actividad antimicrobiana, aunque compuestos minoritarios también puedan actuar de forma sinérgica en la potencialización de dicha actividad (Ribeiro-Santos *et al.*, 2017a). Los aceites esenciales constituidos mayoritariamente por compuestos fenólicos (por ejemplo, carvacrol, timol y eugenol), aldehídos y alcoholes son, normalmente, más efectivos en el control microbiano (Turgis, Han, Borsa y Lacroix, 2008; Gómez-Heincke, Martínez, Partal, Guerrero y Gallegos, 2016). Por el contrario, los aceites esenciales ricos en linalool presentan, regularmente, menor poder antimicrobiano (Turgis *et al.*, 2008). Los aceites de tomillo (*Thymus vulgaris*) y romero (*Rosmarinus officinalis*), por ejemplo, presentan un contenido de fenoles elevado, con efecto antimicrobiano comprobado contra bacterias Gram-positivas y Gram-negativas. El timol y el p-cimeno son los principales componentes del aceite esencial de tomillo (45.90 y 26.59%, respectivamente); mientras que α-pineno, camfor y eucaliptol (23.98, 22.62 y 18.76%, respectivamente) son los compuestos mayoritarios del aceite esencial de romero (Giarratana *et al.*, 2016). El aceite esencial de albahaca, eficaz contra determinadas bacterias, es también rico en eugenol, con aproximadamente 35% de la composición del aceite (Arfat, Benjakul, Vongkamjan, Sumpavapol y Yarnpakdee, 2015; Siriwardana, Abeywickrama, Kannangara, Jayawardena y Attanayake, 2017).

La lipofilicidad del aceite esencial es un aspecto importante que considerar cuando se aborda el tópico de su actividad antimicrobiana, ya que la facilidad del aceite para traspasar la membrana celular del microorganismo es tanto mayor cuanto mayor sea dicha propiedad. Cuando el aceite esencial cruza la membrana, la desestabiliza, pudiendo ocurrir pérdidas moleculares a través de ésta; además, puede interferir con las actividades enzimáticas de la célula. En el caso de las bacterias, puede ocurrir un colapso de la bomba de protones o coagulación del citoplasma, y verse afectado el material genético (Han, Patel, Kim y Min, 2014; Reyes-Jurado *et al.*, 2015).

Varios aceites han sido probados, exitosamente, en el control antimicrobiano, tanto en sistemas *in vitro*, como en alimentos. La tabla I muestra un conjunto de trabajos recientes desarrollados con el objetivo de evaluar la actividad antifúngica de aceites esenciales. Se puede observar que los aceites esenciales de tomillo, romero, clavo, mostaza y canela son de los más utilizados para la inhibición del crecimiento de mohos. Varios trabajos han analizado la actividad antimicrobiana de los aceites esenciales en fase vapor, un enfoque que ha demostrado ser bastante efectivo en el control microbiano. Por otro lado, la combinación sinérgica de diferentes aceites presenta muchas veces una disminución de la concentración mínima inhibitoria,

Tabla I. Concentración mínima inhibitoria (CMI) de diferentes aceites esenciales evaluados en alimentos o en sistemas modelo, por adición directa o en fase vapor

| Aceite esencial | Microorganismo | Medio | Tipo de adición | CMI | Referencias |
|--|---|---|-----------------|--|-----------------------------------|
| Clavo y mostaza | <i>Botrytis cinerea</i> | PDA ¹ | Vapor | 92.56 µL/Laire (clavo) y 15.42 µL/Laire (mostaza) | Aguilar-González et al. (2015) |
| Clavo y mostaza (mezcla) | <i>Botrytis cinerea</i> | PDA ¹ | Vapor | 46.28 µL/Laire (clavo) y 1.93 µL/Laire (mostaza) | Aguilar-González et al. (2015) |
| Clavo y mostaza (mezcla) | <i>Botrytis cinerea</i> | Fresa (<i>Fragaria x ananassa</i>) | Vapor | 11.57 µL/Laire (clavo) y 1.93 µL/Laire (mostaza) | Aguilar-González et al. (2015) |
| Mostaza | <i>Aspergillus niger</i> | PDA ¹ | Directo | 4 µL/mL | Mejía-Garibay et al. (2015) |
| Mostaza | <i>Aspergillus niger</i> | PDA ¹ | Vapor | 41.1 µL/Laire (10 días) | Mejía-Garibay et al. (2015) |
| Mostaza | <i>Aspergillus ochraceus y Penicillium citrinum</i> | PDA ¹ | Directo | 2 µL/mL | Mejía-Garibay et al. (2015) |
| Mostaza | <i>Aspergillus ochraceus</i> | PDA ¹ | Vapor | 41.1 µL/Laire (20 días) | Mejía-Garibay et al. (2015) |
| Mostaza | <i>Penicillium citrinum</i> | PDA ¹ | Vapor | 41.1 µL/Laire (10 días) | Mejía-Garibay et al. (2015) |
| Cáscara de naranja (<i>Citrus sinensis</i>) | <i>Aspergillus flavus</i> | PDA ¹ | Directo | 16000 mg/L | Velázquez-Nuñez et al. (2013) |
| Cáscara de naranja (<i>Citrus sinensis</i>) | <i>Aspergillus flavus</i> | PDA ¹ | Vapor | 8000 mg/L | Velázquez-Nuñez et al. (2013) |
| Clavo | <i>Botrytis cinerea</i> | PDA ¹ | Directo | 300 ppm | Vesaltalab et al. (2012) |
| Romero | <i>Botrytis cinerea</i> | PDA ¹ | Vapor | 300 ppm | Vesaltalab et al. (2012) |
| Clavo | <i>Botrytis cinerea</i> | Uva (<i>Vitis vinifera</i> L. cv. Thompson) | Vapor | 450 ppm | Vesaltalab et al. (2012) |
| Romero | <i>Botrytis cinerea</i> | Uva | Vapor | 450 ppm | Vesaltalab et al. (2012) |
| Canela | <i>Colletotrichum gloeosporioides</i> | PDA ¹ | Directo | 0.075% | Sefu et al. (2015) |
| Jengibre (<i>Zingiber officinale</i>) | <i>Colletotrichum gloeosporioides</i> | PDA ¹ | Directo | 0.045% | Sefu et al. (2015) |
| Menta (<i>Mentha piperita</i>) | <i>Macrophomina phaseolina</i> | PDA ¹ | Directo | 975 ppm | Khaledi et al. (2015) |

Tabla I. Continuación. Concentración mínima inhibitoria (CMI) de diferentes aceites esenciales evaluados en alimentos o en sistemas modelo, por adición directa o en fase vapor

| Aceite esencial | Microorganismo | Medio | Tipo de adición | CMI | Referencias |
|--|----------------------------------|------------------|-----------------|----------|------------------------------|
| Alcaravea negra (<i>Bunium persicum</i>) | <i>Macrophomina phaseolina</i> | PDA ¹ | Directo | 950 ppm | Khaledi <i>et al.</i> (2015) |
| Tomillo | <i>Macrophomina phaseolina</i> | PDA ¹ | Directo | 1150 ppm | Khaledi <i>et al.</i> (2015) |
| Tomillo | <i>Brochothrix thermosphacta</i> | TSB ² | Directo | 0.05% | Nowak <i>et al.</i> (2012) |
| Romero | <i>Brochothrix thermosphacta</i> | TSB ² | Directo | 0.5% | Nowak <i>et al.</i> (2012) |

1: Agar papa dextrosa

2: Caldo triptona de soya

lo que representa una ventaja económica por el uso de menor cantidad de aceite esencial para lograr el mismo efecto (Aguilar-González, Palou y López-Malo, 2015)

2. Tecnologías de envasado para alimentos frescos

2.1 Aspectos generales del envasado de alimentos frescos

La selección del sistema de envasado ideal para un determinado alimento fresco depende de la estabilidad y grado de procesamiento que presenta el alimento, de su contenido de conservadores y de las condiciones de almacenamiento a las que se encuentra expuesto (Gazalli *et al.*, 2013).

En el caso particular de las frutas y verduras frescas, una vez cosechadas están sujetas a cambios de calidad, principalmente si son sometidas a procedimientos tales como pelado, corte y/o rebanado. Éstos aceleran la velocidad de respiración y la producción de etileno, afectando la calidad de las frutas y verduras. Por otro lado, el almacenamiento en presencia de aire acelera el deterioro de la fruta o verdura, porque ésta tiende a perder o ganar humedad, y se promueven reacciones de oxidación y el crecimiento de microorganismos aerobios (Soltani, Mobli, Alimardani y Mohtasebi, 2015). Por esto, es conveniente almacenar las frutas y verduras en atmósferas modificadas (Hodges y Toivonen, 2008) o en envases activos (por ejemplo, con removedores de etileno o de oxígeno) (Biji, Ravishankar, Mohan y Srinivasa Gopal, 2015; Wyrwa y Barska, 2017). Por otro lado, la temperatura también afecta su calidad, por lo que normalmente se almacenan a bajas temperaturas para minimizar los daños poscosecha (Hodges y Toivonen, 2008). El material de envase utilizado en el almacenamiento de frutas y verduras frescas varía desde cartón

o papel, hasta plásticos tales como el polietileno de baja densidad (LDPE), polietileno de alta densidad (HDPE), polipropileno (PP), etilvinilacetato (EVA), etilen-vinil-alcohol (EVOH), cloruro de polivinilo (PVC) y poliestireno (PS) (Scetar, Kurek y Galic, 2010).

En el caso de las carnes frescas, han sido ampliamente conservadas en atmósfera modificada y a temperaturas de refrigeración (4 °C) (Schmid, Saengerlaub y Mueller, 2016). Entre los materiales de envase usados para la carne fresca, se encuentran el polietileno de baja densidad (LDPE), etilvinilacetato (EVA), etilen-vinil-alcohol (EVOH), cloruro de polivinilo (PVC) y poliestireno (PS) (Gazalli *et al.*, 2013).

2.2 Envasado activo

Por envase activo se entiende aquel que complementa las funciones de un envase tradicional por presentar funciones adicionales, además de ser un simple contenedor/protector. En este tipo de sistema, el envase, el alimento y el ambiente interactúan entre sí combatiendo condiciones adversas causantes de deterioro. Como resultado se logra una mayor seguridad antimicrobiana y/o que las propiedades sensoriales se mantengan adecuadas por más tiempo, aumentando la vida de anaquel del producto (Sen, Mishra y Srivastav, 2012; Wyrwa y Barska, 2017). El sistema activo puede ser parte integral del envase (cuando, por ejemplo, se incorporan elementos activos en el material del envase), o constituir un elemento adicional introducido en el envase (por ejemplo, cuando se añade un sachet adsorbente o emisor en el interior del envase) (Sen *et al.*, 2012).

En lo que se refiere al mecanismo de acción, los envases activos pueden contener elementos adsorbentes o absorbedo-

res de compuestos indeseables en el interior del envase, o elementos para la liberación controlada de compuestos deseados (Wyrwa y Barska, 2017).

Aunque en esta sección se abordarán la adsorción, absorción y emisión de diferentes componentes separadamente, en muchos casos es importante el control simultáneo de varios parámetros implicados en el deterioro, ya que éste puede resultar de la combinación de diferentes causas.

2.2.1 Sistemas de adsorción o de absorción

Los sistemas de adsorción o de absorción permiten la remoción, del ambiente del envase, de compuestos indeseables e involucrados en el deterioro de alimentos. Estos compuestos pueden ser oxígeno, agua, dióxido de carbono, etileno, compuestos responsables de impartir aroma y sabor u otros.

2.2.1.1 Oxígeno

La remoción de oxígeno utilizando sistemas de envasado activo de adsorción es de las prácticas más utilizadas en este ámbito. Sistemas removedores de oxígeno involucran la oxidación de compuestos de hierro (el más común), de ácido ascórbico, de colorante fotosensible, de enzimas o de ácidos grasos saturados (Charles, Sanchez y Gontard, 2006; Biji *et al.*, 2015). Éstos son incluidos dentro de *sachets* permeables al oxígeno, colocados dentro del envase (Wyrwa y Barska, 2017).

2.2.1.2 Humedad

En cuanto a los controladores de humedad, pueden ser absorbentes poliméricos higroscópicos (inserto u hoja) conteniendo dos o más capas que sean eficaces en la absorción de líquidos. Por otro lado, los controladores de humedad pueden ser reguladores de humedad relativa (*sachets* o etiquetas) conteniendo agentes deshidratantes. Los adsorbentes de humedad más sencillos son los de gel de sílice, zeolita, fibra de celulosa o cloruro de sodio, capaces de mantener un nivel de humedad tal en el envase, que no permite el desarrollo de mohos (Wyrwa y Barska, 2017).

2.2.1.3 Dióxido de carbono

Por lo que toca al dióxido de carbono, su presencia puede ser deseable o indeseable. En los casos en que su presencia no es apreciada, por ejemplo, debido a reacciones de deterioro y respiración, se procede a su remoción. Esto es normalmente llevado a cabo por óxido o hidróxido de calcio, impregnado en gel de sílice, dispuesto en un *sachet* poroso (Charles *et al.*, 2006; Wyrwa y Barska, 2017). Wang, An, Rhim y Lee (2017) probaron exitosamente una combinación de polímero súper

absorbente de poliacrilato con *sachet* de carbonato de sodio, para la remoción simultánea de humedad y de dióxido de carbono del ambiente del envase.

2.2.1.4 Etileno

Por su parte, el etileno, considerado una foto-hormona de frutas y vegetales, acelera el grado de respiración y, consecuentemente, la maduración y ablandamiento de éstas. El óxido de aluminio, el permanganato de potasio incrustado en gel de sílice, el paladio incorporado a carbón activado y la arcilla de zeolita, son utilizados, inmovilizados en *sachets*, para la mitigación del deterioro por el etileno (Sen *et al.*, 2012; Biji *et al.*, 2015; Wyrwa y Barska, 2017).

2.2.1.5 Otros

Componentes volátiles tales como aldehídos, aminas y sulfitos, responsables por olores de degradación dentro de envases, pueden ser selectivamente removidos, usando *sachets* conteniendo níquel y carbón activado (Biji *et al.*, 2015). El polvo de dióxido de silicio es útil en la adsorción de etanol (normalmente producido cuando frutas o verduras son empacadas en ambiente con bajo contenido de oxígeno) (Mahajan, Caleb, Singh, Watkins y Geyer, 2014; Otoni, Espitia, Avena-Bustillos y McHugh, 2016).

2.2.2 Sistemas de emisión

Un grupo importante de los envases activos son los que contienen emisores activos, a través de compuestos capaces de inhibir reacciones adversas dentro del envase. En este caso, la migración de compuestos con propiedades activas es intencionalmente promovida (Ribeiro-Santos *et al.*, 2017b). Éstos son importantes, por ejemplo, para el control del crecimiento microbiano, a través de la emisión de dióxido de azufre, dióxido de carbono, etanol u otros antimicrobianos. Los emisores también pueden difundir olores o sabores, con el objetivo de enmascarar olores indeseables o de intensificar los deseados (Wyrwa y Barska, 2017).

2.2.2.1 Dióxido de carbono

La incorporación del dióxido de carbono a envases activos tiene el objetivo de detener o suprimir el crecimiento microbiano o de reducir la tasa de respiración de alimentos frescos. Se ha estimado que una concentración de dióxido de carbono de 10 a 80% (v/v) dentro del envase, es ideal para que se observen los efectos de conservación deseados. Su emisión es posible por medio del uso de *sachets* porosos conteniendo ascorbato o bicarbonato de sodio. Los emisores de dióxido de carbono normalmente

se usan en combinación con los de adsorción de oxígeno, para un mejor control del deterioro microbiano (Trindade, Villanueva y Antunes, 2013; Biji *et al.*, 2015).

2.2.2.2 Antimicrobianos

Los envases activos antimicrobianos tienen como finalidad extender la fase *lag* e inhibir el crecimiento de los microorganismos. El efecto inhibitorio resulta de la migración de compuestos con capacidad antimicrobiana, del sistema de envasado al alimento. El antimicrobiano puede ser incorporado en el propio material del envase o dispuesto dentro de él. Los sistemas de envase antimicrobiano más comunes están basados en compuestos de plata. Sin embargo, una tendencia reciente es la incorporación de antimicrobianos naturales, y éstos incluyen desde aceites esenciales (por ejemplo, clavo, romero, tomillo, entre otros) o extractos de plantas (por ejemplo, extracto de granada y de semillas de uva), hasta agentes de origen microbiano tales como nisinina, natamicina y pediocina (Duran *et al.*, 2016; Gómez-Heincke *et al.*, 2016). Los envases activos antimicrobianos compuestos por aceites esenciales serán abordados con más detalle en otra sección de este artículo.

Los envases activos antimicrobianos surgen como una alternativa a la adición directa del antimicrobiano en la superficie del alimento. Esta última presenta el inconveniente de que el potencial del componente activo podría neutralizarse rápidamente en contacto con el alimento, o que la difusión del antimicrobiano al alimento podría ser muy rápida (Biji *et al.*, 2015; Wyrwa y Barska, 2017). Por otro lado, al ser añadidos directamente al alimento, algunos antimicrobianos podrían aportar sabores que resulten desagradables al consumidor. Es importante resaltar que, si el envase es un revestimiento o recubrimiento, el antimicrobiano se encuentra prácticamente en contacto directo con el alimento.

Los sistemas de envasado activo antimicrobianos corresponden al grupo más vasto de emisores y su éxito depende de la porosidad o permeabilidad del material que contiene el antimicrobiano y de la volatilidad de éste (Otoni *et al.*, 2016). En este sentido, pruebas de migración, realizadas bajo condiciones que imitan las del almacenamiento del producto, proporcionan datos sobre el potencial migratorio de un compuesto activo. Si por un lado es importante que el material transportador del antimicrobiano sea permeable, por otro, el material de envase debe tener buenas propiedades de barrera, para evitar la pérdida de compuestos volátiles por permeación a través de las paredes del envase (Biji *et al.*, 2015).

2.3 Atmósfera modificada

Una atmósfera modificada es aquella cuya composición difiere de la normal del aire (20.9% de oxígeno, 78.1% de nitrógeno y cantidades traza de otros gases) (Turgjs *et al.*, 2008; Sen *et al.*, 2012). Es utilizada con la finalidad de limitar la ocurrencia de procesos fisicoquímicos asociados con el deterioro de alimentos frescos o mínimamente procesados, aumentando así su vida de anaquel (Gammariello, Incoronato, Conte y Nobile, 2015). La composición de la atmósfera modificada depende del producto y de su tasa de respiración, de la permeabilidad del material de envase, así como de la temperatura de almacenamiento (Sen *et al.*, 2012; Cortellino, Gobbi, Bianchi y Rizzolo, 2015).

2.3.1 Materiales de envase

Los materiales más usados para el envasado de alimentos frescos en atmósfera modificada son polietileno de baja (LDPE) y alta densidad (HDPE), etilvinilacetato (EVA), etilen-vinil-alcohol (EVOH), cloruro de polivinilo (PVC), poliestireno (PS), polipropileno (PP), polietilen-tereftalato (PET) y poliamida laminada (Gazalli *et al.*, 2013; Maneesin, Chinnasri, Vongsawasdi y Wangchanachai, 2014; Kahraman, Issa, Bingol, Kahraman y Dumen, 2015; Soltani *et al.*, 2015; Giarratana *et al.*, 2016). El más utilizado en el envasado de frutas y verduras es el polietileno, aunque muchas veces se pueden combinar diversos materiales por laminado o por co-extrusión (Scetar *et al.*, 2010). En el envasado de carne en atmósfera modificada, se utiliza normalmente una charola de polipropileno con una hoja absorbente de líquido y se cubre con una tapa transparente (Schmid *et al.*, 2016).

2.3.2 Gases utilizados

Los gases más comúnmente usados en atmósfera modificada son el oxígeno, el dióxido de carbono y el nitrógeno, aunque se ha sugerido el uso de otros gases tales como el argón y el óxido nitroso (Oliveira *et al.*, 2015). La atmósfera puede ser creada por descarga directa de los gases (activa) o por la respiración de los alimentos contenidos en el envase (pasiva), lo que lleva a la disminución de la concentración de oxígeno y al aumento de las concentraciones de dióxido de carbono y de vapor de agua dentro del envase (Sen *et al.*, 2012).

La atmósfera modificada, normalmente, contiene concentraciones menores de oxígeno y mayores de dióxido de carbono que las del aire, lo que permite mantener las condiciones gaseosas óptimas para la conservación de alimentos frescos (Cortellino *et al.*, 2015). El oxígeno es mantenido entre 1 y 10% y el dióxido de carbono entre 1 y 20%, aunque esta práctica no es obligatoria (Soltani *et al.*, 2015). El oxígeno facilita los procesos de deterioro por microrganismos aerobios, acelera el deterioro

oxidativo de alimentos, y genera cambios de olor, color y sabor en los alimentos; mientras que el dióxido de carbono inhibe el crecimiento de determinados microorganismos, particularmente de bacterias Gram-negativas y aerobias. El nitrógeno, aunque poco reactivo, retarda indirectamente el deterioro por ser muchas veces usado para desplazar al oxígeno (Soltani *et al.*, 2015).

