

RESEÑA ANALÍTICA

El ozono: una alternativa sustentable en el tratamiento poscosecha de frutas y hortalizas

Mayra Bataller-Venta, Sandra Santa Cruz-Broche y Mario A. García-Pérez.*

Centro de Investigaciones del Ozono, Centro Nacional de Investigaciones Científicas, Avenida 15 y Calle 230, Reparto Atabey, Ciudad de La Habana, Apartado Postal 6412, Cuba. *Instituto de Farmacia y Alimentos, Universidad de la Habana, Avenida 23 No. 21425, Ciudad de La Habana, Cuba. Código Postal 13600. Correo electrónico: mayra.bataller@cnic.edu.cu

Recibido: 6 de octubre de 2009.

Aceptado: 24 de febrero de 2010.

Palabras clave: ozono, frutas, hortalizas, poscosecha, desinfección.
Key words: ozone, fruits, vegetables, postharvest, disinfection.

RESUMEN. Se realizó una valoración de los resultados y las condiciones de la aplicación del ozono con el objetivo general de evaluarla como una alternativa sustentable en el tratamiento poscosecha de productos frutícolas y hortícolas. Se recuperó información en bases de datos, sitios web y revistas especializadas en el tema. La información de los resúmenes y artículos publicados, fundamentalmente desde 1999 a 2009, fueron clasificados por aspectos de interés. Para el almacenamiento de la información, se utilizó el programa Endnote para la creación de una base de datos. Se evaluaron los resultados de la aplicación del ozono en fase gaseosa o acuosa para el tratamiento, almacenamiento y procesamiento de frutas y hortalizas. La aplicación del ozono a concentraciones relativamente bajas y tiempos de contacto cortos, permite la inactivación de microorganismos, garantiza la calidad del producto agrícola e incrementa su resistencia al deterioro. El ozono es un fuerte agente antimicrobiano y su descomposición espontánea a oxígeno no genera productos tóxicos. El agua del proceso de lavado con el empleo del ozono puede ser reusada, con lo que disminuyen los costos de operación y el impacto ambiental de los efluentes. Se concluyó que la aplicación adecuada del ozono es una alternativa de tratamiento sustentable en la poscosecha de frutas y hortalizas, que merece su espacio como una necesidad del desarrollo sostenible, tanto en países desarrollados como en vías de desarrollo, dada la necesidad del incremento de la producción agrícola y la búsqueda de alternativas viables para el tratamiento y conservación de estos productos agrícolas. No obstante, los autores recomiendan realizar un estudio previo de las condiciones de tratamiento para cada producto. Así como, llevar a cabo un análisis integral del sistema de gestión del producto para lograr un mayor impacto y factibilidad.

ABSTRACT. An analysis about the results and the application conditions with the objective to evaluate the ozone as a sustainable alternative for fruits and vegetables postharvest treatment was carried out. The information recovery was based on databases, web sites, and specialized journals in the field. Information from abstracts and published papers, mostly from 1999 to 2009, it was classified by different aspects of interest. The EndNote software was used to create a database in order to manage information efficiently. Some results were assessed concerning ozone application in the gaseous and aqueous phases for fruits and vegetables treatment, storage and processing. The application of ozone under relatively low concentrations and short contact times, allows the inactivation of microorganisms, ensures the quality of agricultural product and increases its resistance to spoilage. Ozone is a strong antimicrobial agent and it spontaneously decomposes to oxygen without forming toxic residues. The washing process water can be reused with the ozone use, decreasing costs of operation and environmental impact of effluents. The use of ozone should be considered a sustainable alternative in the postharvest treatment of fruits and vegetables, and it requires a place in the strategy for sustainable development, in both developed and developing countries, taking into account the necessity of agricultural production increase and the search for viable alternatives for treatment and conservation of these agricultural products. It is recommended to undertake, for each product, a previous study of treatment conditions and an integral analysis of the management system to achieve a major impact and feasibility by using ozone.

INTRODUCCIÓN

Las frutas y hortalizas presentan una tendencia inherente a deteriorarse por razones mecánicas, fisiológicas, biológicas y ambientales. La cuantía media de las pérdidas por deterioro de estos productos es estimada entre 5 y 25 % en países industrializados y entre 20 y 50 % en países en desarrollo. En este sentido, para disminuir estas pérdidas y poder satisfacer las crecientes necesidades de consumo de estos productos se, debe tomar conciencia

de la importancia de cada aspecto inherente al manejo y a la vida de estos productos perecederos, tanto en su ciclo productivo, como después de su recolección.¹ El desarrollo y la evaluación de tecnologías de manejo poscosecha, que a su vez garanticen la inocuidad de los productos, constituye un objetivo importante a considerar.²⁻⁴