Así, la combinación de concentraciones bajas de oxígeno y de concentraciones elevadas de dióxido de carbono, resulta en la inhibición del crecimiento de determinados microorganismos aerobios. Por otro lado, reduce la velocidad de respiración y la producción de etileno en frutas y verduras frescas, lo que resulta en el retraso de la degradación de clorofila y de los procesos de maduración y ablandamiento. La ocurrencia de reacciones de obscurecimiento también es limitada a bajas concentraciones de oxígeno, aunque éstas puedan llevar al desarrollo de fermentaciones indeseadas (Cortellino *et al.*, 2015; Mele, Islam, Baek y Kang, 2017). Es importante mencionar que la concentración de dióxido de carbono tampoco puede ser muy elevada. Se ha sugerido, por ejemplo, que una concentración de dióxido de carbono mayor que 6% en la conservación de plátano puede llevar a su ablandamiento, mientras que la cáscara sigue verde, resultando en texturas y aromas indeseables. El oxígeno, por otro lado, debe ser mantenido en concentraciones no menores que 1.5%, para evitar el obscurecimiento de la cáscara de plátano, fallas en la maduración de la fruta, o bien generación de sabores indeseables (Siriwardana *et al.*, 2017).

El envasado de carne en atmósfera modificada permite que su vida de anaquel aumente de aproximadamente tres a ocho días, considerando que la carne se debe almacenar a temperatura de refrigeración (4 °C). Se debe tener cuidado de mantener una concentración de oxígeno suficientemente elevada (entre 40 y 70%, v/v), para garantizar que la carne se mantenga de color rojo y no adquiera una coloración grisácea. Sin embargo, la concentración de oxígeno no debe ser tan elevada al punto de promover la oxidación de lípidos en carnes con contenidos de grasa relativamente altos, o el crecimiento de bacterias aerobias (Schmid *et al.*, 2016).

La atmósfera modificada ha sido utilizada de forma individual o combinada con películas antimicrobianas, aceites esenciales o irradiación con rayos gamma, para el control de la calidad de alimentos frescos (Kahraman *et al.*, 2015; Severino *et al.* 2015; Giarratana *et al.*, 2016; Gomes *et al.*, 2017).

3. Aplicación de aceites esenciales a sistemas de envasado para alimentos frescos

3.1 En sistemas de envasado activo

La combinación de sistemas de envasado activo con el potencial antimicrobiano de los aceites esenciales constituye una oportunidad de investigación apuntando a un mejor control del deterioro y, consecuentemente, de la calidad de los productos frescos. Estudios realizados en este ámbito, se basan en la incorporación del aceite esencial en un material transportador incluyendo láminas antimicrobianas, etiquetas o *sachets* (Tabla II).

Con respecto a los *sachets* es importante mencionar que son la forma más común de incorporación de antimicrobianos (Trindade *et al.*, 2013; Han *et al.*, 2014), aunque para el caso particular de los aceites esenciales sea escasa su utilización. En la tabla II se presentan algunas de las investigaciones que se han realizado sobre este tema. Los *sachets* no deben ser gruesos y deben ser porosos o semipermeables, ya que el grado de permeabilidad controla el grado de liberación del compuesto activo. Normalmente son hechos de material no textil poroso, de papel o bien de películas de algún polímero y pueden transportar el antimicrobiano o contener un sistema generador del mismo (Otoni *et al.*, 2016). Cuando son utilizados como transportadores del antimicrobiano, éste puede encontrarse incorporado en las paredes del *sachet* o en esferas porosas de un polímero con considerable poder de emisión, contenidas dentro del *sachet*. Dichas esferas deben presentar tamaño y permeabilidad adecuados para la liberación del aceite esencial (Espitia *et al.*, 2012; Han *et al.*, 2014; Atares y Chiralt, 2016; Maisanaba *et al.*, 2017). El alginato, el quitosano, el almidón y la gelatina son ejemplos de polímeros usados en la encapsulación de aceites esenciales (García-Ceja y López-Malo, 2012; Han *et al.*, 2014; Wu *et al.*, 2014; Jovanovic, Klaus y Niksic, 2016; Quesada *et al.*, 2016). Es necesario sellar el *sachet*, lo que normalmente es hecho por aplicación de calor, o en frío, si el material del *sachet* es sensible al calor. También se pueden utilizar capas de adhesivos o cinta de aluminio para el sellado de *sachets* (Otoni *et al.*, 2016).

Por otro lado, el antimicrobiano puede ser inmovilizado en la estructura o superficie del material polimérico constituyente del envase o en revestimientos comestibles, por enlaces covalentes o iónicos (Assefa y Admassu, 2013; Manohar, Prabhawathi, Sivakumar y Doble, 2015; Quesada *et al.*, 2016). La liberación del antimicrobiano dependerá del tipo de polímero

Tabla II. Estudios sobre el efecto antimicrobiano de la combinación de aceites esenciales con sistemas de envasado activo tipo sachet

| Aceite esencial | Material del sachet | Polímero transportador del aceite esencial | Efecto antimicrobiano | Referencias |
|--|--------------------------------|--|--|---------------------------------|
| Romero y tomillo | Papel filtro Whatman núm. 4 | Esferas de espuma micro-celular de almidón de chícharo | Redujo las unidades formadoras de colonias de <i>Listeria monocytogenes</i> . Afectó el crecimiento de bacterias ácido lácticas y de bacterias aerobias totales | Han <i>et al.</i> (2014) |
| Orégano | Polipropileno | Resina polimérica altamente adsorbente | Efectivo en el control <i>in vitro</i> de <i>Escherichia coli</i> , <i>Salmonella Enteritidis</i> y <i>Penicillium spp.</i> | Passarinho <i>et al.</i> (2014) |
| Canela, orégano o zacate limón (20% p/p) | Material no textil | Resina polimérica altamente adsorbente | Los sachets (principalmente con aceite esencial de canela) demostraron una reducción en el crecimiento de mesófilos aerobios en papaya | Espitia <i>et al.</i> (2012) |
| Orégano o zacate limón (20% p/p) | Material no textil | Resina polimérica altamente adsorbente | Los sachets con aceites esenciales de orégano y zacate limón redujeron el conteo de mesófilos aerobios, mohos filamentosos y levaduras presentes en mango, en aproximadamente dos ciclos log | Medeiros <i>et al.</i> (2011) |
| Orégano | Papel | Micro-cápsulas de alcohol polivinílico (PVA) | Inhibición del crecimiento de <i>Dickeya chrysanthemi</i> , mohos, levaduras y bacterias mesófilas aerobias en lechuga iceberg | Chang <i>et al.</i> (2017) |

y del número de capas o poros del mismo (Otoni *et al.*, 2016). Los polímeros utilizados pueden ser de origen fósil y apolares, tales como polietileno de baja densidad y polipropileno (Solano y Gante, 2012; Almela, Ortolá, Tarrazó y Castelló, 2014); o bien de materiales renovables o biodegradables, tales como alginato, quitosano, κ -carragenina, almidones de diferentes orígenes, celulosa, gluten, proteína de suero de leche, proteína de soya, gelatina de piel de pescado, ácido poliláctico y poli(butileno adipato co-tereftalato), tal como se resume en la tabla III (Gómez-Heincke *et al.*, 2016; Quesada *et al.*, 2016; Ribeiro-Santos *et al.*, 2017a; Ribeiro-Santos *et al.*, 2017b; Riquelme, Herrera y Matiacevi, 2017; Takahashi *et al.*, 2017).

Los primeros son normalmente preparados por extrusión, ya sea que el aceite esencial haya sido añadido antes de la extrusión al polímero licuado, o posterior a la extrusión en la superficie de la película (Solano y Gante, 2012). Los segundos son, normalmente, obtenidos por el método de vaciado (*casting*),

ya que la mayoría son polímeros hidrofílicos. La concentración y las propiedades del aceite esencial afectan las propiedades físicas de la película y su permeabilidad al vapor de agua, oxígeno y dióxido de carbono, por lo que es importante la evaluación de las propiedades mecánicas y de barrera de las películas y recubrimientos activos (Ribeiro-Santos *et al.*, 2017a). Asimismo, el método utilizado en la elaboración de la película afecta su actividad antimicrobiana (Solano y Gante, 2012). Los aceites esenciales de tomillo, romero y canela han sido ampliamente aplicados en películas para el envasado de alimentos (tabla III).

Es importante mencionar que el uso de aceites esenciales combinado con sistemas de envasado activo es de especial interés para alimentos altamente porosos, dado que sus compuestos antimicrobianos volátiles son capaces de penetrar a profundidades que los antimicrobianos no volátiles no podrían (Han *et al.*, 2014).

Tabla III. Estudios sobre la combinación de aceites esenciales compuestos activos con sistemas de envasado activo tipo película y su efecto en la carga microbiana

| Aceites esenciales | Polímeros transportadores del aceite esencial | Observaciones | Referencias |
|--|--|---|-------------------------------|
| Tomillo | Polietileno de baja densidad | La adición del aceite esencial durante la extrusión fue efectiva contra el crecimiento microbiano | Solano y Gante (2012) |
| Tomillo | Quitosano | Eficaz contra levaduras, pero no contra mohos o bacterias | Quesada et al. (2016) |
| Orégano (1 a 2%) | Almidón de mandioca (58%), polibutileno adipato co-tereftalato (40%) y nanoarcilla (1 a 2%) | No se evaluó el efecto antimicrobiano | Takahashi et al. (2017) |
| Canela (<i>Cinnamomum cassia</i> 51% y <i>Cinnamomum zeylanicum</i> 34%) y romero (15%) | Proteína de suero de leche | 2.7 % de la mezcla de aceite esencial en la película fue suficiente para inhibir el crecimiento de <i>Penicillium</i> spp. | Ribeiro-Santos et al. (2017b) |
| Albahaca (<i>Ocimum basilicum</i>) (100% p/p) | Aislado de proteína de pescado combinado con gelatina de piel de pescado y nanopartículas de óxido de zinc | Rebanadas de lubina envueltas en la película presentaron menor crecimiento de bacterias psicrófilas, bacterias ácido lácticas, <i>Pseudomonas</i> o enterobacterias (comparativamente a la ausencia de aceite esencial y óxido de zinc) | Arfat et al. (2015) |
| Zacate limón (0.5%) | Quitosano (1%) | La adición del aceite esencial empeoró la antracnosis en pimiento-morrón | Ali et al. (2015) |
| Menta o tomillo | Quitosano y gelatina | Los aceites esenciales mejoraron la efectividad antimicrobiana de la película | Jovanovic et al. (2016) |
| Orégano | Gelatina de carpa plateada y quitosano | Aumentó la vida de anaquel de pescado. Actividad antimicrobiana contra <i>Escherichia coli</i> , <i>Staphylococcus aureus</i> y <i>Bacillus</i> spp. | Wu et al. (2014) |
| Orégano o canela | Quitosano | Inhibición de <i>Aspergillus niger</i> con 0.25% de aceite esencial y <i>Penicillium digitatum</i> con 0.5% | Avila-Sosa et al. (2012) |
| Orégano (4%) o canela (2%) | Amaranto | Inhibición de <i>A. nigery P. digitatum</i> | Avila-Sosa et al. (2012) |
| Carvacrol (6.5%) | EVOH | Migración rápida del carvacrol al salmón (en cubos o rebanadas) | Cerisuelo et al. (2013) |
| Linalol, carvacrol y timol | Almidón | Reducción de la población de <i>A. niger</i> en queso cheddar | Kuorwel et al. (2014) |

3.2 En sistemas de atmósfera modificada

La combinación de atmósferas modificadas con el potencial antimicrobiano de los aceites esenciales es un tema de considerable estudio en el ámbito del control de la calidad de diversos alimentos. De esta combinación resulta un efecto antimicrobiano sinérgico, por lo que se observa una mayor efectividad antimicrobiana comparativamente al uso de at-

mósferas modificadas de forma aislada (Turgis et al., 2008; Giarratana et al., 2016).

Tanto frutas y verduras, como carnes, han sido conservadas en atmósferas modificadas en presencia de aceites esenciales. En la tabla IV se presenta un conjunto de estudios recientes, relacionados con este tema.

Se puede observar que los aceites esenciales de tomillo, romero, mostaza, orégano y albahaca, combinados con atmósfera modificada, han sido extensamente utilizados en el control de mohos y bacterias en alimentos frescos (Karabagias, Ba-

deka y Kontominas, 2011; Nowak, Kalemba, Krala, Piotrowska y Czyzowska, 2012; Mpho, Sivakumar, Sellamuthu y Bautista-Baños, 2013; Giarratana *et al.*, 2016; Siriwardana *et al.*, 2017).

Tabla IV. Estudios sobre la combinación de aceites esenciales o compuestos activos de aceites esenciales con sistemas de envasado en atmósfera modificada

| Aceite esencial | Atmósfera modificada | Alimento fresco | Observaciones | Referencias |
|--|---|---|---|----------------------------------|
| Zacate limón | 20.17% O ₂ y 0.3% CO ₂ , 10 °C | Aguacate | Se redujo la incidencia de antracnosis (causada por <i>Colletotrichum gloeosporioides</i>), pulpa gris y pardeamiento vascular | Mpho <i>et al.</i> (2013) |
| Tomillo | 2% O ₂ y 8% CO ₂ , 10 °C | Aguacate | Se redujo la incidencia de antracnosis, pulpa gris y pardeamiento vascular | Sellamuthu <i>et al.</i> (2013) |
| Mostaza | 60% O ₂ , 30% CO ₂ y 10% N ₂ , 4 °C | Carne molida | Se redujo el crecimiento de bacterias mesófilas aerobias (combinado con radiaciones gamma) | Turgis <i>et al.</i> (2008) |
| Romero (0.2%) | 70.4% N ₂ , 27.1% CO ₂ y 1.3% O ₂ , 4 °C | Filetes de aves | Se redujo la población de <i>Salmonella Typhimurium</i> y <i>Listeria monocytogenes</i> en siete días | Kahraman <i>et al.</i> (2015) |
| Tomillo (0.025%) y romero (0.05%) | 70 % CO ₂ y 30% NO ₂ , 4 °C | Mortadela italiana rebanada | Efectivo bacteriostático contra un coctel de tres cepas de <i>L. monocytogenes</i> , durante 30 días | Giarratana <i>et al.</i> (2016) |
| Albahaca (0.4%) | 3.1 - 3.7% O ₂ y 4.2 - 4.7% CO ₂ , 12 - 14 °C | Plátano | Eficaz en el control de mohos responsables por la podredumbre de corona, durante 14 días (combinado con sulfato de aluminio) | Siriwardana <i>et al.</i> (2017) |
| Orégano (0.25%, p/v) | 30% CO ₂ y 70% NO ₂ , 4 °C | Filetes de pechugas de pollo | Aumentó la vida de anaquel de los filetes a 6 días | Petrou <i>et al.</i> (2012) |
| Tomillo, limón, semillas de toronja (<i>Citrus x paradisi</i>) (110, 120, 100 ppm) | 50% O ₂ y 50% CO ₂ , 4 °C | Hamburguesas de pescado azul | Garantizó la aceptabilidad microbiana durante 28 días | Nobile <i>et al.</i> (2009) |
| Ajo (<i>Allium sativum</i>) (15 mg/mL) | 60% CO ₂ y 40% N ₂ , 8 °C | Camarón blanco del pacífico | Aumentó la vida de anaquel de 6 a 18 días | Maneesin <i>et al.</i> (2014) |
| Cidro (<i>Citrum medica</i> /citral (125/125 mg/L) o Cidro/citral (200/50 mg/L) | 7% O ₂ y 0% CO ₂ , 6 °C | Manzana (<i>Golden delicious</i> spp.) | No se observaron mohos en 35 días | Siroli <i>et al.</i> (2014) |
| Romero | 50% O ₂ , 30% CO ₂ y 20% N ₂ , 4 °C | Bistec | Vida de anaquel de 14 o 15 días | Sirocchi <i>et al.</i> (2017) |
| Tomillo (0.1%) | 80% CO ₂ y 20% N ₂ , 4 °C | Carne de borrego | La vida de anaquel fue extendida entre 14 y 15 días | Karabagias <i>et al.</i> (2011) |

Tabla IV. Continuación. Estudios sobre la combinación de aceites esenciales o compuestos activos de aceites esenciales con sistemas de envasado en atmósfera modificada

| Aceite esencial | Atmósfera modificada | Alimento fresco | Observaciones | Referencias |
|---------------------------------------|--|--------------------------------|--|-----------------------------------|
| Tomillo (0.9%) | 30%O ₂ , 50%CO ₂ y 20% N ₂ , 3 °C | Carne de cerdo | El conteo de <i>Salmonella</i> se redujo de 6.16 log UFC ¹ /g (día 0) a 2.11 UFC ¹ /g (día 15) | Boskovic <i>et al.</i> (2017) |
| Tomillo, orégano o zacate limón | 100% CO ₂ , 4 °C | Col y brotes de rábano | Se disminuyeron, significativamente, los microorganismos mesófilos totales (nivel de reducción: 1.55 log ₁₀ UFC ¹ /g en la col y 2.26 log ₁₀ UFC ¹ /g en los brotes de rábano) | Hyun <i>et al.</i> (2015) |
| Orégano (5%) (en película de PP/EVOH) | 4% O ₂ y 12% CO ₂ | Ensalada mínimamente procesada | Se redujo la actividad de microorganismos patógenos y causantes de deterioro, principalmente de bacterias Gram-negativas | Muriel-Galet <i>et al.</i> (2012) |

1: Unidad formadora de colonia

La combinación de aceites esenciales con atmósferas modificadas puede inactivar parte de la carga microbiana inicial en carnes, lo que está relacionado con el aumento observado de su vida de anaquel, cuando se conservan bajo dicha combinación (Turgis *et al.*, 2008; Karabagias *et al.*, 2011; Petrou, Tsiraki, Giatrakou y Savvaidis, 2012; Maneesin *et al.*, 2014; Sirocchi *et al.*, 2017). Asimismo, esta combinación reduce la carga microbiana en frutas y verduras y, consecuentemente, la incidencia de enfermedades tales como la antracnosis (Muriel-Galet *et al.*, 2012; Mpho *et al.*, 2013; Sellamuthu *et al.*, 2013). En este sentido, Mpho *et al.* (2013) observaron un retraso en la maduración de aguacate al combinar el aceite esencial de romero con atmósfera modificada, lo que atribuyeron al control de la antracnosis en la fruta conservada bajo tales condiciones.

La composición de la atmósfera utilizada varía con el tipo de alimento a envasar, pero también con el aceite esencial utilizado. Se observa que las atmósferas son en la mayoría escasas en oxígeno. Sin embargo, hay estudios donde se usan concentraciones del orden de 60 %. El dióxido de carbono, por otro lado, puede tanto no estar presente como constituir la totalidad de la atmósfera.

Además de contribuir con el control del deterioro microbiano, la combinación de atmósfera modificada con aceites esenciales ha permitido controlar o disminuir procesos que afectan la calidad de alimentos frescos, tales como la deshidratación de frutas (Mpho *et al.*, 2013), y el desarrollo de rancidez en carnes (Kahraman *et al.*, 2015).

Conclusiones y comentarios finales

La presente revisión reúne información que demuestra una notoria efectividad antimicrobiana de aceites esenciales contra mohos y bacterias. La mayoría de los estudios de efectividad antimicrobiana de aceites esenciales son, sin embargo, realizados *in vitro* y no en alimentos. Los resultados obtenidos *in vitro* son indiscutiblemente importantes, lo que no invalida la necesidad de pruebas en alimentos, para que se obtenga una mejor representación de las condiciones reales de acción, de los aceites esenciales sobre los microorganismos.

La aplicación de aceites esenciales a sistemas de envasado activo ha resultado exitosa en el control microbiano y se han observado notorios avances en la incorporación de aceites esenciales en películas. Sin embargo, en el caso de la incorporación de aceites esenciales en *sachets*, son necesarios estudios adicionales, ya que la información sobre este tema es escasa. De aquí que constituya una oportunidad de investigación en ciencia de alimentos.

Al revisar el estado del conocimiento acerca de la combinación de aceites esenciales con el envasado en atmósfera modificada, se encuentran estudios tanto sobre la conservación de frutas y verduras como de carnes frescas. En dichas investigaciones, diferentes aceites esenciales y condiciones de atmósfera modificada han sido aplicados exitosamente en el control microbiano de este tipo de alimentos.

En conclusión, tanto la combinación de aceites esenciales con sistemas de envasado activo como con sistemas de envasado en atmósfera modificada representan soluciones potenciales para la mitigación del deterioro microbiano de alimentos frescos.

Agradecimientos

La autora M. J. Paris agradece a la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP) y a la Secretaría de Relaciones Exteriores (SRE) de México, por financiar sus estudios de doctorado en Ciencia de Alimentos.