Las tecnologías poscosecha de los productos frutícolas y hortícolas para reducir estas pérdidas se basan fundamentalmente en el conocimiento de los factores

ambientales, fisiológicos y biológicos relacionados con el deterioro. Entre los factores fisiológicos y biológicos de mayor importancia están: la producción de etileno, la velocidad de respiración, la tasa de transpiración y las enfermedades provocadas fundamentalmente por bacterias y hongos.⁵⁻⁷ Entre los factores ambientales más importantes están la temperatura, la humedad relativa, la composición y concentración de los gases de la atmósfera alrededor del producto. El manejo de estos factores permite controlar dentro de ciertos límites, el proceso de pérdida de calidad.^{1,4,7,8}

Debido al daño potencial para la salud en los últimos años hay un control del uso de desinfectantes empleados en la etapa de lavado, tales como disoluciones de hipoclorito, muy utilizadas para el control de microorganismos patógenos en alimentos. Por otra parte, existe la necesidad de evaluar agentes antimicrobianos que sean potentes debido al incremento de enfermedades transmitidas por alimentos y al surgimiento de patógenos emergentes y resistentes a los tratamientos convencionales.⁹⁻¹²

La industria alimentaria dirige sus investigaciones al desarrollo de tecnologías y a la aplicación de desinfectantes seguros y efectivos, tanto para el lavado como para la conservación de los alimentos. El ozono, dado su elevado poder germicida y su descomposición espontánea a oxígeno, se ha convertido en un agente potencial para garantizar la seguridad microbiológica y la calidad de los alimentos.^{9,12-15}

La aplicación más generalizada del ozono ha estado enmarcada desde hace décadas en procesos de potabilización. Desde 1982, la Administración de Alimentos y Medicamentos de los EE. UU. [U.S. Food and Drug Administration, (U.S. FDA)] reconoció al ozono como Sustancia Reconocida Generalmente como Segura [Generally Recognized as Safe, (GRAS)] en la industria del agua embotellada.⁹ En 2001, la U.S. FDA aprobó al ozono como sustancia GRAS para el contacto directo con alimentos,¹¹ lo que junto a otros factores de carácter técnico, económico y social ha permitido un incremento acelerado de la introducción del ozono en la industria alimentaria.^{10,11,13,16,17}

En este sentido, las potencialidades de la aplicación del ozono en el tratamiento poscosecha de frutas y hortalizas han despertado un gran interés. Teniendo en cuenta estas premisas, el presente trabajo tuvo como objetivo valorar diferentes resultados y recopilar información respecto al empleo del ozono en la desinfección y conservación de frutas y hortalizas, para evaluarlo como una alternativa sustentable de tratamiento en la poscosecha.

MÉTODOS

La información de los resúmenes y artículos publicados, fundamentalmente desde 1999 a 2009, fueron clasificados por aspectos de interés. Para el almacenamiento de la información se hizo uso del programa Endnote para la creación de una base de datos.

Aspectos generales

Numerosos estudios en el tratamiento de las aguas indican que el ozono es el desinfectante más efectivo respecto a otras alternativas.^{16,18-20} Posee un elevado poder oxidante y germicida, es inestable tanto en agua como en el aire y se descompone a oxígeno en un tiempo corto sin generar subproductos de reacción indeseables.^{16,18} Estos aspectos favorecen su empleo en las industrias alimentaria y farmacéutica.

La Administración de Seguridad y Salud Ocupacional [Occupational Safety Health Administration, (OSHA)]

y la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los EE. UU. [U.S. Environmental Protection Agency, (U.S. EPA)] especifican como valor límite de concentración 0,08 a 0,1 ppm para una exposición continua durante 8 h y de 0,3 ppm para 15 min. Debido a esto, en los locales donde sean instalados sistemas de ozonización es importante evitar los escapes y chequear con equipos la concentración de ozono ambiental. También deben instalarse destructores de ozono gaseoso a la salida de los sistemas.^{9,14}

El ozono se obtiene *in situ* con el empleo de equipos generadores a partir de aire u oxígeno, por lo que no presenta inconvenientes de almacenamiento y transporte. En las últimas décadas, el desarrollo y mejora en la eficiencia de estos equipos ha sido acelerado.^{17,19,21,22} Estos son más compactos, presentan un menor consumo de energía y un elevado grado de automatización, alcanzan concentraciones en el gas hasta del 15 % en peso. Respecto a las celdas de generación, se destaca la mejora del sistema de enfriamiento y el uso de nuevos materiales dieléctricos.^{19,21} Además, existe un incremento del empleo de oxígeno como gas de alimentación a nivel industrial y en la obtención de materiales muy resistentes al ozono.^{21,22} Estos aspectos mencionados han permitido abaratar los costos de la producción de ozono.

La ozonización como alternativa en el tratamiento y conservación de alimentos se ha extendido en el lavado para la desinfección, en el almacenamiento y en la elaboración.^{10,12,17,23} Entre los factores que han incidido en el incremento de las aplicaciones del ozono en la industria alimentaria se tiene:

- El aumento de la demanda de alimentos frescos, nutritivos y seguros.^{3,24}

- Las ventajas del ozono respecto al cloro en el proceso de lavado son numerosas. La toxicidad del cloro debido a los subproductos de reacción implica un riesgo potencial para la salud y el medio ambiente.^{12,25,26} Existen reportes de brotes de contaminación en alimentos por microorganismos resistentes al cloro.^{13,27} En este sentido, el ozono ha sido propuesto como una alternativa de desinfección segura.