Referencias

- Aguilar-González, A. E., Palou, E. y López-Malo, A. (2015). Antifungal activity of essential oils of clove (*Syzygium aromaticum*) and/or mustard (*Brassica nigra*) in vapor phase against gray mold (*Botrytis cinerea*) in strawberries. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 32, 181-185.
- Ali, A., Noh, N. M. y Mustafa, M. A. (2015). Antimicrobial activity of chitosan enriched with lemongrass oil against anthracnose of bell pepper. *Food Packaging and Shelf Life*, 3, 56-61.
- Almela, C., Ortolá, M. D., Tarrazó, J. y Castelló, M. L. (2014). Effect of the application of thyme and lemon essential oils in packaging of minimally processed persimmon. *International Food Research Journal*, 21(6), 2315-2323.
- Arfat, I. A., Benjakul, S., Vongkamjan, K., Sumpavapol, P. y Yarnpakdee, S. (2015). Shelf-life extension of refrigerated sea bass slices wrapped with fish protein isolate/fish skin gelatin-ZnO nanocomposite film incorporated with basil leaf essential oil. *Journal of Food Science and Technology*, 52(10), 6182-6193.
- Assefa, Z. y Admassu, S. (2013). Development and characterization of antimicrobial packaging films. *Journal of Food Processing and Technology*, 4(6), 235-241.
- Atares, L. y Chiralt, A. (2016). Essential oils as additives in biodegradable films and coatings for active food packaging. *Trends in Food Science and Technology*, 48, 51-62.
- Avila-Sosa, R., Palou, E., Jiménez Munguía, M. T., Navarro Cruz, A. R. y López-Malo, A. (2012). Antifungal activity by vapor contact of essential oils added to amaranth, chitosan, or starch edible films. *International Journal of Food Microbiology*, 153, 66-72.
- Biji, K. B., Ravishankar, C. N., Mohan, C. O. y Srinivasa Gopal, T. K. (2015). Smart packaging systems for food applications: a review. *Journal of Food Science and Technology*, 52(19), 6125-6135.
- Boskovic, M., Djordjevic, J., Ivanovic, J., Janjic, J., Zdravkovic, N., Glisic, M., Glamoclija, N., Baltic, B., Djordjevic, V. y Baltic, M. (2017). Inhibition of *Salmonella* by thyme essential oil and its effect on microbiological and sensory properties of minced pork meat packaged under vacuum and modified atmosphere. *International Journal of Food Microbiology*, 258, 58-67.
- Cerisuelo, J. P., Bermúdez, J. M., Aucejo, S., Catalá, R., Gavara, R. y Hernández-Muñoz, P. (2013). Describing and modeling the release of an antimicrobial agent from an active PP/EVOH/PP package for salmon. *Journal of Food Engineering*, 116, 352-361.
- Chang, Y., Choi, I., Cho, A. R. y Han, J. (2017). Reduction of *Dickeya chrysanthemi* on fresh-cut iceberg lettuce using antimicrobial sachet containing microencapsulated oregano essential oil. *LWT - Food Science and Technology*, 82, 361-368.
- Charles, F., Sanchez, J. y Gontard, N. (2006). Absorption kinetics of oxygen and carbon dioxide scavengers as part of active modified atmosphere packaging. *Journal of Food Engineering*, 72, 1-7.
- Cortellino, G., Gobbi, S., Bianchi, G. y Rizzolo, A. (2015). Modified atmosphere packaging for shelf life extension of fresh-cut apples. *Trends in Food Science and Technology*, 46, 320-330.
- Duran, M., Aday, M. S., Zorba, N. N. D., Temizkan, R., Büyükanç, M. B. y Caner, C. (2016). Potential of antimicrobial active packaging 'containing natamycin, nisin, pomegranate and grape seed extract in chitosan coating' to extend shelf life of fresh strawberry. *Food and Bioproducts Processing*, 98, 354-363.
- Espitia, P. J. P., Soares, N. F. F., Botti, L. C. M., Melo, N. R., Pereira, O. L. y Silva, W. A. (2012). Assessment of the efficiency of essential oils in the preservation of postharvest papaya in an antimicrobial packaging system. *Brazilian Journal of Food Technology*, 15(4), 307-316.
- Gammariello, D., Incoronato, A. L., Conte, A. y Nobile, M. A. (2015). Use of antimicrobial treatments and modified atmosphere to extend the shelf life of fresh sausages. *Journal of Food Processing and Technology*, 6(6), 1-7.
- García-Ceja, A. y López-Malo, A. (2012). Biopolímeros utilizados en la encapsulación. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, 6(1), 84-97.
- Gazalli, H., Malik, A. H., Jalal, H., Afshan, S., Mir, A. y Ashraf, H. (2013). Packaging of meat. *International Journal of Food Nutrition and Safety*, 4(2), 70-80.
- Giarratana, F., Muscolino, D., Ragones, C., Beninati, C., Sciarrone, D., Ziino, G., Mondello, L., Giuffrida, A. y Panebianco, A. (2016). Antimicrobial activity of combined thyme and rosemary essential oils against *Listeria monocytogenes* in Italian mortadella packaged in modified atmosphere. *Journal of Essential Oil Research*, 28(1), 1-6.

- Research*, 28(6), 467-474.
- Gomes, M. S., Cardoso, M. G., Guimarães, A. C. G., Guerreiro, A. C., Gago, C. M. L., Boas, E. V. B. V., Dias, C. M. B., Manhita, A. C. C., Faleiro, M. L., Miguel, M. G. C. y Antunes, M. D. C. (2017). Effect of edible coatings with essential oils on the quality of red raspberries over shelf-life. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97, 929-938.
- Gómez-Heincke, D., Martínez, I., Partal, P., Guerrero, A. y Gallegos, C. (2016). Development of antimicrobial active packaging materials based on gluten proteins. *Science of Food and Agriculture*, 96, 3432-3438.
- Han, J. H., Patel, D., Kim, J. E. y Min, S. C. (2014). Retardation of *Listeria monocytogenes* growth in mozzarella cheese using antimicrobial sachets containing rosemary oil and thyme oil. *Journal of Food Science*, 79(11), E2272-E2278.
- Hodges, D. M. y Toivonen, P. M. A (2008). Quality of fresh-cut fruits and vegetables as affected by exposure to abiotic stress. *Postharvest Biology and Technology*, 48, 155-162.
- Hyun, J. E., Bae, W. M., Yoon, J. H. y Lee, S. Y. (2015). Preservative effectiveness of essential oils in vapor phase combined with modified atmosphere packaging against spoilage bacteria on fresh cabbage. *Food Control*, 51, 307-313.
- Jovanovic, G. D., Klaus, A. S. y Niksic, M. P. (2016). Antimicrobial activity of chitosan films with essential oils against *Listeria monocytogenes* on cabbage. *Jundishapur Journal of Microbiology*, 9(9), 1-6.
- Kahraman, T., Issa, G., Bingol, E. B., Kahraman, B. B. y Dumen, E. (2015). Effect of rosemary essential oil and modified-atmosphere packaging (MAP) on meat quality and survival of pathogens in poultry fillets. *Brazilian Journal of Microbiology*, 46(2), 591-599.
- Karabagias, I., Badeka, A. y Kontominas, M. G. (2011). Shelf life extension of lamb meat using thyme or oregano essential oils and modified atmosphere packaging. *Meat Science*, 88, 109-116.
- Khaledi, N., Taheri, P. y Tarighi, S. (2015). Antifungal activity of various essential oils against *Rhizoctonia solani* and *Macrophomina phaseolina* as major bean pathogens. *Journal of Applied Microbiology*, 118(3), 704-717.
- Kuorwel, K. K., Cran, M. J., Sonneveld, K., Miltz, J. y Bigger, S. W. (2014). Evaluation of antifungal activity of antimicrobial agents on cheddar cheese. *Packaging Technology and Science*, 27(1), 49-58.
- Mahajan, P. V., Caleb, O. J., Singh, Z., Watkins, C. B. y Geyer, M. (2014). Postharvest treatments of fresh produce. *Philosophical Transaction of the Royal Society A*, 372, 1-19.
- Maisanaba, S., Llana-Ruiz-Cabello, M., Gutiérrez-Praena, D., Pichardo, S., Puerto, M., Prieto, A. I., Jos, A. y Cameán, A. M. (2017). New advances in active packaging incorporated with essential oils or their main components for food preservation. *Food Review International*, 33(5), 447-515.
- Maneesin, P., Chinnasri, N., Vongsawasdi, P. y Wangchanachai, G. (2014). Effect of garlic oil and modified atmosphere packaging on the quality of chilled shrimp. *Packaging Technology and Science*, 27, 376-383.
- Manohar, C. M., Prabhawathi, V., Sivakumar, P. M. y Doble, M. (2015). Design of a papain immobilized antimicrobial food package with curcumin as a crosslinker. *Plos One*, 10(4), 1-17.
- Medeiros, E. A. A., Soares, N. F. F., Polito, T. O. S., Sousa, M. M. y Silva, D. F. P. (2011). Sachês antimicrobianos em pós-colheita de manga. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 33, 363-370.
- Mejía-Garibay, B., Palou, E y López-Malo, A. (2015). Composition, diffusion, and antifungal activity of black mustard (*Brassica nigra*) essential oil when applied by direct addition or vapor phase contact. *Journal of Food Protection*, 78(4), 843-848.
- Mele, M. A., Islam, M. Z., Baek, J. P. y Kang, H. M. (2017). Quality, storability, and essential oil content of *Ligularia fischeri* during modified atmosphere packaging storage. *Journal of Food Science and Technology*, 54(3), 743-750.
- Mpho, M., Sivakumar, D., Sellamuthu, P. S. y Bautista-Baños, S. (2013). Use of lemongrass oil and modified atmosphere packaging on control of anthracnose and quality maintenance in avocado cultivars. *Journal of Food Quality*, 36, 198-208.
- Muriel-Galet, V., Cerisuelo, J. P., López-Carballo, G., Lara, M., Gavara, R. y Hernández-Muñoz, P. (2012). Development of antimicrobial films for microbiological control of packaged salad. *International Journal of Food Microbiology*, 157(2), 195-201.
- Nobile, M. A., Corbo, M. R., Speranza, B., Sinigaglia, M., Conte, A. y Caroprese, M. (2009). Combined effect of MAP and active compounds on fresh blue fish burger. *International Journal of Food Microbiology*, 135, 281-287.
- Nowak, A., Kalemba, D., Krala, L., Piotrowska, M. y Czyzowska, A. (2012). The effects of thyme (*Thymus vulgaris*) and rosemary (*Rosmarinus officinalis*) essential oils on *Brochothrix thermosphacta* and on the shelf life of beef packaged in high-oxygen modified atmosphere. *Food Microbiology*, 32, 212-216.
- Oliveira, M., Abadias, M., Usall, J., Torres, R., Teixido, N. y Viñas, I. (2015). Application of modified atmosphere packaging as a safety approach to fresh-cut fruits and vegetables: A

- review. *Trends in Food Science and Technology*, 46, 13-26.
- Otoni, C. G., Espitia, P. J. P., Avena-Bustillos, R. J. y McHugh, T. H. (2016). Trends in antimicrobial food packaging systems: Emitting sachets and absorbent pads. *Food Research International*, 83, 60-73.
- Passarinho, A. T. P., Dias, N. F., Camilloto, G. P., Cruz, R. S., Otoni, C. G., Morales, A. R. F. y Soares, N. F. F. (2014). Sliced bread preservation through oregano essential oil-containing sachet. *Journal of Food Process Engineering*, 37, 53-62.
- Petrou, S., Tsiraki, M., Gitrakou, V. y Savvaidis, I. N. (2012). Chitosan dipping or oregano oil treatments, singly or combined on modified atmosphere packaged chicken breast meat. *International Journal of Food Microbiology*, 156, 264-271.
- Quesada, J., Sendra, E., Navarro, C. y Sayas-Barberá, E. (2016). Antimicrobial active packaging including chitosan films with *Thymus vulgaris* L. essential oil for ready-to-eat meat. *Foods*, 5(3), 1-13.
- Reyes-Jurado, F., Franco-Vega, A., Ramírez-Corona, N., Palou, E. y López-Malo, A. (2015). Essential Oils: Antimicrobial activities, extraction methods, and their modeling. *Food Engineering Reviews*, 7, 275-297.
- Ribeiro-Santos, R., Andrade, M., de Melo, N. R. y Sanches-Silva, A. (2017a). Use of essential oils in active food packaging: Recent advances and future trends. *Trends in Food Science and Technology*, 61, 132-140.
- Ribeiro-Santos, R., Sanches-Silva, A., Motta, J. F. G., Andrade, M., Neves, I. A., Teófilo, R. F., de Carvalho, M. G. y de Melo, N. R. (2017b). Combined use of essential oils applied to protein base active food packaging: study in vitro and in a food simulant. *European Polymer Journal*, 93, 75-86.
- Riquelme, N., Herrera, M. L. y Matiacevi, S. (2017). Active films based on alginate containing lemongrass essential oil encapsulated: Effect of process and storage conditions. *Food and Bioproducts Processing*, 104, 94-103.
- Scetar, M., Kurek, M. y Galic, K. (2010). Trends in fruit and vegetable packaging - a review. *Croatian Journal of Food Technology, Biotechnology and Nutrition*, 5(3-4), 69-86.
- Schmid, M., Saengerlaub, S. y Mueller, K. (2016). Packaging concepts for fresh meat: a brief overview. *Austin Food Science*, 1(1), 1-3.
- Sefu, G., Satheesh, N. y Berecha G. (2015). Antifungal activity of ginger and cinnamon leaf essential oils on mango anthracnose disease causing fungi (*C. gloeosporioides*). *Carpathian Journal of Food Science and Technology*, 7(2), 26-34.
- Sellamuthu, P. S., Mafune, M., Sivakumar, D. y Soundy, P. (2013). Thyme oil vapour and modified atmosphere packaging reduce anthracnose incidence and maintain fruit quality in avocado. *Journal of Science of Food and Agriculture*, 93(12), 3024-3031.
- Sen, C., Mishra, H. N. y Srivastav, P. P. (2012). Modified atmosphere packaging and active packaging of banana (*Musa spp.*): a review on control of ripening and extension of shelf life. *Journal of Stored Products and Postharvest Research*, 3(9), 122-132.
- Severino, R., Ferrari, G., Vu, K. D., Donsì, F., Salmieri, S. y Lacroix, M. (2015). Antimicrobial effects of modified chitosan-based coating containing nanoemulsion of essential oils, modified atmosphere packaging and gamma irradiation against *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella Typhimurium* on green beans. *Food Control*, 50, 215-222.
- Siriwardana, H., Abeywickrama, K., Kannangara, S., Jayawardena, B. y Attanayake, S. (2017). Basil oil plus aluminum sulfate and modified atmosphere packaging controls Crown rot disease in Embul banana (*Musa acuminata*, AAB) during cold storage. *Scientia Horticulturae*, 217, 84-91.
- Sirocchi, V., Devlieghere, F., Peelman, N., Sagratini, G., Maggi, F., Vittori, S. y Ragaert, P. (2017). Effect of *Rosmarinus officinalis* L. essential oil combined with different packaging conditions to extend the shelf life of refrigerated beef meat. *Food Chemistry*, 221, 1069-1076.
- Siroli, L., Patrignani, F., Serrazanetti, D. I., Tabanelli, G., Montanari, C., Tappi, S., Rocculi, P., Gardini, F. y Lanciotti, R. (2014). Efficacy of natural antimicrobials to prolong the shelf-life of minimally processed apples packaged in modified atmosphere. *Food Control*, 46, 403-411.
- Solano, A. C. V. y Gante, C. R. (2012). Two different processes to obtain antimicrobial packaging containing natural oils. *Food Bioprocess Technology*, 5, 2522-2528.
- Soltani, M., Mobli, H., Alimardani, R. y Mohtasebi, S. S. (2015). Modified atmosphere packaging: A progressive technology for shelf-life extension of fruits and vegetables. *Journal of Applied Packaging Research*, 7(3), 33-59.
- Takahashi, G., Barbosa, H. D., Bergamasco, R., Madrona, G., Tonon, L. C., Yamashita, F. y Scapim, M. (2017). Development and active biodegradable film evaluation incorporated with oregano essential oil and nanoclay. *Chemical Engineering Transactions*, 57, 403-408.
- Trindade, M. A., Villanueva, N. D. M. y Antunes, C. V. (2013). Active packaged lamb with oxygen scavenger/carbon dioxide emitter sachet: physical-chemical and

- microbiological stability during refrigerated storage. *Brazilian Journal of Food Technology*, 16(3), 216-225.
- Turgis, M., Han, J., Borsa, J. y Lacroix, M. (2008). Combined effect of natural essential oils, modified atmosphere packaging, and gamma radiation on the microbial growth on ground beef. *Journal of Food Protection*, 71, 1237-1243.
- Velázquez-Nuñez, M. J., Avila-Sosa, R., Palou, E. y López-Malo, A. (2013). Antifungal activity of orange (*Citrus sinensis* var. Valencia) peel essential oil applied by direct addition or vapor contact. *Food Control*, 31, 1-4.
- Vesaltalab, Z., Gholami, M. y Zafari, D. (2012). Clove buds (*Eugenia caryophyllata*) and rosemary (*Rosmarinus officinalis*) essential oils effects on control of grapes gray mold in-vitro. *Annals of Biological Research*, 3(5), 2447-2453.
- Wang, H. J., An, D. S., Rhim, J. W. y Lee, D. S. (2017). Shiitake mushroom packages tuned in active CO₂ and moisture absorption requirements. *Food Packaging and Shelf Life*, 11, 10-15.
- Wu, J., Ge, S., Liu, H., Wang, S., Chen, S., Wang, J., Li, J. y Zhang, Q. (2014). Properties and antimicrobial activity of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) skin gelatin-chitosan films incorporated with oregano essential oil for fish preservation. *Food Packaging and Shelf Life*, 2(1), 7-16.
- Wyrwa, J. y Barska, A. (2017). Innovations in the food packaging market: active packaging. *European Food Research and Technology*, 243, 1681-1692.

Antimicrobianos en productos de carne de ave listos para el consumo

L. Lastra-Vargas*, A. López-Malo y E. Palou-García

*Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental, Universidad de las Américas Puebla. Ex hacienda Santa Catarina Mártir, C.P. 72810, San Andrés Cholula, Puebla, México.
Programa de Doctorado en Ciencia de Alimentos*

Resumen

Los productos cárnicos de origen avícola listos para el consumo, como las carnes frías, se han relacionado con riesgos asociados a enfermedades transmitidas por el consumo de alimentos, especialmente cuando son rebanados en el punto de venta. Este riesgo ha disminuido al utilizar compuestos antimicrobianos como ingredientes en la formulación de los diferentes productos. Sin embargo, la demanda de los consumidores por productos tanto nutritivos como sanos, de origen «natural», con ingredientes conocidos y que cumplan con las exigencias de una «etiqueta limpia» ha llevado a la búsqueda y validación de compuestos que cumplan con estas exigencias, y que, además, sean capaces de limitar y/o evitar el crecimiento de bacterias patógenas. En este artículo se describen tanto los antimicrobianos comúnmente utilizados en productos cárnicos listos para el consumo de origen avícola, como aquellos que se han sugerido como sustitutos de los anteriores.

Palabras clave: productos cárnicos avícolas · carnes frías · antimicrobianos · etiqueta limpia

Abstract

Ready-to-eat poultry products like turkey ham or chicken or turkey *deli* style products have been implicated in the risk of foodborne diseases especially when sliced at retail points. This risk has been diminished by the addition of antimicrobial compounds as ingredients in the product formulation. However, consumer demand for healthy, nutritive, «natural» products with familiar ingredients that meet the «clean label» criteria, has led to the search and validation of alternative compounds that, at the same time, can limit or avoid the growth of pathogenic bacteria as effectively as the synthetic additives commonly used by the industry. This review is about the commonly used antimicrobials, as well as those proposed as alternatives to be used in ready-to-eat poultry meat products.

Key words: rte poultry products · deli meats · antimicrobials · clean-label

* Programa de Doctorado
en Ciencias de Alimentos
Tel: +52 222 229 2126
Dirección electrónica:
leonor.lastrav@udlap.mx
maria.barcenas@udlap.mx

Introducción

Desde tiempos prehistóricos han existido diferentes maneras de preservar los alimentos para que puedan ser consumidos en un tiempo futuro, es decir, para prolongar su vida de anaquel. Entre estos, los métodos principales han sido: secado, enfriamiento, calentamiento y fermentación. Otro método importante ha sido el uso de preservativos químicos como la sal, los nitritos y sulfitos. Actualmente se espera que los alimentos se encuentren disponibles a lo largo del año, libres de patógenos y con una vida de anaquel razonablemente larga, por lo que el uso de preservativos químicos ha aumentado. Los antimicrobianos son preservativos químicos que juegan un papel importante en el cumplimiento de los requisitos anteriores ya que su función tradicional ha sido el prolongar la vida de anaquel y conservar la calidad de los alimentos al inhibir el crecimiento de microorganismos causantes del deterioro. Además, su utilización como intervención principal para la inhibición o inactivación de microorganismos patógenos ha ido en aumento (Davidson y Branen, 2005). Los agentes antimicrobianos pueden ser tanto de origen sintético como natural. Estos últimos se encuentran presentes en las plantas y animales, o son producidos por microorganismos. Aquellos que poseen nombres fácilmente reconocibles por la población en general, como los extractos de tomillo y romero, el orégano y el ajo, pueden ser utilizados en productos etiquetados como «naturales» de acuerdo con los estándares de etiquetado de la FSIS (21 CFR 101.22) (McDonnell *et al.*, 2013; Grant y Parveen, 2017).

Los productos cárnicos listos para el consumo, como las carnes frías de origen porcino, bovino o avícola, son una clase importante de alimentos producidos y consumidos alrededor del mundo debido a su conveniencia (Horita *et al.*, 2018). Dentro del contexto de estos productos, la utilización de compuestos antimicrobianos es de gran importancia. A pesar de que se han hecho esfuerzos en el mejoramiento de la higiene y técnicas de producción en todas las etapas de su procesamiento, aún existen en todo el mundo, y durante todo el año, brotes de enfermedades causadas por patógenos transmitidos por el consumo de carnes frías (Bošković *et al.*, 2013). Las bacterias *Listeria monocytogenes* y *Salmonella enterica* serovar Typhimurium han sido particularmente asociadas a algunos de estos brotes (Casco, Taylor y Alvarado, 2015). En un estudio de evaluación de riesgo supervisado por el Servicio de Inspección y Seguridad Alimentaria de Estados Unidos, FSIS, se predice que, de los casos de enfermedad y muerte por la ingesta de la bacteria *L. monocytogenes*, alrededor del 70% serían causados por la ingesta de ésta en carnes frías que no contengan antimicrobianos y que sean rebanadas en el punto de venta (Quesenberry *et al.*, 2010).

Por otro lado, de las carnes frías, son las de origen avícola unas de las más consumidas en los Estados Unidos (Statista, 2017) y México, siendo que, en este último país, la tendencia de consumo va en aumento (Consejo Mexicano de la Carne, 2012).

Por todo lo anterior, la presente revisión tratará de los antimicrobianos utilizados como ingredientes en la formulación de carnes frías de origen avícola. Se abordarán tanto los comúnmente utilizados como aquellos que se proponen por ser reconocidos como «naturales» para satisfacer las demandas actuales de los consumidores por productos de «etiqueta limpia».

Revisión bibliográfica

1. Productos cárnicos avícolas listos para el consumo: generalidades

Los productos cárnicos avícolas listos para el consumo son aquellos preparados a partir de carne de ave, como el pollo o pavo, ejemplos son el jamón y salchicha, y otros productos de estilo *deli*. Su particularidad es que se procesan de tal manera que pueden ser consumidos sin ninguna preparación adicional que garantice su seguridad, como la cocción o el lavado. De esta manera, deben mantenerse en refrigeración para limitar el crecimiento de bacterias causantes del deterioro y/o patógenas. Estos productos se conocen como carnes frías, las cuales se pueden encontrar empacadas en paquetes de rebanadas individuales o como piezas grandes que se rebanan en el punto de venta justo antes de ser entregados al consumidor (Jiang y Youling, 2015). Al estar listos para el consumo no es necesario que porten una etiqueta con instrucciones para un manejo seguro como es el caso de las carnes congeladas (FSIS, 2012).

En México, el volumen de producción del jamón y salchicha de pavo tuvo una tendencia general al aumento entre los años 2005 y 2016, habiendo en 2005 un volumen de producción de 290 000 toneladas totales, de las cuales 117 corresponden a jamón y 173 a salchicha, mientras que en 2016 el volumen de producción fue de 500 000 toneladas de las cuales 202 fueron de jamón y 298 de salchicha. Para el 2016, los embutidos (jamón y salchicha) y otros productos procesados de carnes de ave representaron el 48% del total de la producción de productos cárnicos procesados siendo que el 33% lo representaron otras carnes frías y embutidos, y el 21%, los jamones de carnes rojas. Los productos procesados de ave (chorizo, jamón, nuggets, salchicha, mortadela, etcétera) tienen la mayor participación del gasto del total de la carne procesada, siendo ésta de un 22%, seguida de chorizo y longaniza con un 19% y el

jamón de carne de puerco en tercer lugar con un 15%; los principales lugares de preferencia de compra son las tiendas de abarrotes (33%), los supermercados (29%), las carnicerías y loncherías (19%) y el mercado (11%) (Consejo Mexicano de la Carne, 2012).

Zhang, Moosekian, Todd y Ryser (2012) realizaron una investigación con productos procesados de pavo listos para el consumo que contenían o no inhibidores del crecimiento bacteriano y que son rebanados en el punto de venta. Estos fueron inoculados con un coctel de ocho cepas de *L. monocytogenes* y sometidos a diferentes temperaturas de almacenamiento. Al cuantificar el crecimiento bacteriano, tanto de *L. monocytogenes* como de bacterias ácido-lácticas y de bacterias aerobias mesófilas, los autores proponen que la fecha de caducidad para las carnes frías preparadas sin inhibidores del crecimiento bacteriano deber ser de no más de cinco días después de su venta al consumidor, manteniendo las condiciones adecuadas de refrigeración.

2. Antimicrobianos comúnmente utilizados en carnes frías de origen avícola

La carne y sus productos, independientemente de la especie, contienen las cantidades adecuadas de agua, proteínas y nutrientes esenciales, así como un pH favorable para el crecimiento microbiano. Las principales bacterias patógenas asociadas a la carne y sus productos son *Salmonella* spp., *Campylobacter jejuni* termofílica, *Escherichia coli* entero-hemorrágica O157:H7, *Clostridium perfringens*, *Clostridium botulinum*, *L. monocytogenes*, *Staphylococcus aureus*, *Bacillus cereus* y *Yersinia enterocolitica* (Woraprayote et al., 2016). En el contexto de los productos listos para el consumo tanto cárnicos como avícolas, de acuerdo con la FSIS, un agente antimicrobiano es una sustancia que se encuentra en, o es adicionada a un producto listo para el consumo de carne o ave que tiene el efecto de reducir o eliminar microorganismos, así como de suprimir o limitar su crecimiento a lo largo de la vida de anaquel del producto (FSIS, 2012). Éstos han sido ampliamente utilizados para la inactivación de microorganismos, principalmente patógenos, ya que tienen efectos tanto durante, como después del procesamiento, incrementando de esta manera la vida de anaquel y seguridad de los productos (Woraprayote et al., 2016).

2.1 Ácidos orgánicos y sus sales

De los antimicrobianos considerados como sintéticos, las sales de lactato son de las más utilizadas en productos cárnicos listos para el consumo. Esto se debe a que, además de restringir el crecimiento microbiano, especialmente de la contamina-

ción cruzada por *L. monocytogenes* durante el almacenamiento, y prolongar de esta manera la vida de anaquel de los productos cuando son adicionados a las concentraciones adecuadas, la calidad de la carne y sus atributos sensoriales no se ven afectados o el efecto es mínimo. Se ha observado un efecto sinérgico en combinación con sales de diacetato (Zhu, Du, Cordray y Uk Ahn, 2005) y en presencia de nitrito (McDonnell, Glass y Sindelar, 2013). Los niveles máximos permitidos para uso como inhibidores del crecimiento en la formulación de productos cárnicos y avícolas listos para el consumo son 4.8 % (p/p) para el lactato de potasio y lactato de sodio, y 0.25% (p/p) para el diacetato de sodio (9 CFR 424.21) (FSIS, 2016; Zhang, et al., 2012). Tanto el lactato de sodio como el lactato de potasio y el diacetato de sodio son capaces de disminuir la actividad de agua y el pH del producto e interferir con el metabolismo bacteriano presuntamente por medio de la acidificación del interior de la célula y algún efecto específico de la forma no disociada del ácido sobre la actividad metabólica (Lloyd et al., 2009).

Los investigadores Zhang et al. (2012) estudiaron el crecimiento de *L. monocytogenes* en productos listos para el consumo de carne de pavo, tanto curados como no curados y en presencia o ausencia de lactato y/o diacetato, simulando el almacenamiento en casa del producto que es rebanado en el punto de venta. De esta manera, se determinaron los niveles de exposición del patógeno a los que pueden estar expuestos los consumidores. Se encontró que, en concordancia con reportes anteriores para otro tipo de productos cárnicos listos para el consumo, la presencia de lactato y/o diacetato retrasa de manera efectiva el crecimiento de *L. monocytogenes*. Estos productos, en la ausencia de inhibidores del crecimiento bacteriano, pueden ser potencialmente peligrosos a los 5-7 días de almacenamiento a 4°C y a los 2-4 días de almacenamiento a 7-10°C; ya que hasta estos tiempos es posible alcanzar una concentración bacteriana de 100 UFC/g.

Se ha encontrado que, para el caso del lactato de potasio, concentraciones mayores al 2% generan sabores desagradables (Casco et al., 2015). Por otro lado, la eficacia tanto del lactato como el diacetato, y en general de cualquier antimicrobiano, depende del tipo de carne con el que se elabore el producto, de las características de éste (pH, actividad de agua, presencia de nitritos, etcétera), de la temperatura de almacenamiento, y de la concentración y combinación del/los antimicrobianos utilizados (McDonnell et al., 2013; Porto-Fett et al., 2015). Además, se ha observado que estas sales de ácidos orgánicos son menos efectivas en productos no curados que en productos formulados con nitritos (Glass, McDonnell, Rasel

y Zierke, 2007; Porto-Fett *et al.*, 2015) y su incorporación a los productos cárnicos listos para el consumo puede incrementar la ingesta diaria de sodio, particularmente en el caso del lactato de sodio (Glass, McDonnell, VonTayson, Wanless y Badvela, 2013; Porto-Fett *et al.*, 2015). En este sentido, se han hecho estudios para validar la utilización de otros compuestos capaces de sustituir a los ya mencionados.

Porto-Fett *et al.* (2015) evaluaron la efectividad del levulinato de potasio, por sí mismo o en una mezcla con propionato de potasio y diacetato de potasio, utilizados como ingredientes, para el control de la contaminación posproceso por *L. monocytogenes* en pechuga de pavo no curada, como alternativa a la mezcla de lactato de potasio y diacetato de sodio, el estándar actual de la industria. Los autores reportan que el levulinato de potasio (1%) logró, al igual que la mezcla de lactato de potasio y diacetato de sodio, suprimir el crecimiento, durante 63 días de almacenamiento a 4°C, de un coctel de *L. monocytogenes* (3.5 log UFC/rebanada) inoculado en el producto terminado. Además, se encontró que, a diferencia de la mezcla de lactato de potasio (1.8%) y diacetato de sodio (0.125%), la mezcla de propionato de potasio (0.1%) y diacetato de potasio (0.1%) fue significativamente menos efectiva ($p \geq 0.01$); sin embargo, se observó un efecto sinérgico cuando fue utilizada en combinación con levulinato de potasio (1.0, 1.5 o 2.0%). Esta última mezcla fue tan efectiva como la utilización de lactato de potasio y diacetato de sodio. En los productos formulados sin antimicrobianos, los niveles de *L. monocytogenes* incrementaron a 10 log UFC/g a los 75 días de almacenamiento a 4°C. Se menciona que los resultados reportados estuvieron en concordancia con los de otros autores en donde el levulinato de sodio (1.0 y 2%) logró evitar el crecimiento del patógeno por 84 días en rollos de pechuga de pavo almacenados a 4°C.

En 2007, Glass, *et al.* demostraron la eficacia de los agentes antimicrobianos, sorbato, benzoato y propionato para la prevención del crecimiento de *L. monocytogenes* al ser incorporados a productos de pechuga de pavo estilo *deli* y almacenados a 4 y 7°C de 0 a 12 semanas. Cuando los productos fueron suplementados con propionato ≥ 0.2%, mezcla de propionato ≥ 0.1% más sorbato 0.1% o mezcla de lactato 3.2% más diacetato 0.2%, el crecimiento de *L. monocytogenes* se vio inhibido durante el almacenamiento por doce semanas a 4°C. Cuando los productos fueron almacenados a temperaturas de abuso, 7 y 10°C, la inhibición fue menos pronunciada o nula, respectivamente. Con tratamientos de sorbato 0.15% más propionato 0.15%, propionato 0.2%, propionato 0.3% y lactato 1.6% más diacetato 0.1%, se logró inhibir el crecimiento bacteriano por 4 semanas a 7°C. Para el 2013, los mismos investigadores, Glass *et al.*

probaron la eficacia de los agentes antimicóticos mencionados, pero a diferencia del trabajo anterior, los agentes se encontraban como parte de mezclas patentadas y fueron incorporados a productos curados. En esta ocasión, todas las concentraciones probadas (0.3, 0.4, o 0.5% de propionato de sodio pH 4.8-5.2 y 0.4% de mezcla de propionato de sodio más benzoato de sodio pH 4.8-5.2) resultaron en la restricción del crecimiento de *L. monocytogenes* a menos de un ciclo logarítmico a lo largo de nueve semanas de almacenamiento a 4°C. En contraste, el producto sin antimicrobianos permitió el rápido crecimiento de la bacteria a más de dos ciclos logarítmicos a las cuatro semanas de almacenamiento a la misma temperatura. A una temperatura de almacenamiento de 7°C, la inhibición fue menos pronunciada, pero se observó la misma tendencia.

2.2 Nitrito de sodio en productos curados

El proceso de curado de la carne era utilizado para extender la vida de anaquel de piezas enteras de carne aprovechando los efectos preservativos de altas concentraciones de sal común (NaCl) y en menor medida del nitrito de sodio (NaNO₂), ahora, con tecnologías de preservación como la refrigeración y congelación, este proceso se aplica principalmente para dar el color y sabor característicos de los productos curados (Heinz y Hautzinger, 2007).

Mulvey, Everis, Leeks, Hughes y Wood (2010) hacen una recopilación de varios estudios en los que se demostró que los nitritos son capaces de inhibir el crecimiento de las bacterias patógenas; *C. botulinum*, *C. perfringens*, *L. monocytogenes*, *Salmonella*, *E. coli* O157, *S. aureus*, *B. cereus* y *Shigella flexneri* en diferentes productos cárnicos curados, y se observa que su efecto depende tanto de la concentración inicial de nitritos adicionados al producto, como de su contenido residual (ya que la concentración de nitritos disminuye durante el proceso y almacenamiento) y es fuertemente influenciado por el contenido de sal, las condiciones de pH y la temperatura de almacenamiento del producto. En esta recopilación, Mulvey *et al.* (2010) hacen mención únicamente de un estudio en carne de ave realizado por los investigadores Sofos, Busta y Allen (1980). El producto modelo fue una emulsión de carne de pollo almacenado a una temperatura de abuso de 27°C y se encontró que el tiempo de producción de toxina por el microorganismo *C. botulinum* se duplicó con respecto al control cuando se adicionaron 156 mg/kg de nitrito. Los autores Myers, Montoya, Cannon, Dickson y Sebranek (2013) reportaron, en concordancia con otros autores, que, en productos tipo jamón de pechuga de pavo, la utilización de nitrito disminuye el crecimiento de *L. monocytogenes*, pero no lo detiene por completo. Se observó un menor

crecimiento de la bacteria en las muestras de producto curado con nitrito de sodio, en comparación con aquellas no curadas, a partir del día cinco de la evaluación hasta el día 28, siendo que el nitrito de sodio fue adicionado a una concentración de 200 ppm, y al día cero el contenido residual del mismo fue de 74 ppm y al día 28, de 52 ppm.

2.3 Antimicrobianos de origen natural y/o de etiqueta limpia

Debido a que las condiciones ácidas del estómago permiten la formación de compuestos carcinógenos a partir de iones de nitrito, desde la década de los sesenta se ha buscado reducir la cantidad utilizada de nitrito de sodio en productos cárnicos (Mulvey *et al.*, 2010). Por otro lado, en los últimos años también se ha buscado reducir la ingesta diaria de sodio por su riesgo asociado a enfermedades cardiovasculares, para lo cual, los esfuerzos se centran en la reducción de los niveles de sal (NaCl), utilizada en gran medida por sus propiedades de conservación de alimentos, en productos procesados (Bošković *et al.*, 2013). Aunado a esto, la percepción negativa por parte de los consumidores hacia los «agentes químicos» ha aumentado en conjunto con una demanda por productos «naturales», «orgánicos» y de «etiqueta limpia» (McDonnell *et al.*, 2013; Woraprayote *et al.*, 2016). De acuerdo con los estándares de etiquetado de la FSIS (21 CFR 101.22), para que un producto cárneo, ya sea de res, puerco o ave, se pueda etiquetar como «natural», éste no debe contener ningún saborizante artificial, ingrediente colorante ni ningún conservador químico, bajo esta definición, los nitritos son considerados como preservativos químicos. Por otro lado, estos mismos, junto con otros antimicrobianos sintéticos aprobados, comúnmente usados y efectivos en la inhibición del crecimiento de *L. monocytogenes*, se encuentran específicamente prohibidos en los productos etiquetados como «orgánicos» de acuerdo con el Acta de Producción de Alimentos Orgánicos del año 1990. Finalmente, un producto considerado como de «etiqueta limpia» debe tener ingredientes simples que sean fácilmente reconocidos por los consumidores y que se perciban como originarios de una fuente «no química», por ejemplo, el vinagre, metabolitos provenientes de la fermentación de azúcares e ingredientes provenientes de lácteos o de materiales vegetales (McDonnell *et al.*, 2013; Grant y Parveen, 2017). Los productores deben encontrar la manera de generar productos saludables y nutritivos, de etiqueta limpia y que cumplan con un periodo de vida de anaquel razonable (Grant y Parveen, 2017). Todo lo anterior ha promovido la investigación de compuestos antimicrobianos alternativos que cumplan tanto con los requisitos de produc-

tos orgánicos, naturales y/o de etiqueta limpia, así como de seguridad alimentaria (McDonnell *et al.*, 2013; Woraprayote *et al.*, 2016). En las secciones siguientes se exponen los resultados de algunas de estas investigaciones.

2.3.1 Aplicación de fuentes naturales de nitritos en carnes frías de origen avícola

Para cumplir con los requisitos de «etiqueta limpia» se ha buscado sustituir el comúnmente utilizado nitrito de sodio (NaNO_2) por fuentes naturales de nitrito como el derivado de la fermentación de jugos de vegetales, en especial de apio. La eficacia de este último se ha probado contra las bacterias *L. monocytogenes* (Golden, McDonnell, Sheehan, Sindelar y Glass, 2014) y *C. perfringens* (King, Glass, Milkowski y Sindelar, 2015a) en productos de pechuga de pavo estilo *deli*. En ambos casos, se concluye que la eficacia de los nitritos adicionados es independiente de la fuente, ya sea natural (polvo de jugo de apio fermentado) o sintética (NaNO_2 purificado) y en cambio, dependiente de la concentración añadida. Además, en el estudio de Golden *et al.* (2014), cuando el nitrito, fuera de polvo de jugo de apio fermentado o NaNO_2 purificado, se utilizó en combinación con otro antimicrobiano, tanto convencional (mezcla de lactato de potasio y diacetato de sodio) como de etiqueta limpia (mezcla de azúcar fermentada y vinagre), el efecto de inhibición del crecimiento bacteriano se vio mejorado. El mismo efecto fue reportado por King *et al.* (2015a) cuando se adicionó ascorbato, tanto purificado como de origen natural (extracto de cereza en polvo), además de nitritos, ambos a las concentraciones adecuadas. Para los productos inoculados con *L. monocytogenes* y almacenados a 4°C, se observó un crecimiento de 1.3 log a las cuatro semanas cuando se les adicionó nitrito a una concentración de 80 mg/kg, y 1.5 log a las seis semanas al ser adicionados con una concentración de nitrito de 120 mg/kg, independientemente de la fuente. Cuando se adicionaron tanto una mezcla de lactato-diacetato 3.8% como la mezcla de azúcar fermentado-vinagre 1%, al tratamiento de nitrito (80 mg/kg de producto), se logró suprimir el crecimiento de la bacteria hasta por doce semanas (Golden *et al.*, 2014). El crecimiento de *C. perfringens* fue monitoreado a lo largo de un periodo de enfriamiento de 54.4 a 26.6°C por 5 horas y de 26.6 a 7.2°C por diez horas. Se observó un incremento de menos de un ciclo logarítmico en los tratamientos con 50 ppm de nitrito y 500 ppm de ascorbato o mayor o igual a 75 ppm de nitrito y mayor o igual a 250 ppm de ascorbato, independientemente de la fuente.

2.3.2 Sustitutos naturales de las sales de ácidos orgánicos

Diferentes investigadores han validado la efectividad de antimicrobianos de «etiqueta limpia», como el ajo (Sallam, Ishiroshi y Samejima, 2004), humo líquido (Morey, Bratcher, Singh y McKee, 2012), té verde, extracto de semilla de uva (Perumalla et al., 2013), mezcla de vinagre-limón-extracto de cereza en polvo, vinagre tamponado (McDonnell et al., 2013), mezcla de azúcar fermentado-vinagre (McDonnell et al., 2013; King, Glass, Milkowski y Sindelar, 2015b; Weyker, Glas, Milkowski, Seman y Sindelar, 2016), extracto de fruta tropical, vinagre seco (King et al., 2015b) y aceites esenciales (Casco et al., 2015) utilizados como ingredientes en diferentes productos de carne de ave listos para el consumo con el propósito de incrementar la seguridad y vida de anaquel de los mismos.

El jugo de limón y el vinagre, fuentes naturales de ácido cítrico y ácido acético, han demostrado ser capaces de inhibir el crecimiento de *C. perfringens* en productos de pavo no curados (Valenzuela-Martinez et al., 2010) y de carne asada (*roast beef*) (Li et al., 2012). A partir de estos y otros estudios, King et al. (2015b) probaron fuentes naturales de ácido cítrico y ácido acético, que pudieran tener un efecto sinérgico a la inhibición de *C. perfringens* con polvo de jugo de apio fermentado, como sustituto de nitritos, estandarizado a 50 ppm de nitrito. Los tratamientos fueron; extracto de fruta tropical (1.0%), vinagre seco (0.7%), mezcla de azúcar fermentado y vinagre (1.0%) y mezcla de limón y vinagre (2.0%). Estos fueron probados en pechuga de pavo estilo *deli* formulada tanto en presencia como en ausencia del polvo de jugo de apio como sustituto de nitritos e inoculada con una mezcla de tres cepas de *C. perfringens* a una concentración de 2.5 log UFC/mL. En los tratamientos control, ausencia y presencia de nitritos, se observó un crecimiento de 4.6 y 4.2 log, respectivamente, a las quince horas de enfriamiento (de 54.4 a 26.6°C en cinco horas y de 26.6 a 7.2°C en diez horas). El extracto de fruta tropical 1.0% y la mezcla de azúcar fermentado y vinagre 1.0%, tanto en presencia como ausencia de nitritos, lograron controlar el crecimiento de la bacteria a los niveles iniciales o menos, mientras que el vinagre seco 0.7% y una mezcla de limón y vinagre 2.0% permitieron un incremento de 2.0 y 2.5 ciclos logarítmicos, respectivamente; y 1.5 ciclos logarítmicos cuando fueron añadidos en combinación con nitritos. De acuerdo con King et al. (2015b), los resultados sugieren que estos antimicrobianos, que son permitidos en productos de «etiqueta limpia», pueden contribuir a un proceso de refrigeración seguro.

Sallam et al. (2004) probaron que la adición de ajo fresco a una concentración de 30 g/kg o de polvo de ajo a una concentración de 9 g/kg en salchichas de pollo crudas, lograron reducir de

manera significativa ($p<0.05$) la cuenta en placa de microorganismos aerobios en comparación con un control sin antimicrobianos, extendiendo de esta manera la vida de anaquel del producto por 21 días a una temperatura de almacenamiento de 3°C.

El humo de madera tiene el potencial de presentar actividad bacteriostática o bactericida contra *L. monocytogenes* gracias a los fenoles y compuestos carbonilos solubles en agua que se encuentran presentes de manera natural en la madera. El humo Zesti (Kerry Ingredients and Flavors, TN, EE. UU.) utilizado como ingrediente en la formulación de salchichas tipo *frankfurter* de pollo (51%) con puerco (49%) a concentraciones de 5 y 10% ha demostrado reducir significativamente ($p<0.05$) la población de *L. monocytogenes*, por doce semanas de almacenamiento a 4°C, sin afectar las propiedades sensoriales del producto, en comparación con un producto formulado sin antimicrobianos. Sin embargo, en comparación con el lactato y diacetato de sodio, la efectividad antimicrobiana del humo (Humo Zesti) es muy baja y se sugiere que podría mejorarse si se reduce el pH del producto con la adición de ácidos orgánicos (Morey et al., 2012). Otras alternativas naturales ricas en compuestos fenólicos que pudieran reemplazar parcialmente a los conservadores sintéticos son el té verde y el extracto de semilla de uva, debido a sus propiedades antimicrobianas contra patógenos como *L. monocytogenes* tanto en pruebas *in vitro*, como en sistemas modelo de carne. Los investigadores Perumalla et al. (2013) probaron la efectividad del té verde y del extracto de semilla de uva como reemplazos parciales del lactato de potasio y el diacetato de sodio contra *L. monocytogenes* (10^3 UFC/g) en salchichas de pollo y pavo, de bajo (5%) y alto (20%) contenido de grasa, ya sea con o sin tratamiento térmico (65°C por 104 s), almacenados a 4°C por 28 días. De esta manera se comparó el tratamiento con lactato de potasio (1.5%), diacetato de sodio (0.11%) extracto de té verde (0.35%) y extracto de semilla de uva (0.22%) contra los tratamientos control; productos sin antimicrobianos y productos con lactato de potasio (2%) y diacetato de sodio (0.15%). Los resultados demostraron que la combinación de los extractos y las sales de ácidos orgánicos fue más efectiva en el control del crecimiento de *L. monocytogenes* que sólo la utilización de sales de ácidos orgánicos, lo cual, además de proveer seguridad alimenticia, puede ser una alternativa atractiva para los consumidores.

McDonnell et al. (2013) probaron en sistemas modelo de pasta de carne de pavo bajo diferentes concentraciones y fuentes de nitritos, catorce ingredientes (tabla I) que se pueden denominar naturales de acuerdo con los estándares de etiquetado de la FSIS (21 CFR 101.22) y que presentaron potencial antimicrobiano contra *L. monocytogenes*.

De los ingredientes naturales presentados en la tabla I, tres de ellos (mezcla de vinagre, limón y extracto de cereza en polvo, vinagre tamponado y mezcla de azúcar fermentado y vinagre) fueron elegidos para ser probados en productos reales no curados de pechuga de pavo estilo *deli*. Los productos fueron inoculados con 3 log UFC/g de la bacteria y almacenados a 4 o 7°C hasta por doce semanas. Tanto la mezcla de vinagre, limón

y extracto de cereza en polvo (1.5%) como el vinagre tamponado (2.5%) lograron retrasar el crecimiento de la bacteria por dos semanas más que el control de producto sin antimicrobiano, mientras que la mezcla de azúcar fermentado y vinagre (3.0%) retrasó el crecimiento por cuatro semanas adicionales. Como era esperado, la población de *L. monocytogenes* aumentó mucho más rápido a 7 que a 4°C (McDonnell *et al.*, 2013).

Tabla I. Ingredientes “naturales” con potencial antimicrobiano probados en sistemas modelo de pasta de carne de pavo contra *L. monocytogenes*

| Ingrediente | Concentración (% p/p) |
|---|-----------------------|
| Mezcla de azúcar fermentado y vinagre* | 3.00 |
| Mezcla de vinagre y jugo de limón | 2.50 |
| Mezcla de romero y tocoferol | 0.08 |
| Extracto de té verde | 0.10 |
| Emulsión herbal activa | 0.05 |
| Concentrado de arándano | 2.00 |
| Aceite de árbol de té | 0.05 |
| Extracto de romero más nisin | 0.20 |
| Extracto de cereza en polvo | 0.50 |
| Mezcla de vinagre, limón y extracto de cereza en polvo* | 1.50 |
| Extracto de semilla de uva | 0.03 |
| Vinagre tamponado* | 2.00 |
| Extracto de humo líquido 1 | 1.00 |
| Extracto de humo líquido 2 | 1.00 |

*Ingredientes elegidos para ser probados en pechuga de pavo estilo *deli* no curada.

Adaptada de McDonnell *et al.* (2013)

Por su parte, Weyker *et al.* (2016) probaron la efectividad de diferentes concentraciones de la mezcla de azúcar fermentado y vinagre, en un producto de pechuga de pavo no curado almacenado a 4°C por 16 semanas contra *L. monocytogenes* y *Leuconostoc mesenteroides* (una bacteria ácido-láctica que produce baba y malos olores, lo que disminuye la vida de anaquel de los productos). A partir de diferentes valores de humedad (60% a 80%), pH (5.8 a 6.4) y concentración de la mezcla de azúcar fermentado y vinagre (0.0% a 5.0%), se generaron 36 tratamientos. En 27 de los tratamientos, la mezcla de azúcar fermentado y vinagre inhibió de manera efectiva el crecimiento de *L. monocytogenes*. Se encontró que es probable que se requieran altas concentraciones de la mezcla para inhibir el crecimiento en productos no curados de pechuga de pavo de alto contenido de humedad y alto pH. La mezcla fue menos

efectiva contra *L. mesenteroides*, únicamente se logró inhibir el crecimiento en cuatro de los veinte tratamientos, lo que sugiere que su potencial para alargar la vida de anaquel del producto es limitado.

Por otra parte, los aceites esenciales son metabolitos secundarios producidos por las plantas, son mezclas complejas de compuestos volátiles que le confieren a las mismas su olor característico (Bakry *et al.*, 2016). Algunos de estos compuestos, en especial los compuestos fenólicos, han demostrado poseer propiedades antimicrobianas ya que el grupo hidroxilo (-OH) del anillo fenólico rompe la membrana celular bacteriana (Grant y Parveen, 2017). La utilización de estos aceites en el procesamiento de alimentos es limitada gracias a su naturaleza aceitosa y volátil. Estos problemas se pueden contrarrestar encapsulando los aceites, en este sentido, Casco *et al.* (2015) encapsularon una

mezcla patentada de aceites esenciales y probaron su efectividad antimicrobiana contra un coctel de *L. monocytogenes* y contra un coctel de *S. enterica*, en productos de pollo tipo *deli*, almacenados a 4°C por 42 días. Las mezclas que se probaron contenían aceites esenciales de cítricos, cebolla y ajo en una base de tripolifosfato de sodio y lactato de potasio. Se probaron tanto la mezcla encapsulada (0.60%) como la mezcla sin encapsular (0.45%), y su efectividad se comparó contra la del lactato de potasio (2%), teniendo como control, productos sin antimicrobiano añadido. Se encontró que la mezcla, tanto encapsulada como sin encapsular, fueron significativamente diferentes al control ($p<0.05$), e iguales significativamente al lactato de potasio ($p>0.05$), logrando extender por siete días la fase de adaptación o fase lag del coctel de *L. monocytogenes*; sin embargo, no fue capaz de limitar el crecimiento durante el resto del almacenamiento. Ningún agente antimicrobiano logró limitar el crecimiento del coctel de *L. monocytogenes* a menos de dos ciclos logarítmicos después de 49 días de almacenamiento estándar establecido por la FSIS (9 CFR 430.4) para validar compuestos antimicrobianos contra *L. monocytogenes* en productos listos para el consumo estilo *deli*. Por otro lado, todos los tratamientos lograron inhibir el crecimiento del coctel de *Salmonella* a menos de dos ciclos logarítmicos a los 35 días de almacenamiento, teniendo un efecto significativo y mayor el tratamiento en donde la mezcla de aceites esenciales fue encapsulada. Los autores concluyen que la mezcla patentada de aceites esenciales a una concentración del 0.60% puede reemplazar al lactato de potasio para limitar el crecimiento de *Salmonella* en productos de pollo listos para el consumo estilo *deli*. Sin embargo, se necesita evaluar el impacto a las características organolépticas del producto y, por lo tanto, la aceptabilidad por parte del consumidor.

Conclusiones y comentarios finales

A pesar de que, como se expone en la presente revisión, se ha demostrado la efectividad de los antimicrobianos lactato de potasio, lactato de sodio y diacetato de sodio, y el agente de curado nitrito de sodio, comúnmente utilizados en productos cárnicos listos para el consumo, así como de otros agentes antimicrobianos sintéticos (propionato, sorbato, benzoato), en la actualidad existe una creciente demanda por productos «naturales» que sean fácilmente reconocibles por los consumidores. Es de gran importancia entonces encontrar agentes antimicrobianos que cumplan con estos requisitos y que sean capaces de sustituir a los anteriores en cuanto a su eficacia antimicrobiana. Es

necesario recordar que para las nuevas propuestas se tendrá que establecer un modo de uso adecuado para cada producto en particular ya que, como se ha mencionado anteriormente, su efecto va a depender de diferentes aspectos, tanto de la naturaleza del producto como de los compuestos mismos. Los estudios recientes realizados que intentan cumplir con el propósito anterior se han enfocado en evaluar la efectividad de compuestos de nombres comunes como jugo de ajo fermentado, vinagre, limón, extracto de cereza, ajo, té verde, extracto de semilla de uva, azúcar fermentado y aceites esenciales de diferentes especias, los cuales cumplen con los requisitos de ser «naturales». Su efectividad se ha evaluado principalmente contra las bacterias patógenas *L. monocytogenes* y *C. perfringens* en productos cárnicos de ave, mayormente de pavo.

Agradecimientos

La alumna Lastra-Vargas agradece a la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP) por el apoyo del financiamiento otorgado para sus estudios de doctorado.

Referencias

- Bakry, A.M., Abbas, S., Ali, B., Majeed, H., Abouelwafa, M.Y., Mousa, A. y Liang, L. (2016). Microencapsulation of oils: A comprehensive review of benefits, techniques and applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15, 143-182.
- Bošković, M., Baltić, Z. M., Ivanović, J., Durić, J., Lončina, J., Dokmanović, M., y Marković, R. (2013). Use of essential oils in order to prevent foodborne illnesses caused by pathogens in meat. *Tehnologija mesa*, 54(1), 14-20.
- Casco, G., Taylor, T. M., y Alvarado, C. Z. (2015). Evaluation of novel micronized encapsulated essential oil-containing phosphate and lactate blends for growth inhibition of *Listeria monocytogenes* and *Salmonella* on poultry bologna, pork ham, and roast beef ready-to-eat deli loaves. *Journal of Food Protection*, 78(4), 698-706.
- Consejo Mexicano de la Carne. (2012). *Compendio estadístico 2016 de la industria cárnia mexicana*. Contenidos de Información para la Integración del Sector Cárneo y la Toma de Decisiones de sus Participantes. Recuperado de <http://infocarne.comecarne.org/compendio/visualizar?comp=9>
- Davidson, P. M. y Branen, A. L. (2005). Food antimicrobials- an introduction. En Davidson, P. M., Sofos, J. N., y Branen, A. L., *Anti-*

- microbials in food* (pp.1-10). Florida: Taylor & Francis Group.
- FSIS. Food Safety and Inspection Service. (2012). *FSIS Salmonella compliance guidelines for small and very small meat and poultry establishments that produce ready-to-eat (RTE) products*. United States Department of Agriculture-Food Safety and Inspection Service Recuperado de https://static1.squarespace.com/static/57367d7507eaab9c96ff8ac3/t/59d2ab9ca8b2b07f20efc58/1506978717029/Salmonella_Comp_Guide_091912.pdf
- FSIS. Food Safety and Inspection Service. (2016). 9 Code of Federal Regulations No. 424.21. Animals and Animal Products. Food Safety and Inspection Service, USD by sodium nitrite and sorbic acid in chicken emulsions. *Journal of Food Science*, 45, 7-12.
- Glass, K. A., McDonnell, L. M., Rassel, R. C. y Zierke, K. L. (2007). Controlling *Listeria monocytogenes* on sliced ham and turkey products using benzoate, propionate and sorbate. *Journal of Food Protection*, 70(10), 2306-2312.
- Glass, K. A., McDonnell, L. M., VonTayson, R., Wanless, B. y Badvela, M. (2013). Inhibition of *Listeria monocytogenes* by propionic acid-based ingredients in cured deli-style turkey. *Journal of Food Protection*, 76(12), 2074-2078.
- Golden, M. C., McDonnell, L. M., Sheehan, V., Sindelar, J. J. y Glass, K. A. (2014). Inhibition of *Listeria monocytogenes* in deli-style turkey breast formulated with cultured celery powder and/or cultured sugar-vinegar blend during storage at 4°C. *Journal of Food Protection*, 77(10), 1787-1793.
- Grant, A. y Parveen, S. (2017). All natural and clean-label preservatives and antimicrobial agents used during poultry processing and packaging. *Journal of Food Protection*, 80(4), 540-544.
- Heinz, G. y Hautzinger, P. (2007). Meat processing technology for small-to medium-scale producers (RAP Publication 20). Bangkok. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/010/ai407e/Al407Eoo.htm>
- Horita, C. N., Baptista, R. C., Caturla, M. Y. R., Lorenzo, J. M., Barba, F. J. y Sant'Ana, A. S. (2018). Combining reformulation, active packaging and non-thermal post-packaging de-contamination technologies to increase the microbiological quality and safety of cooked ready-to-eat meat products. *Trends in Food Science & Technology*, 72, 45-61.
- Jiang, J. y Youling, L. X. (2015). Technologies and mechanisms for safety control of ready-to-eat muscle foods: An update review. *Critical reviews in Food Science and Nutrition*, 55(13), 1886-1901.
- King, A. M., Glass, K. A., Milkowski, A. L. y Sindelar, J. J. (2015a). Comparison of the effect of curing ingredients derived from purified and natural sources on inhibition of *Clostridium perfringens* outgrowth during cooling of deli-style turkey breast. *Journal of Food Protection*, 78(8), 1527-1535.
- King, A. M., Glass, K. A., Milkowski, A. L. y Sindelar, J. J. (2015b). Impact of clean-label antimicrobials and nitrite derived from natural sources on the outgrowth of *Clostridium perfringens* during cooling of deli-style turkey breast. *Journal of Food Protection*, 78(5), 946-953.
- Li, L., Valenzuela-Martinez, C., Redondo, M., Juneja, V. K., Burson, D. E. y Thippareddi, H. (2012). Inhibition of *Clostridium perfringens* spore germination and outgrowth by lemon juice and vinegar product in reduced NaCl roast beef. *Journal of Food Science*, 77, M598-M603.
- Lloyd, T., Alvarado, C. Z., Brashears, M. M., Thompson, L. D., McKee, S. R. y Berrang, M. (2009). Control of *Listeria monocytogenes* in turkey deli loaves using organic acids as formulation ingredients. *Poultry Science*, 88, 2235-2239.
- McDonnell, L. M., Glass, K. A. y Sindelar, J. J. (2013). Identifying ingredients that delay outgrowth of *Listeria monocytogenes* in natural, organic, and clean-label ready-to-eat meat and poultry products. *Journal of Food Protection*, 76(8), 1366-1376.
- Morey, A., Bratcher, C. L., Singh, M. y McKee, S. R. (2012). Effect of liquid smoke as an ingredient in frankfurters on *Listeria monocytogenes* and quality attributes. *Poultry Science*, 91, 2341-2350.
- Mulvey, L., Everis, L., Leeks, D., Hughes, H. y Wood, A. (2010). Alternatives to nitrates and nitrites in organic meat products. *Campden Technology Limited*, 1-84.
- Myers, K., Montoya, D., Cannon, J., Dickson, J. y Sebranek, J. (2013). The effect of high hydrostatic pressure, sodium nitrite and salt concentration on the growth of *Listeria monocytogenes* on RTE ham and turkey. *Meat Science*, 93, 263-268.
- Perumalla, A. V. S., Hettiarachchy, N. S., Over, K., Ricke, S. C., Slavik, M. F., Gbur, E., Davis, B. y Acosta, S. (2013). Effect of partial replacement of potassium lactate and sodium diacetate by natural green tea and grape seed extracts and postpackaging thermal treatment on the growth of *Listeria monocytogenes* in hotdog model system. *International Journal of Food Science and Technology*, 48, 918-926.
- Porto-Fett, A. C. S., Campano, S. G., Shoyer, B. A., Israeli, D., Oser, A. y Luchansky, J. B. (2015). Comparative efficacy of potassium levulinate with and without potassium diacetate and potassium propionate versus potassium lactate and sodium diacetate for control of *Listeria monocytogenes* on commercially prepared uncured turkey breast. *Journal*

- of Food Protection*, 78(5), 927-933.
- Quesenberry, H. H., Gallagher, D., Endrikat, S., LaBarre, D., Ebel, E., Schroeder, C. y Kause, J. (2010). FSIS comparative risk assessment for *Listeria monocytogenes* in ready-to-eat meat and poultry deli meats report. Risk Assessment Division, Office of Public Health Science, Food Safety and Inspection Service, United States Department of Agriculture. Recuperado de https://www.fsis.usda.gov/wps/wcm/connect/c2ac97do-399e-4c4a-a2bc-d338c2e201b3/Comparative_RA_Lm_Report_May2010.pdf?MOD=AJPERES
- Sallam, K. I., Ishioroshi, M. y Samejima, K. (2004). Antioxidant and antimicrobial effects of garlic in chicken sausage. *Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie*, 37, 849-855.
- Sofos, J. N., Busta, F. F. y Allen, C. E. (1980). Influence of pH on *Clostridium botulinum* control
- Statista. (2017). U.S. population: Which kinds of cold cuts do you eat most often? The statistics portal. *Statistics and studies from more than 22,500 sources*. Recuperado de: <https://www.statista.com/statistics/279791/us-households-most-eaten-kinds-of-cold-cuts/>
- Valenzuela-Martinez, C., Pena-Ramos, A., Juneja, V. K., Korasapati, N. R., Burson, D. E. y Thippareddi, H. (2010). Inhibition of *Clostridium perfringens* spore germination and outgrowth by buffered vinegar and lemon juice concentrate during chilling of ground turkey roast containing minimal ingredients. *Journal of Food Protection*, 73, 470-476.
- Weyker, R. E., Glas, K. A., Milkowski, A. L., Seman, D. L. y Sindelar, J. J. (2016). Controlling *Listeria monocytogenes* and *Leuconostoc mesenteroides* in uncured deli-style turkey breast using a clean label antimicrobial. *Journal of Food Science*, 81(3), M672-M683.
- Woraprayote, W., Malila, Y., Sorapukdee, S., Swetwiwathana, A., Benjakul, S. y Visessanguan, W. (2016). Bacteriocins from lactic acid bacteria and their applications in meat and meat products. *Meat Science*, 120, 118-132.
- Zhang, L., Moosekian, S. R., Todd, E. C. D. y Ryser, E. T. (2012). Growth of *Listeria monocytogenes* in different retail delicatessen meats during simulated home storage. *Journal of Food Protection*, 75(5), 896-905.
- Zhu, M., Du, M., Cordray, J. y Uk Ahn, D. (2005). Control of *Listeria monocytogenes* contamination in ready-to-eat meat products. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 4, 34-42.

Los beneficios del consumo de carotenoides

Marco Antonio González Peña*, José Daniel Lozada Ramírez, Laura Toxqui Abascal*** y Ana Eugenia Ortega Regules******

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

***Decanatura de Ciencias, Universidad de las Américas Puebla*

****Departamento de Ciencias de la Salud, Universidad de las Américas Puebla*

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

Resumen

Los carotenoides son un grupo de pigmentos de origen vegetal que poseen propiedades antioxidantes y actividad fisiológica, y algunos son precursores de la vitamina A. Por ello, su ingesta se ha asociado con la prevención de cáncer, enfermedades cardiovasculares y visuales, entre otras. No obstante, la función de los carotenoides depende de su naturaleza química, contenido, biodisponibilidad y mecanismo de acción. El objetivo del presente artículo es recopilar información acerca de los carotenoides, sus fuentes naturales, su biodisponibilidad, sus propiedades benéficas y su uso en la prevención de enfermedades para el consumidor.

Palabras clave: carotenoides · biodisponibilidad · actividad antioxidante · provitamina a · prevención de enfermedades

Abstract

Carotenoids are a group of pigments of vegetable origin, with antioxidant properties and physiological activity, and some are precursors of vitamin A. Therefore, its intake has been associated with the prevention of cancer, cardiovascular and visual diseases, among others. However, the function of carotenoids depends on their chemical nature, content, bioavailability and mechanism of action. The objective of this article is to gather information about carotenoids, their natural sources, their bioavailability, their beneficial properties and their use in the prevention of diseases for the consumer.

Keywords: carotenoids · bioavailability · antioxidant activity · provitamin a · prevention of diseases

 Programa de Doctorado
en Ciencias de Alimentos
Tel: +52 222 229 2126
Dirección electrónica:
marco.gonzalezpa@udlap.mx
maria.barcenas@udlap.mx

Introducción

Los carotenoides son un grupo de pigmentos encontrados, principalmente, en tomate, zanahoria, piña, frutos cítricos, mamey, papaya, flor de cempasúchil, flor de girasol, achiote, azafrán y hojas verdes (Perera y Yen, 2007), responsables de los colores amarillo, naranja y rojo en muchas plantas, y son compuestos utilizados comercialmente como colorantes naturales e ingredientes de suplementos nutricionales (Li, Tsao y Deng, 2012).

El estudio de estos pigmentos en años recientes ha sido de gran importancia, debido a que además de su conocida actividad como provitamina A, se han denominado compuestos bioactivos y se les atribuyen propiedades antioxidantes. Los compuestos bioactivos se definen como constituyentes propios de alimentos de origen vegetal, sin valor nutricional que, al ser ingeridos, ejercen efectos benéficos para la salud, promoción de la salud y/o efectos tóxicos (Sanches-Silva *et al.*, 2013).

Además, estudios recientes señalan el papel de los carotenoides en la prevención de enfermedades crónico-degenerativas, cardiovasculares, cáncer, degeneración macular y formación de cataratas (Lemmens *et al.*, 2014), debido a que participan en la modulación del sistema inmune y la comunicación celular; favorecen el desarrollo embrionario, la hematopoyesis y la apoptosis, y poseen actividad antioxidant, antiinflamatoria, antiangiogénica y antiproliferativa (Yahia, Gutiérrez-Orozco y Arvizu-de Leon, 2011; Saini, Nile y Park, 2015).

Debido a la importancia de los carotenoides y sus propiedades benéficas, previamente mencionadas, ha surgido el interés por conocer no sólo la cantidad de carotenoides ingeridos a través de la dieta, sino también su ruta de absorción y utilización en el organismo, es decir, su biodisponibilidad.

Por ello, el objetivo de este artículo es hacer una revisión acerca de los carotenoides, sus fuentes naturales, su mecanismo de absorción, los factores que influyen en su biodisponibilidad y sus propiedades benéficas en la salud, así como el uso de éstos en el tratamiento y/o prevención de enfermedades.

Revisión bibliográfica

1. Estructura, clasificación y biosíntesis de los carotenoides

Los carotenoides son un grupo de pigmentos de origen vegetal (en su mayoría), responsables de los colores amarillos, anaranjados y rojos en frutas y hortalizas, con actividad antioxidant y algunos son precursores de la vitamina A. Además, los carotenoides participan en la regulación de la comunicación intercelular, la activación del sistema inmune y la prevención

de enfermedades (Salter-Venzon *et al.*, 2017; Saini *et al.*, 2015); siendo considerados sustancias que promueven la salud humana.

Los carotenoides están formados por ocho unidades repetitivas del isopreno (Fig. 1), con estructuras cíclicas o lineales, dando lugar a múltiples isómeros *cis* y *trans*, siendo más abundantes en la naturaleza los segundos (Guerrero-Legarreta, López-Hernández, Armenta-López y García-Barrientos, 2013; Schawartz, Cooperstone, Cichon, von Elbe y Giusti, 2017).

Estos pigmentos se clasifican en carotenos y xantofilas.

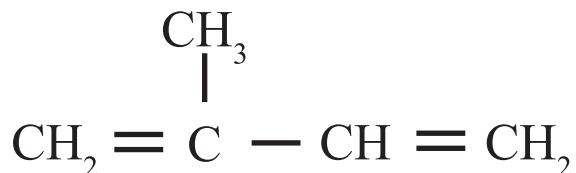


Figura 1. Estructura química del isopreno, unidad básica de los carotenoides.

Los carotenos se caracterizan por ser muy solubles en disolventes orgánicos e insolubles en disolventes polares, como ejemplos de éstos incluyen α , β y γ -caroteno y licopeno (Guerreiro-Legarreta *et al.*, 2013). Por otro lado, las xantofilas son solubles en disolventes polares como alcoholes y disolventes orgánicos como éter; se consideran derivados oxigenados de los carotenos, encontrándose como alcoholes, aldehídos, cetonas y/o ácidos, algunos ejemplos incluyen fucoxantina, luteína y violaxantina (Guerrero-Legarreta *et al.*, 2013; Schawartz *et al.*, 2017).

Los dobles enlaces conjugados de los carotenoides absorben la luz y son responsables de los colores brillantes en frutas y hortalizas, variando entre amarillo y naranja hasta rojo. Además, la presencia de dobles enlaces es responsable de la protección de las células frente a la oxidación y el daño celular (Sanches-Silva *et al.*, 2013; Schawartz *et al.*, 2017).

En la tabla I se observa la clasificación de los carotenoides, la estructura de carotenos y xantofilas, así como ejemplos de alimentos en los que se encuentran estos pigmentos.

Los carotenoides se almacenan en los tejidos de plantas (plástidos) como los cromoplastos, amiloplastos (almacén de almidón), oleoplastos (almacén de lípidos), leucoplastos y etioplastos. En frutas, flores y tubérculos, los carotenos se localizan y acumulan principalmente en los cromoplastos, mientras que en granos y semillas oleosas se localizan en amiloplastos y oleoplastos, respectivamente (Howitt y Pogson, 2006). Por otro lado, las xantofilas se encuentran libremente en los tejidos de plantas verdes, mientras que en frutas y flores se hallan esterificados con varios ácidos grasos, lo que permite la sobreproducción y acumulación de estos pigmentos (Perera y Yen, 2007).

Tabla I. Estructura y clasificación de carotenoides

| Carotenoides | Compuesto | Estructura | Coloración | Fuentes naturales |
|--------------|------------------------|------------|-----------------------|---|
| Carotenos | α -caroteno | | Naranja-rojo | Zanahoria, hojas verdes, calabaza |
| | β -caroteno | | Rojo-naranja-amarillo | Zanahoria, calabaza, chile, naranja |
| | Licopeno | | Rojo brillante | Tomate, sandía, guayaba, papaya |
| Xantofilas | β -criptoxantina | | Naranja-amarillo | Flavedo de cítricos, melón, guayaba, manzana |
| | Luteína | | Amarillo | Maíz, brócoli, flor de cempasúchil, leguminosas |
| | Zeaxantina | | Amarillo | Maíz, pimiento |
| | Violaxantina | | Amarillo | Pimiento |
| | Neoxantina | | Amarillo | Hojas verdes |
| | Fucoxantina | | Rojo | Algas |
| | Astaxantina | | Rosa-rojo | Salmón, langosta, camarón |
| | Capsantina | | Rojo | Chile |
| | Bixina | | Rojo marrón | Achiote |
| | Crocina | | Amarillo-naranja | Azafrán |

(adaptado de Guerrero-Legarreta et al., 2013 y Schwartz et al., 2017)

La biosíntesis de los carotenoides (Fig. 2) se lleva a cabo en los cloroplastos, partiendo de una molécula de isopentenil pirofosfato hasta la formación de fitoeno, catalizada por las enzimas farnesil pirofosfato sintasa y geranil geranil pirofosfa-

to sintasa. Posteriormente, ocurre la desaturación de fitoeno, convirtiendo a éste en licopeno por acción de la enzima fitoeno desaturasa.

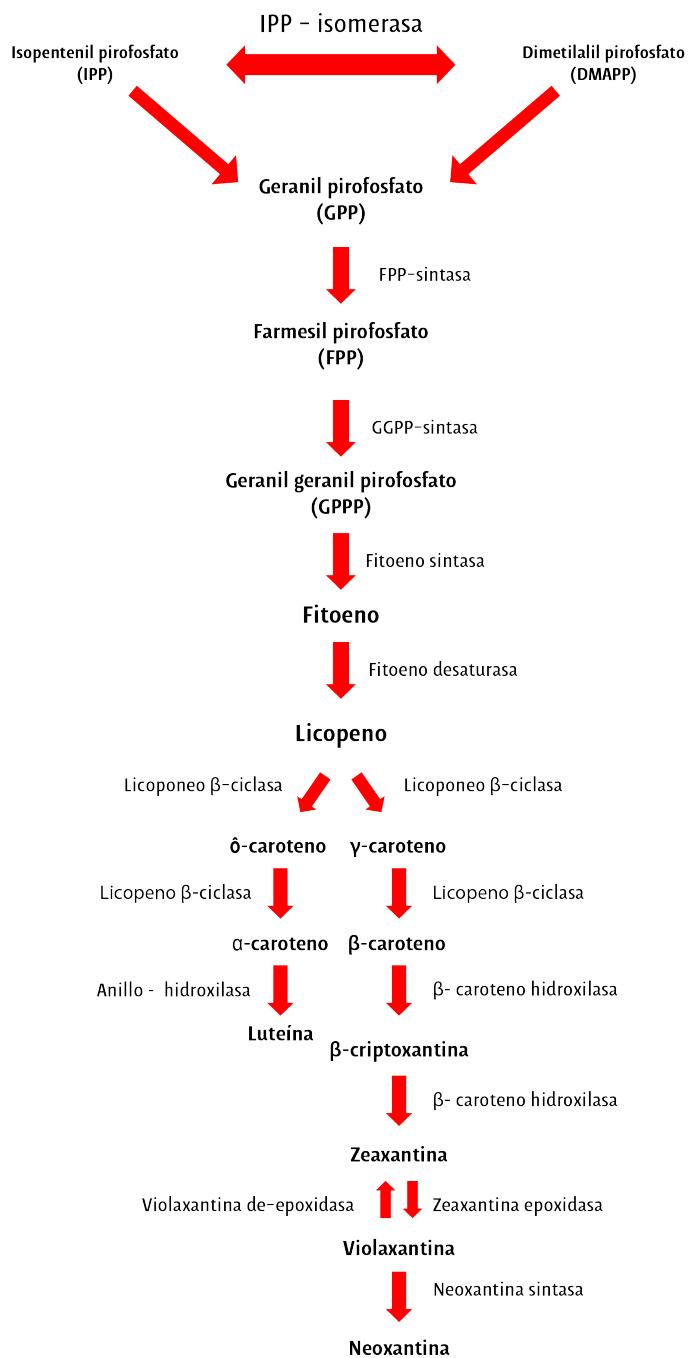


Figura 2. Vía de biosíntesis de carotenoides en plantas (Butnariu, 2016; Kang *et al.*, 2017).

El siguiente paso en la biosíntesis de carotenoides es la ciclación del licopeno, para la formación de α -caroteno (vía α) y β -caroteno (vía β), catalizado por la enzima licopeno β -ciclasa. A partir de la vía α es posible formar luteína por acción de la enzima anillo- ϵ hidroxilasa, mientras que en la vía β el β -caroteno es convertido a β -criptoxantina, catalizado por la enzima β -caroteno hidroxilasa, la que a su vez también cataliza la conversión de éste a zeaxantina. Por su parte, la zeaxantina puede ser transformada en violaxantina, reacción que es mediada por la enzima zeaxantina epoxidasa y viceversa por la enzima violaxantina de-epoxidasa. Por último, la violaxantina puede ser convertida en neoxantina por medio de la enzima neoxantina sintasa (Butnariu, 2016; Kang *et al.*, 2017).

2. Fuentes naturales de carotenoides

El consumo de carotenoides en la dieta humana proviene principalmente de alimentos de origen vegetal (frutas y hortalizas).

La composición y contenido de carotenoides en los alimentos se ven afectados por múltiples factores entre los que destacan los intrínsecos del vegetal (variedad, genotipo, estado de maduración), extrínsecos del vegetal (temporada de cosecha, condiciones de crecimiento) y climatológicos (localización, clima, humedad), entre otros (Saini *et al.*, 2015). Adicionalmente, el contenido de carotenoides y su estabilidad son modificados por condiciones de almacenamiento y tratamiento de los alimentos (Olmedilla-Alonso, 2017).

Britton y Khachik (2009) propusieron una clasificación de frutas y hortalizas de acuerdo con sus niveles de carotenoides, agrupando a los alimentos en las siguientes categorías: nivel bajo ($0\text{-}1 \mu\text{g/g}$), nivel moderado ($1\text{-}5 \mu\text{g/g}$), nivel alto ($5\text{-}20 \mu\text{g/g}$) y nivel muy alto ($> 20 \mu\text{g/g}$). En la tabla II se enumeran algunas de las frutas y hortalizas consumidas comúnmente en México y su contenido de carotenoides.

Los carotenoides más abundantes en la dieta humana occidental son β -caroteno y α -caroteno, provenientes de zanahoria, calabaza, chabacano, chile, cilantro y espinaca (Yoon *et al.*, 2012; Gul *et al.*, 2015; Saini *et al.*, 2015; Olmedilla-Alonso, 2017); luteína a partir de brócoli, calabaza, espinaca, maíz, mango y papaya (Saini *et al.*, 2015; Olmedilla-Alonso, 2017), y licopeno proveniente de tomate, guayaba, sandía y grosella (Chandrika, Fernando y Ranaweer, 2009; Bagetti *et al.*, 2011; Yoon *et al.*, 2012; Gul *et al.*, 2015; Saini *et al.*, 2015; Olmedilla-Alonso, 2017).

Tabla II. Contenido de carotenoides en frutas y hortalizas consumidas en México

| Alimento | Nombre científico | Contenido | Carotenoides (μg/g) | | | | | | Referencia |
|-------------------|---|-----------|---------------------|------------|-----------------|--------------|------------|----------|---|
| | | | β-caroteno | α-caroteno | β-cryptoxantina | Luteína | Zeaxantina | Licopeno | |
| Arúgula | <i>Eruca sativa</i> | Muy alto | 79.60 | 2.80 | - | 74.40 | 0.06 | - | Saini <i>et al.</i> , 2015 |
| Brócoli | <i>Brassica oleracea var. italica</i> | Muy alto | 11.38 | - | 0.15 | 28.05 | - | - | Olmedilla-Alonso, 2017; Saini <i>et al.</i> , 2015 |
| Calabaza | <i>Cucurbita maxima</i> | Muy alto | 172.20 | 39.90 | - | - | - | - | Saini <i>et al.</i> , 2015 |
| Calabaza | <i>Cucurbita pepo</i> | Muy alto | - | - | - | 172.00 | - | 7.00 | Saini <i>et al.</i> , 2015 |
| Camote | <i>Ipomoea batatas</i> | Alto | 5.90 - 13.60 | - | - | - | - | - | Olmedilla-Alonso, 2017; Vimala <i>et al.</i> , 2011 |
| Cebolla cambray | <i>Allium fistulosum</i> | Muy alto | 29.9 | - | - | 48.5 | - | - | Yoon <i>et al.</i> , 2012 |
| Chabacano | <i>Prunus armeniaca</i> | Muy alto | 170.00 | - | 0.73 | 0.09 | 2.70 | - | Olmedilla-Alonso, 2017; Saini <i>et al.</i> , 2015 |
| Chile | <i>Capsicum annuum</i> | Alto | 1.20 - 17.50 | - | - | 0.90 - 12.30 | - | - | Gul <i>et al.</i> , 2015; Olmedilla-Alonso, 2017; Yoon <i>et al.</i> , 2012 |
| Ciruela | <i>Prunus domestica</i> | Moderado | 0.4 | - | 0.1 | 1.2 | - | - | Yoon <i>et al.</i> , 2012 |
| Coles de Bruselas | <i>Brassica oleracea var. gemmifera</i> | Alto | 0.72 | - | 11.63 | 11.63 | - | - | Olmedilla-Alonso, 2017; Saini <i>et al.</i> , 2015 |
| Coliflor | <i>Brassica oleracea var. botrytis</i> | Bajo | 0.22 | - | 0.15 | 0.28 | - | - | Saini <i>et al.</i> , 2015 |
| Durazno | <i>Prunus persica</i> | Alto | 9.30 | - | 1.60 | - | 1.10 | - | Olmedilla-Alonso, 2017; Saini <i>et al.</i> , 2015 |
| Espinaca | <i>Spinacia oleracea</i> | Muy alto | 365.30 | - | - | 775.80 | 15.10 | - | Olmedilla-Alonso, 2017; Saini <i>et al.</i> , 2015 |
| Grosella | <i>Eugenia uniflora</i> | Muy alto | 2.90 | - | 16.00 | - | - | 166.00 | Bagetti <i>et al.</i> , 2011; Olmedilla-Alonso, 2017 |
| Guayaba | <i>Psidium guajava</i> | Muy alto | 2.00 | - | - | 2.10 | - | 45.30 | Chandrika <i>et al.</i> , 2009; Olmedilla-Alonso, 2017 |
| Hojas de cilantro | <i>Coriandrum sativum</i> | Muy alto | 586.10 | - | - | - | - | - | Olmedilla-Alonso, 2017; Saini <i>et al.</i> , 2015 |
| Lechuga | <i>Lactuca sativa</i> | Alto | 14.90 | - | - | 13.50 | - | - | Saini <i>et al.</i> , 2015 |
| Maíz | <i>Zea mays</i> | Alto | - | - | 1.70 | 13.10 | 6.20 | - | Saini <i>et al.</i> , 2015 |
| Mamey | <i>Pouteria sapota</i> | Muy alto | 37.64 | - | - | 0.87 | - | - | Yahia <i>et al.</i> , 2011 |

Tabla II. Continuación. Contenido de carotenoides en frutas y hortalizas consumidas en México

| Alimento | Nombre científico | Contenido | Carotenoides ($\mu\text{g/g}$) | | | | | Referencia |
|-----------------|--------------------------------|-----------|----------------------------------|--------------------|------------------------|-------------|------------|---|
| | | | β -caroteno | α -caroteno | β -criptoxantina | Luteína | Zeaxantina | |
| Mango | <i>Mangifera indica</i> | Muy alto | - | - | - | 31.70 | 1.50 | - Olmedilla-Alonso, 2017; Saini <i>et al.</i> , 2015 |
| Manzana golden | <i>Malus domestica</i> | Moderado | 1.40 | - | - | 0.71 | 0.02 | - Saini <i>et al.</i> , 2015 |
| Manzana roja | <i>Malus domestica</i> | Bajo | 0.17 | - | - | 0.06 | 0.01 | - Saini <i>et al.</i> , 2015 |
| Naranja | <i>Citrus x sinensis</i> | Moderado | 0.21 | 0.11 | 1.86 | 0.61 | - | - Aschoff <i>et al.</i> , 2015 |
| Naranja (jugos) | <i>Citrus x sinensis</i> | Alto | 0.80 - 1.70 | 0.7 - 1.5 | 2.6 - 17.0 | 12.1 - 37.5 | 4.7 - 11.4 | - Lee y Castle, 2001 |
| Papaya | <i>Carica papaya</i> | Muy alto | - | - | - | 237.00 | 14.10 | - Saini <i>et al.</i> , 2015 |
| Piña | <i>Ananas comosus</i> | Alto | 9.90 | - | - | - | - | - Saini <i>et al.</i> , 2015 |
| Plátano | <i>Musa paradisiaca</i> | Bajo | 0.66 | 0.18 | - | 0.04 | - | - Saini <i>et al.</i> , 2015 |
| Plátano rojo | <i>Musa acuminate</i> | Alto | 8.38 | 8.62 | - | 0.90 | - | - Saini <i>et al.</i> , 2015 |
| Sandía | <i>Citrullus lanatus</i> | Alto | 0.30 | - | - | 2.10 | - | Chandrika <i>et al.</i> , 2009; Olmedilla-Alonso, 2017 |
| Tomate | <i>Lycopersicum esculentum</i> | Muy alto | 16.10 | - | - | - | - | Gul <i>et al.</i> , 2015; Olmedilla-Alonso, 2017; Yoon <i>et al.</i> , 2012 |
| Zanahoria | <i>Daucus carota</i> | Muy alto | 53.60 | 45.00 | - | 1.50 | - | - Olmedilla-Alonso, 2017; Saini <i>et al.</i> , 2015 |

3. Absorción y biodisponibilidad de los carotenoides

La biodisponibilidad se puede definir como la fracción de carotenoides liberados del alimento que son absorbidos a nivel intestinal y están disponibles para su uso en procesos fisiológicos o almacenamiento en el cuerpo (Olmedilla-Alonso, 2017).

El tipo de matriz alimentaria en la que se localizan los carotenoides afecta significativamente su biodisponibilidad. Debido a su naturaleza hidrofóbica y su localización en los tejidos de plantas (plástidos), la biodisponibilidad de los carotenoides es, por lo general, baja en frutas y hortalizas crudas. Por lo tanto, los carotenoides deben de ser liberados de la matriz celular e incorporados en la fracción lipídica (micelas) durante la digestión, para su posterior absorción (Lemmens *et al.*, 2014).

La liberación de los carotenoides del alimento se logra mecánicamente durante la masticación y químicamente por acción de las enzimas digestivas (amilasas, lipasas, pepsina)

y el ácido clorhídrico en el estómago (Fig. 3, 1-2) (Cervantes-Paz, Victoria-Campos y Ornelas-Paz, 2016). Estos procesos ayudan a reducir el tamaño de partícula, lo que aumenta la superficie de contacto que interacciona con las lipasas pancreáticas, sales biliares y otras enzimas (amilasas pancreáticas, nucleosidas, tripsinógeno, quimitripsinógeno, carboxipeptidasa, elastasa, fosfolipasas y éster carboxil lipasa), mejorando la liberación de los carotenoides y su incorporación a las micelas (Fig. 3, 3) (Saini *et al.*, 2015; Bohn *et al.*, 2017). Las sales biliares actúan como emulgentes contribuyendo a la formación y estabilización de las micelas, mientras que las lipasas degradan los lípidos en ácidos grasos y monoglicéridos, favoreciendo la emulsificación (Fig. 3, 4) (Bohn *et al.*, 2017). Las micelas son absorbidas por los enterocitos a través de difusión pasiva o anclaje a proteínas receptoras en la membrana apical de las células, para facilitar su difusión (Fig. 3, 5) (Lemmens *et al.*, 2014).

Después de la absorción, los carotenoides son encapsulados en quilomicrones y transportados al torrente sanguíneo, vía linfática (Fig. 3, 6) (Gul *et al.*, 2015; Salter-Venzon *et al.*, 2017). Una vez incorporados en el torrente sanguíneo (figura 3, 7), los carotenoides son transportados al hígado donde, dependiendo de las necesidades del organismo, se almacenan o se metabolizan en vitamina A (carotenoides provitamina A), por acción de las enzimas CCO (oxigenasas de unión a carotenoides, por sus siglas en inglés), BCO1 y BCO2 (oxigenasas de unión a β -caroteno, por sus siglas en inglés). Los carotenoides remanentes son secretados nuevamente a la circulación e incorporados a las lipoproteínas de muy baja densidad (VLDL), de baja densidad (LDL) y de alta densidad (HDL), para su distribución a otros tejidos como el tejido adiposo (almacenamiento de vitamina A), la piel y el tejido subcutáneo (reservorio de carotenos y xantofílos), la mácula lútea en la retina ocular (luteína, zeaxantina y mesozeaxantina), el páncreas y el endotelio vascular, entre otros (Bohn *et al.*, 2017).

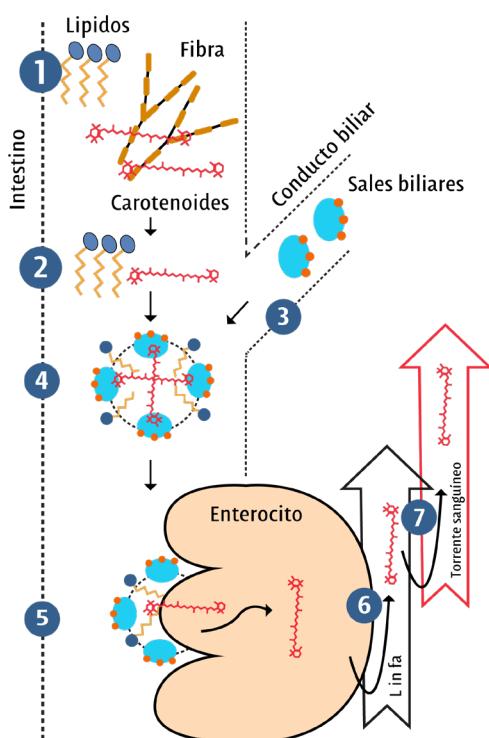


Figura 3. Proceso de absorción de los carotenoides. 1,2) liberación de los carotenoides de la matriz alimentaria; 3) liberación de sales biliares del conducto biliar; 4) emulsificación de los carotenoides y formación de micelas; 5) absorción de los carotenoides en los enterocitos; 6) liberación de carotenoides al sistema linfático, y 7) transporte de carotenoides en torrente sanguíneo (Saini *et al.*, 2015).

La biodisponibilidad de los carotenoides está influenciada por factores dietéticos (el contenido y la naturaleza química de los carotenoides, el contenido de grasa en la dieta, la interacción entre los carotenoides y los otros componentes de la dieta) y fisiológicos (la tasa de absorción de los carotenoides, el estado nutricional, los factores genéticos y el metabolismo de los consumidores) (Lemmens *et al.*, 2014; Gul *et al.*, 2015). Por ejemplo, la fibra dietética, principalmente la fibra soluble, es un factor que limita la disponibilidad de los carotenoides, ya que afecta la viscosidad del contenido gastrointestinal, el tamaño de gotas lipídicas, la disponibilidad de las sales biliares y la lipólisis enzimática de los triacilglicéridos (Cervantes-Paz *et al.*, 2016). A su vez, Gul *et al.* (2015) y Saini *et al.* (2015) afirman que la biodisponibilidad del β -caroteno en plantas es generalmente baja, debido a la unión de los carotenoides a complejos proteicos, fibras y pared celular, tornándolos resistentes a la digestión y degradación, limitando su liberación. Por otro lado, varios investigadores demostraron el efecto de los minerales en la biodisponibilidad de los carotenoides. En este sentido, Borel *et al.* (2016) encontraron que la biodisponibilidad del licopeno, proveniente de pasta de tomate, se ve limitada cuando se ingiere en combinación con 500 mg de calcio, aunque el mecanismo no está del todo definido, siendo probable que el factor limitante sea la formación de micelas. Por su parte, Corte-Real *et al.* (2017) encontraron que la biodisponibilidad de los carotenoides, provenientes de espinaca, no se ve limitada cuando se emplean dosis de 500 y 1000 mg de calcio.

La adición de grasa al alimento mejora la biodisponibilidad de los carotenoides, ya que los lípidos favorecen la formación de las micelas al estimular la liberación de sales biliares (Lemmens *et al.*, 2014). En este sentido, Marriage *et al.* (2017) demostraron que las concentraciones plasmáticas de licopeno y zeaxantina son mayores cuando los carotenoides son ingeridos en combinación con mono y diacilglicéridos (provenientes de aceite de cártamo), en comparación a cuando no se ingiere el aceite. Similarmente, White *et al.* (2017) estudiaron el efecto de un aderezo para ensaladas, elaborado a partir de aceite de soya, en la absorción y biodisponibilidad de los carotenoides provenientes de ensalada de espinaca, lechuga, zanahoria y tomate. Las concentraciones plasmáticas de α -caroteno, β -caroteno, luteína y licopeno, se elevaron conforme se incrementó la concentración de aceite de soya en el aderezo.

El tratamiento térmico altera la pared celular de las plantas y el contenido de carotenoides, lo que a su vez se refleja en su biodisponibilidad. En este sentido, Aschoff *et al.* (2015) demostraron que la biodisponibilidad de β -criptoxantina en jugo de naranja pasteurizado es mayor que en naranja fresca. Además, los

investigadores obtuvieron resultados similares para otros carotenoides (zeaxantina, luteína y zeinoxantina). Por su parte, Vimala, Nambisan y Hariprakash (2011) evaluaron el contenido de carotenoides en camote, sometido a diferentes tratamientos (cocción, freido, secado en horno y secado al sol). Los resultados indican que el secado en horno a 50-60°C, retiene alrededor del 90% de los carotenoides y β-caroteno de camote, en comparación con el producto fresco; mientras que el resto de los tratamientos disminuyen entre un 15 y 30% el contenido de carotenoides. Por otro lado, Odriozola-Serrano, Soliva-Fortuny, Hernández-Jover y Martín-Bellos (2009) investigaron el efecto de dos métodos de tratamiento, pasteurización y pulsos eléctricos, sobre el contenido de carotenoides en jugo de tomate. Los investigadores observaron que los jugos tratados con pulsos eléctricos presentaron el mayor contenido de carotenoides, llegando a la conclusión que el tratamiento con pulsos eléctricos es la técnica más adecuada para mantener el contenido de carotenoides y aumentar su biodisponibilidad, en comparación al tratamiento térmico tradicional. En los casos previamente mencionados, se observa una reducción en el contenido total de carotenoides; no obstante, la biodisponibilidad de los mismos mejora como consecuencia de la disminución del contenido de fibra dietética, liberación del contenido celular, ablandamiento de la materia vegetal y/o disminución de las interacciones entre los carotenoides y otros componentes del alimento; facilitando tanto la liberación de carotenoides como la formación de micelas para la absorción de los mismos.

4. Propiedades benéficas de los carotenoides

4.1 Provitamina A

El valor nutricional de los carotenoides está basado principalmente en su actividad como provitamina A, es decir, su habilidad de conversión a vitamina A (Olmedilla-Alonso, 2017). El mayor aporte de carotenoides provitamina A (β -caroteno, α -caroteno y β -criptoxantina) en la dieta humana proviene de zanahoria, tomate, espinaca y naranja. No obstante, como ya se mencionó previamente, la concentración de carotenoides en los alimentos no es el único factor que determina la mejor fuente nutrimental, sino que también se debe tomar en cuenta su biodisponibilidad y su capacidad de conversión a retinol (Beltrán-de Miguel, Estévez-Santiago y Olmedilla-Alonso, 2015; Olmedilla-Alonso, 2017). Además de los carotenoides ya mencionados, sapotexantina y criptocapsina son otros carotenoides con potencial provitamina A (Chacón-Ordóñez *et al.*, 2017).

Los carotenoides provitamina A cuentan con un anillo β -ionona, el cual es responsable de su actividad como precursores

de retinol, y no se encuentra presente en otros carotenoides como licopeno, luteína y zeaxantina, que no poseen actividad provitamina A (Fig. 4.) (Cruz-Bojórquez, González-Gallego y Sánchez-Collado, 2013).

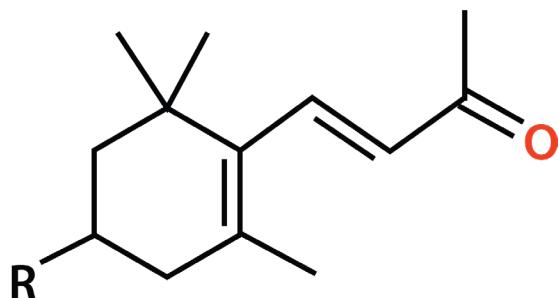


Figura 4. Anillo β -ionona, componente estructural fundamental de carotenoides provitamina A

La vitamina A existe en tres formas: retinal, retinol y ácido retinoico. La vitamina A, obtenida a través de la dieta, proviene de alimentos de origen vegetal (carotenoides provitamina A) o fuentes animales (ésteres de retinol). Los ésteres de retinol son destinados al almacenamiento en tejidos, hígado principalmente, o convertidos en *trans*-retinaldehído y ácido *trans*-ácido retinoico, por acción de las enzimas alcohol y aldehído deshidrogenasas, respectivamente (Cañete, Cano, Muñoz-Chápuli y Carmona, 2017).

La principal fuente de vitamina A (Fig. 5) es el β -caroteno, debido a que es capaz de convertirse en dos moléculas de retinol en presencia de oxígeno, por acción de la enzima β -caroteno 15,15'-monooxigenasa (Gul *et al.*, 2015); a diferencia de α -caroteno y β -criptoxantina, los cuales contribuyen únicamente con una molécula de retinol. Esta enzima rompe al β -caroteno en dos moléculas de *trans*-retinal, las cuales se oxidan en ácido retinoico por efecto de la enzima retinal deshidrogenasa o se reducen en retinol catalizado por la enzima retinal reductasa (Álvarez, Meléndez-Martínez, Vicario y Alcalde, 2015).

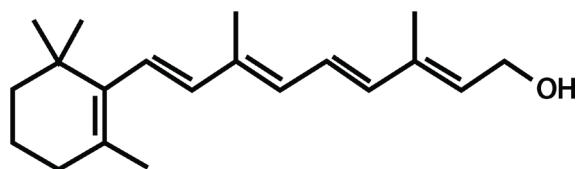


Figura 5. Estructura química del retinol (vitamina A).

La vitamina A tiene múltiples funciones en el organismo, siendo esencial para el desarrollo y mantenimiento de la visión, la expresión génica, el desarrollo embrionario, el mantenimiento de la visión y del sistema inmune, el desarrollo y la diferenciación celular, la reproducción, el control de procesos metabólicos y el funcionamiento del tracto gastrointestinal, entre otros (Álvarez *et al.*, 2015; Gul *et al.*, 2015; Olmedilla-Alonso, 2017). En este sentido, Perera y Yen (2007) resumieron que la presencia de vitamina A y carotenoides provitamina A (β -caroteno y α -caroteno), se han asociado con la disminución del riesgo de cáncer de mama en mujeres post-menopáusicas.

El ácido retinoico actúa como molécula de señalización en el desarrollo vascular y la hematopoyesis durante la etapa embrionaria. Además, participa en la regulación y homeostasis del sistema inmune, la diferenciación de los linfocitos T, la migración de los linfocitos T hacia los tejidos, el desarrollo de las células T dependientes de anticuerpos, la proliferación y diferenciación de los linfocitos B, la protección de los linfocitos B ante la apoptosis (en conjunto con el receptor 9 tipo Toll, TLR-9), la modulación del linaje de granulocitos y la diferenciación de neutrófilos (Cañete *et al.*, 2017). Dichas propiedades han sido aprovechadas en el tratamiento de cáncer. En este sentido, Cañete *et al.* (2017) señalan que el tratamiento con ácido *trans*-retinoico, combinado con trióxido arsénico, ha mejorado el pronóstico de vida de pacientes con leucemia promielocítica aguda. Así mismo, el ácido *trans*-retinoico combinado con interferón- α , altera el metabolismo de las células malignas CD₃₈, haciéndolas susceptibles al tratamiento con anticuerpos anti-CD₃₈ en leucemia de células T.

De acuerdo con Rubin, Ross, Stephensen, Bohn y Tanumihardjo (2017), se han descrito múltiples estudios que establecen una relación entre los bajos niveles plasmáticos de retinol y proteína de unión a retinol (RBP, por sus siglas en inglés) y procesos inflamatorios como infecciones agudas, enfermedades crónico-degenerativas y traumatismo. En este contexto, Cser *et al.* (2004) encontraron que los niveles de β -caroteno, α -caroteno, β -criptoxantina y retinol son inferiores en niños con infecciones agudas en comparación a los niveles en niños sanos. Las alteraciones anteriormente mencionadas se caracterizan por niveles elevados de interleucina-6, la cual induce la expresión de genes que codifican para proteínas de fase aguda, que a su vez causan disminución en la concentración y síntesis de RBP, dando como resultado un decremento en la absorción de carotenoides y del contenido y almacenamiento de vitamina A (Rubin *et al.*, 2017).

4.2 Actividad antioxidante

Investigaciones recientes señalan el potencial antioxidante de los carotenoides asociándose con la protección frente a enfermedades crónicas como la formación de cataratas, enfermedades coronarias, algunos tipos de cáncer, obesidad (Salter-Venzon *et al.*, 2017) y asma (Bohn *et al.*, 2017), entre otras; sin embargo, estos compuestos no son los únicos únicos implicados en la prevención de dichas enfermedades. Los carotenoides implicados juegan un papel fundamental como agentes acarreadores de electrones y protección de órganos, tejidos y células, frente al daño inducido por especies reactivas de oxígeno (ROS, por sus siglas en inglés), especies reactivas de nitrógeno (RNS, por sus siglas en inglés) y lípidos peróxidos (Nagayama *et al.*, 2014; Saini *et al.*, 2015). Los mecanismos de eliminación de radicales libres, por parte de los carotenoides, son transferencia de electrones, formación de aductos y transferencia de un átomo de hidrógeno (Cervantes-Paz *et al.*, 2016).

Los carotenoides β -caroteno, α -caroteno, zeaxantina, β -criptoxantina, luteína y licopeno poseen gran actividad antioxidante, favoreciendo la eliminación del singulete de oxígeno ($^1\text{O}_2$) por su estructura isoprenoide (dobles enlaces conjugados) (Gul *et al.*, 2015; Cervantes-Paz *et al.*, 2016; Xavier y Pérez-Gálvez, 2016). No obstante, el licopeno y el β -caroteno son más eficaces en la eliminación del singulete de oxígeno en comparación a luteína y otras xantofilas (Perera y Yen, 2007).

Múltiples autores han señalado las propiedades antioxidantes de los carotenoides tanto en condiciones *in vitro* como *in vivo* y su papel a nivel celular. En este sentido, Pons *et al.* (2014) demostraron que el β -caroteno proveniente de naranjas, aumenta la resistencia del nematodo *Caenorhabditis elegans* frente al estrés oxidativo inducido por peróxido de hidrógeno. De manera similar, Yazaki, Yoshikoshi, Oshiro y Yanese (2011) demostraron la capacidad antioxidante del carotenoide astaxantina, al incrementar el tiempo de vida media del nematodo *C. elegans*, así como también potenciar la expresión de los genes de las enzimas catalasa y superóxido dismutasa (SOD), las cuales forman parte del mecanismo de defensa antioxidante ante el daño oxidativo en los organismos; y disminuir la producción mitocondrial de ROS. Por su parte, You, Jeon, Byun, Koo y Choi (2015) demostraron que el β -caroteno y los carotenoides sintéticos BASY BT son capaces de reducir los niveles de ROS en el nematodo *C. elegans*, observándose que el carotenoide BT posee la mayor actividad antioxidante de los tres compuestos.

La combinación de antioxidantes es más efectiva para prevenir el estrés oxidativo en comparación al uso de los compuestos individualmente. Los carotenoides son parte del sistema

antioxidante del cuerpo humano, interactuando de manera sínérgetica con otros antioxidantes (Perera y Yen, 2007; Van Rooyen, Esterhuyse, Engelbrecht y du Toit, 2008;). En este sentido, Milde, Eistner y Grabmann (2007) demostraron que el uso de rutina (flavonoide) en combinación con luteína o licopeno previene mejor la oxidación de LDL, en comparación con cada uno de estos antioxidantes usados por separado. Asimismo, Varakumar, Kumar y Sarathi-Reddy (2011) demostraron la capacidad antioxidant de los vinos elaborados a partir de siete variedades diferentes de mango. De las variedades estudiadas, Alphonso presentó el mayor contenido de carotenoides y compuestos fenólicos totales, lo que se asoció a la mayor inhibición de la oxidación de LDL en ratas. En ambos estudios se observó una relación directa entre la presencia de carotenoides y compuestos fenólicos y su potencial antioxidant, demostrando el efecto sínérgetico y benéfico que existe entre ambas clases de compuestos.

La oxidación de LDL y el desarrollo de atherosclerosis se ha asociado al estrés oxidativo (Milde *et al.*, 2007). Como se mencionó previamente, los carotenoides pueden bloquear la formación de radicales peróxidos generados durante la oxidación lipídica, lo que protege las membranas celulares y lipoproteínas del daño oxidativo (Cervantes-Paz *et al.*, 2016). En este sentido, la ingesta de licopeno, β-caroteno (Perera y Yen, 2007) y astaxantina (Li *et al.*, 2012), ha demostrado la prevención de la oxidación de LDL, un factor clave para el desarrollo de atherosclerosis y enfermedad coronaria. Así mismo, Shegokar y Mitri (2012), concluyeron que el consumo de luteína conlleva a un ligero adelgazamiento de las arterias carótidas en comparación con las de aquellos individuos que no consumieron carotenoides, reduciendo el riesgo de atherosclerosis.

La degeneración macular relacionada con la edad es una enfermedad ocular asociada con el envejecimiento, que lleva a la pérdida de la visión y ceguera. Existe evidencia que señala que sujetos con una dieta baja en carotenoides y concentración baja de xantofilas en la retina, son más propensos a desarrollar degeneración macular (Shegokar y Mitri, 2012; Yoon *et al.*, 2012). La luteína y la zeaxantina poseen actividad antioxidant, protegiendo a las células maculares en la retina, del estrés oxidativo, e inhiben la formación de drusas (depósitos de grasa en la retina), previniendo el daño macular (Li *et al.*, 2012; Shegokar y Mitri, 2012).

Dai *et al.* (2014) describen el papel de los carotenoides en la reducción del riesgo de fractura de cadera en hombres con osteoporosis, debido a la capacidad de estos compuestos de contrarrestar los efectos del estrés oxidativo, lo que a su vez juega un papel importante en la regulación de la actividad de los osteoblastos y osteoclastos.

Sin embargo, no se debe olvidar que, a pesar de las propiedades antioxidantes que se les atribuyen, investigaciones recientes han demostrado que el consumo de carotenoides en dosis elevadas puede generar productos de descomposición pro-oxidativa, causando efectos adversos en la salud (Cervantes-Paz *et al.*, 2016). Relacionado con esto, Cruz-Bojórquez *et al.* (2013) señalan que animales suplementados con 30 mg β-caroteno/día y expuestos al humo de cigarro durante seis meses, presentan una reducción en ácido retinoico, lo que conlleva a la aparición de células precancerosas, fenómeno que no se observa cuando se utilizan dosis menores (6 mg β-caroteno/día).

4.3 Otras funciones

Además del potencial como provitamina A y actividad antioxidant de los carotenoides, existen evidencias de que estos compuestos desarrollan un papel importante en procesos celulares y moleculares asociados con la prevención de enfermedades crónicas (Olmedilla-Alonso, 2017). En este sentido, los carotenoides participan en la regulación de la proliferación, señalización y comunicación celular, lo que genera cambios en la transcripción de genes y expresión de proteínas, las cuales a su vez también participan en los procesos previamente mencionados. Estos cambios transcripcionales se han asociado con la interacción entre los carotenoides o sus derivados (apocarotenoides y/o retinoides), y los factores de transcripción, o por modificación indirecta de la actividad de transcripción (Perera y Yen, 2007; Álvarez *et al.*, 2015).

Los carotenoides han sido empleados en la prevención y disminución de cáncer, debido a que éstos regulan cambios en la expresión de proteínas, como se mencionó previamente, que forman parte de la proliferación y diferenciación celular, apoptosis, angiogénesis, reparación del ADN, eliminación de carcinógenos e inmunovigilancia (Perera y Yen, 2007; Addis *et al.*, 2009). En este sentido, el β-caroteno es capaz de iniciar la cascada de caspasas a través de la interacción con complejos de señalización en la membrana celular, que desencadenan la apoptosis o muerte celular programada. Por otro lado, el β-caroteno también puede inducir la liberación del citocromo c de la mitocondria y alterar el potencial de la membrana mitocondrial, lo que lleva a la apoptosis (Perera y Yen, 2007). Por su parte, Xavier y Pérez-Gálvez (2016) reportan que la ingesta de 50 mg de β-caroteno durante 10-12 años, ha demostrado incrementar la actividad de células NK (natural killer), las cuales reducen la incidencia de tumores. De igual forma, la regulación de la biosíntesis de prostaglandina E2, que actúa como inmunosupresor, está mediada por la acción del β-caroteno, mejorando el sistema inmune. Por otro lado, se ha demostrado que

el licopeno es capaz de inhibir el crecimiento de células de cáncer de pulmón (Perera y Yen, 2007). De manera similar, el licopeno la zeaxantina y la luteína inhiben la proliferación de células de cáncer de próstata y mama (Perera y Yen, 2007; Li *et al.*, 2012); la capsantina y otros carotenoides aislados de *Capsicum annuum* L., han demostrado poseer actividad antitumoral (Perera y Yen, 2007). Por su parte, Yamaguchi y Uchiyama (2004) señalan que la β-criptoantina estimula la formación de hueso e inhibe su resorción. Así mismo, Sugiura *et al.* (2011) indican que una dieta rica en β-criptoantina y vitamina C es inversamente proporcional a una baja densidad mineral ósea en mujeres, disminuyendo el riesgo de osteoporosis.

Finalmente, cabe mencionar que una dieta rica en carotenoides se asocia con la reducción del desarrollo de cáncer, enfermedades cardiovasculares, diabetes mellitus tipo 2, degeneración macular relacionada con la edad, formación de cataratas, osteoporosis, artritis, asma bronquial e infecciones del tracto urinario, entre otras (Sharma, Karki, Thakur y Attari, 2012; Estévez-Santiago, Olmedilla-Alonso y Fernández-Jalao, 2016; Olmedilla-Alonso, 2017). En contraste, la deficiencia de carotenoides puede llevar a problemas de visión y una baja inmunidad innata y adaptativa (Saini *et al.*, 2015).

Conclusiones y comentarios finales

Las frutas y hortalizas son fuente natural de carotenoides, los cuales destacan por sus propiedades antioxidantes y provitamina A, gracias a lo cual han sido empleados en el tratamiento y/o prevención de ciertas enfermedades. Sin embargo, debido a su naturaleza hidrofóbica, factores dietéticos y fisiológicos, su absorción y actividad fisiológica se han visto limitadas. Es por ello, que es importante continuar con las investigaciones acerca de la biodisponibilidad y las propiedades benéficas de los carotenoides, y su papel en la prevención y/o tratamiento de enfermedades crónicas, así como también elucidar los mecanismos a través de los cuales ejercen estos beneficios en la salud de los organismos. Por último, no hay que olvidar que los carotenoides no son los únicos compuestos responsables de la preventión de enfermedades, sino que participan en conjunto con otros compuestos y/o factores, los cuales contribuyen a mejorar la salud del individuo.

Agradecimientos

El autor Marco Antonio González Peña agradece a la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP) por el apoyo del financiamiento otorgado para sus estudios de doctorado.

Referencias

- Addis, G., Baskaran, R., Raju, M., Ushadef, A., Asfaw, Z., Woldu, Z. y Baskaran, V. (2009). Effect of blanching and drying process on carotenoids composition of underutilized Ethiopian (*Coccinia grandis* L. Voigt) and Indian (*Trigonella foenum-graecum* L.) green leafy vegetables. *Journal of Food Processing and Preservation*, 33, 744-762.
- Álvarez, R., Meléndez-Martínez, A. J., Vicario, I. M. y Alcalde, M. J. (2015). Carotenoid and vitamin A contents in biological fluids and tissues of animals as an effect of the diet: a review. *Food Reviews International*, 31, 319-340.
- Aschoff, J. K., Rolke, C. L., Breusing, N., Bosy-Westphal, A., Högel, J., Carle, R. y Schweiggert, R.M. (2015). Bioavailability of β-cryptoxanthin is greater from pasteurized orange juice than from fresh oranges - a randomized cross-over study. *Molecular Nutrition & Food Research*, 59, 1896-1904.
- Bagetti, M., Facco, E. M. P., Piccolo, J., Hirsch, G. E., Rodríguez-Amaya, D., Kobori, C. N., Vizzotto, M. y Emanuelli, T. (2011). Physicochemical characterization and antioxidant capacity of pitanga fruits (*Eugenia uniflora* L.). *Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 31(1), 147-154.
- Beltrán-de Miguel, B., Estévez-Santiago, R. y Olmedilla-Alonso, B. (2015). Assessment of dietary vitamin A intake (retinol, α-carotene, β-carotene, β-cryptoxanthin) and its sources in the National Survey of Dietary Intake in Spain (2009-2010). *International Journal of Food Science and Nutrition*, 66(6), 706-712.
- Bohn, T., Desmarchelier, C., Dragsted, L. O., Nielsen, C. S., Stahl, W., Rühl, R., Keijer, J. y Borel, P. (2017). Host-related factors explaining interindividual variability of carotenoid bioavailability and tissue concentrations in humans. *Molecular Nutrition & Food Research*, 61(1). doi:10.1002/mnfr.201600685
- Borel, P., Desmarchelier, C., Dumont, U., Halimi, C., Lairon, C., Page, D., Sébédo, L., Bulsson, C., Buffiére, C. y Rémond, D. (2016). Dietary calcium impairs tomato lycopene bioavailability in healthy humans. *British Journal of Nutrition*, 116(2), 2091-2096.
- Britton, G. y Khachik, F. (2009). Carotenoids in food. En G. Britton, S. Liaaen-Jensen y H. Pfander (Eds.), *Carotenoids*

- (volumen 5 Nutrition and Health, pp. 45-66). Alemania: Birkhäuser Verlag Basel.
- Butnariu, M. (2016). Methods of analysis (extraction, separation, identification and quantification) of carotenoids from natural products. *Journal of Ecosystem & Ecography*, 6(2), 193-212.
- Cañete, A., Cano, E., Muñoz-Chápuli, R. y Carmona, R. (2017). Role of vitamin A/retinoic acid in regulation of embryonic and adult hematopoiesis. *Nutrients*, 9(159). doi:10.3390/nutro20159
- Cervantes-Paz, B., Victoria-Campos, C. I. y Ornelas-Paz, J. J. (2016). Absorption of carotenoids and mechanisms involved in their health-related properties. En C. Stange (Ed.), *Carotenoids in nature* (Subcellular Biochemistry, volumen 79., pp. 415-454). Suiza: Springer.
- Chacón-Ordóñez, T., Schweiggert, R. M., Bosy-Westphal, A., Jiménez, V. M., Carle, R. y Esquivel, P. (2017). Carotenoids and carotenoid esters of orange- and yellow-fleshed mamey sapote (*Pouteria sapota* (Jacq.) H.E. Moore & Stearn) fruit and their post prandial absorption in humans. *Food Chemistry*, 221, 673-682.
- Chandrika, U. G., Fernando, K. S. S. P. y Ranaweera, K. K. D. S. (2009). Carotenoid content and *in vitro* bioaccessibility of lycopene from guava (*Psidium guajava*) and watermelon (*Citrullus lanatus*) by high-performance liquid chromatography diode array detection. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 60(7), 558-566.
- Corte-Real, J., Guignard, C., Gantenbein, M., Weber, B., Burgard, K., Hoffman, L., Richling, E. y Bohn, T. (2017). No influence of supplemental dietary calcium intake on the bioavailability of spinach carotenoids in humans. *British Journal of Nutrition*, 117(11), 1560-1569.
- Cruz-Bojórquez, R. M., González-Gallego, J. y Sánchez-Collado, P. (2013). Propiedades funcionales y beneficios para la salud del licopeno. *Nutrición Hospitalaria*, 28(1), 6-15.
- Cser, M. A., Majchrzak, D., Rust, P., Szuklai-László, I., Kovács, I., Bocskai, E. y Elmadfa, I. (2004). Serum carotenoid and retinol levels during childhood infections. *Annals of Nutrition & Metabolism*, 48, 156-162.
- Dai, Z., Wang, R., Ang, L. W., Low, Y. L., Yuan, J. M. y Koh, W. P. (2014). Protective effects of dietary carotenoids on risk of hip fracture in men: The Singapore Chinese health study. *Journal of Bone and Mineral Research*, 29(2), 408-417.
- Estévez-Santiago, R., Olmedilla-Alonso, B. y Fernández-Jalao, I. (2016). Bioaccessibility of provitamin A carotenoids from fruits: application of a standardized static *in vitro* digestion method. *Food & Function*, 7, 1354-1366.
- Guerrero-Legarreta, I., López-Hernández, E., Armenta-López, R. E. y García-Barrientos, R. (2013). Pigmentos. En S. Baudi-Dergal (Ed.), *Química de los Alimentos* (5a. ed., pp. 379-427). México: Pearson Educación.
- Gul, K., Tak, A., Singh, A. K., Singh, P., Yousui, B. y Wani, A. A. (2015). Chemistry, encapsulation and health benefits of β-carotene - a review. *Food Science & Technology*, 1. doi:1018696
- Howitt, C. A. y Pogson, B. J. (2006). Carotenoid accumulation and function in seeds and non-green tissues. *Plant, Cell and Environment*, 29, 435-445.
- Kang, L., Park, S. C., Ji, C. Y., Kim, H. S., Lee, H. S. y Kwak, S. S. (2017). Metabolic engineering of carotenoids in transgenic sweetpotato. *Breeding Science*, 67, 27-34.
- Lee, H. S. y Castle, W. S. (2001). Seasonal changes of carotenoid pigments and color in Hamlin, Earlygold, and Budd Blood orange juices. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49, 877-882.
- Lemmens, L., Colle, I., van Buggenhout, S., Palmero, P., van Loey, A. y Hendrickx, M. (2014). Carotenoid bioaccessibility in fruit- and vegetable-based food products as affected by product (micro) structural characteristics and the presence of lipids: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 38, 125-135.
- Li, H., Tsao, R. y Deng, Z. (2012). Factors affecting the antioxidant potential and health benefits of plant foods. *Canadian Journal of Plant Science*, 92, 1101-1111.
- Marriage, B. J., Williams, J. A., Choe, Y. S., Maki, K. C., Vurma, M. y DeMichele, S. J. (2017). Mono- and diglycerides improve lutein absorption in healthy adults: a randomized, double-blind, cross-over, single-dose study. *British Journal of Nutrition*, 118(10), 813-821.
- Milde, J., Eistner, E. F. y Grabmann, J. (2007). Synergistic effects of phenolics and carotenoids on human low-density lipoprotein oxidation. *Molecular Nutrition & Food Research*, 51, 956-961.
- Nagayama, J., Noda, K., Uchikawa, T., Maruyama, I., Shomomura, H. y Miyahara, M. (2014). Effect of maternal *Chlorella* supplementation on carotenoid concentration in breast milk at early lactation. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 65(5), 573-576.
- Odriozola-Serrano, I., Soliva-Fortuny, R., Hernández-Jover, T. y Martín-Beloso, O. (2009). Carotenoid and phenolic profile of tomato juices processed by high intensity pulsed electric fields compared with conventional thermal treatments. *Food Chemistry*, 112, 258-266.
- Olmedilla-Alonso, B. (2017). Carotenoids: content in foods, in diet and bioavailability. COST Action EUROCAROTEN (CA15136), *Scientific Newsletter* 2, 1-9.

- Perera, C. O. y Yen, G. M. (2007). Functional properties of carotenoids in human health. *International Journal of Food Properties*, 10(2), 201-230.
- Pons, E., Alquézar, B., Rodríguez, A., Martorell, P., Genovés, S., Ramón, D., Rodrigo, M. J., Zacarías, L. y Peña, P. (2014). Metabolic engineering of β-carotene in orange fruit increases its *in vivo* antioxidant properties. *Plant Biotechnology Journal*, 12, 17-27.
- Rubin, L. P., Ross, A. C., Stephensen, C. B., Bohn, T. y Tanumihardjo, S. A. (2017). Metabolic effects of inflammation on vitamin A and carotenoids in humans and animal models. *Advances in Nutrition*, 8, 197-212.
- Saini, R. K., Nile, S. H. y Park, S. W. (2015). Carotenoids from fruits and vegetables: chemistry, analysis, occurrence, bioavailability and biological activities. *Food Research International*, 76, 735-750.
- Salter-Venzon, D., Kazlova, V., Ford, S.I., Intra, J., Klosner, A. E. y Gellenbeck, K. W. (2017). Evidence for decreased interaction and improved carotenoid bioavailability by sequential delivery of a supplement. *Food Science & Nutrition*, 5, 424-433.
- Sanches-Silva, A., Albuquerque, T. G., Finglas, P., Ribeiro, T., Valente, A., Vasilopoulou, E., Trichopoulou, A., Alexieva, I., Boyko, N., Costea, C. E., Hayran, O., Jorjadze, M., Kaprelants, L., Karpenko, D., Filippo-D'Abtuono, L. y Costa, H. S. (2013). Carotenoids, vitamins (A, B, C and E) and total folate of traditional foods from Black Sea area countries. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 93(14), 3545-3557.
- Schwartz, S. J., Cooperstone, J. L., Cichon, M. J., von Elbe, J. H. y Giusti, M. M. (2017). Colorants. En S. Damodaran y K.L. Parkin (Eds.), *Fennema's Food Chemistry* (5a. ed., pp. 681-752). Boca Raton: CRC Press.
- Sharma, K. D., Karki, S., Thakur, N. S. y Attri, S. (2012). Chemical composition, functional properties and processing of carrot - a review. *Journal of Food Science & Technology*, 49(1), 22-32.
- Shegokar, R. y Mitri, K. (2012). Carotenoid lutein: a promising candidate for pharmaceutical and nutraceutical applications. *Journal of Dietary Supplements*, 9(3), 183-210.
- Sugiura, M., Nakamura, M., Ogawa, K., Ikona, Y., Onda, F., Shimokata, H. y Yano, M. (2011). Dietary patterns of antioxidant vitamin and carotenoid intake associated with bone mineral density: findings from post-menopausal Japanese female subjects. *Osteoporosis International*, 22, 143-152.
- Van Rooyen, J., Esterhuyse, A. J., Engelbrecht, A. M. y du Toit, E. F. (2008). Health benefits of a natural carotenoid rich oil: a proposed mechanism of protection against ischemia/reperfusion injury. *Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition*, 17(S1), 316-319.
- Varakumar, S., Kumar, Y. S. y Sarathi-Reddy, O. V. (2011). Carotenoid composition of mango (*Mangifera indica* L.) wine and its antioxidant activity. *Journal of Food Biochemistry*, 35(5), 1538-1547.
- Vimala, B., Nambisan, B. y Hariprakash, B. (2011). Retention of carotenoids in orange-fleshed sweet potato during processing. *Journal of Food Science & Technology*, 48(4), 520-524.
- White, W. S., Zhou, Y., Crane, A., Dixon, P., Quadt, F. y Flendrig, L. M. (2017). Modeling the dose effects of soybean oil in salad dressing on carotenoid and fat-soluble vitamin bioavailability in salad vegetables. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 106(4), 1041-1051.
- Xavier, A. A. O. y Pérez-Gálvez, A. (2016). Carotenoids as a source of antioxidants in the diet. En C. Stange (Ed.), *Carotenoids in nature* (Subcellular Biochemistry, volumen 79, pp. 359-376). Suiza: Springer.
- Yahia, E. M., Gutiérrez-Orozco, F. y Arvizu-de Leon, C. (2011). Phytochemical and antioxidant characterization of mamey (*Pouteria sapota* Jacq. H.E. Moore & Stearn) fruit. *Food Research International*, 44, 2175-2181.
- Yamaguchi, M. y Uchiyama, S. (2004). β-cryptoxanthin stimulates bone formation and inhibits bone resorption in tissue culture *in vitro*. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 258, 137-144.
- Yazaki, K., Yoshikoshi, C., Oshiro, S. y Yanase, S. (2011). Supplemental cellular protection by a carotenoid extends lifespan via Ins/IGF-1 signaling in *Caenorhabditis elegans*. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*. Article ID 596240. doi:10.1155/2011/596240
- Yoon, G. A., Yeum, K. J., Cho, Y. S., Oliver-Chen, C. Y., Tang, G., Blumberg, J. B., Russell, R. M., Yoon, S. y Lee-Kim, Y. C. (2012). Carotenoids and total phenolic contents in plant foods commonly consumed in Korea. *Nutrition Research and Practice*, 6(6), 481-490.
- You, J. S., Jeon, S., Byun, Y. J., Koo, S. y Choi, S. S. (2015). Enhanced biological activity of carotenoids stabilized by phenyl groups. *Food Chemistry*, 177, 339-345.

Artículos de revisión

Combinación de tecnologías de envasado con la aplicación de aceites esenciales en la conservación de alimentos frescos

M. J. Paris* y A. López-Malo

Antimicrobianos en productos de carne de ave listos para el consumo

L. Lastra-Vargas*, A. López-Malo y E. Palou-García

Los beneficios del consumo de carotenoides

M. A. González-Peña*, J. D. Lozada-Ramírez, L. Toxqui-Abascal
y A. E. Ortega-Regules

UDLAP[®]

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