- La U.S. FDA aprobó en el 2001 al ozono como sustancia GRAS para el contacto directo con alimentos con el empleo de las Buenas Prácticas de Manufactura.^{12,27}

La aplicación del ozono tanto en fase gaseosa y acuosa, permite inactivar bacterias, virus, hongos y parásitos que contaminan los alimentos.^{12,13,23} También hay estudios de degradación de micotoxinas con ozono, las cuales son metabolitos secundarios producidos por las especies de *Aspergillus*, *Penicillium* y *Fusarium*. McKenzie *et al.*²⁸ lograron la degradación de varios tipos de aflatoxinas empleando ozono gaseoso. Aunque resulta un objetivo difícil, la prevención de la contaminación por hongos es la mejor solución para el problema de las micotoxinas en los alimentos. Por lo tanto, es necesaria la búsqueda de métodos eficientes de detoxificación de alimentos contaminados y la ozonización resulta una alternativa útil.^{17,29-31}

Respecto a las frutas y hortalizas existe información de que el ozono bajo condiciones adecuadas de exposición, durante el lavado y almacenamiento, extiende la vida de anaquel y preserva las características organolépticas de estos productos.^{5,9,10,12,14,32} La información de patentes consolida la aplicación de la ozonización dirigida a la conservación de estos productos.^{8,9} En los últimos años, se registra un incremento del empleo de la ozonización en la industria agro-alimentaria, así como del número de trabajos científicos y tecnológicos que valoran su alcance

y sus limitaciones, dado fundamentalmente por falta de una evaluación previa a su aplicación. En este sentido, con el objetivo de recoger adecuadamente la información sobre los resultados a diferentes escalas de las aplicaciones del ozono en este sector, la Asociación Internacional del Ozono [Internacional Ozone Association, (IOA)] y la Fuerza de Trabajo Agro-alimentaria [Agri-Food Task Force, (AFTF)] elaboraron una guía, que está disponible en la red: <http://www.io3a.org>.⁹

Tratamiento con ozono en fase acuosa de frutas y hortalizas

Actualmente, el aumento en las exigencias de las regulaciones de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [Food and Agriculture Organization of the United Nations, (FAO)] y la Organización Mundial de la Salud (OMS)^{3,24} ha obligado a una selección más rigurosa de los desinfectantes utilizados en los procesos de lavado de frutas y hortalizas. Los productos agrícolas suelen estar contaminados en su superficie por pesticidas, herbicidas y microorganismos. Por lo tanto, requieren de lavados con agua que contenga algún desinfectante disuelto. La desinfección no siempre es eficaz, además, estos lavados generan aguas residuales con una elevada concentración de microorganismos y productos químicos.^{9,14,33} Esto explica la importancia de aplicar alternativas de tratamiento eficaces para dar solución a ambas problemáticas.

Existen numerosos reportes que reconocen la efectividad del tratamiento de frutas y hortalizas con agua ozonizada a diferentes escalas y condiciones experimentales. Este tratamiento permite alcanzar un elevado grado de desinfección de estos productos y genera efluentes con una menor carga contaminante respecto a otras alternativas.^{14,17,33} En este sentido, indicadores importantes de calidad del agua, como las demandas química y bioquímica de oxígeno, arrojan valores menores y el vertimiento de estos efluentes tiene un menor impacto ambiental. También, la ozonización de estas aguas permite su reúso en el proceso de lavado contribuyendo a la disminución del consumo de agua. Hay que tener en cuenta, el tiempo de contacto entre el ozono y el efluente, así como la presencia del elevado contenido de sólidos suspendidos. Es conocido, que la reducción de estos últimos disminuye la demanda de ozono y facilita la inactivación de los microorganismos.¹⁴ Por esta razón, varios trabajos recomiendan la instalación de un sistema de filtros en la línea de recirculación del agua para retener los sólidos suspendidos.^{14,27,33} Rice¹⁷ reporta que sistemas de ozono instalados en plantas procesadoras de alimentos en EE. UU. permitieron una reducción del tiempo de drenaje y llenado de las cámaras de lavado con la aplicación de 1,5 mg/L de ozono disuelto,

El lavado con agua ozonizada puede efectuarse por el método de aspersión con empleo de duchas y por inmersión de los productos en tanques o en canales de lavado. Para la inmersión, el agua puede ozonizarse previamente o se puede introducir una corriente gaseosa con ozono, mediante un burbujeo en el agua con el empleo de difusores o eyectores. Respecto a las duchas, el agua es ozonizada previamente y requiere de una concentración de ozono disuelto superior a la necesaria en el método por inmersión. En todos los casos es importante garantizar un adecuado contacto entre el ozono disuelto y los productos agrícolas a tratar.^{9,14} El control del ozono disuelto es necesario, dada su importancia significativa en el proceso de desinfección, así como el

de la concentración de ozono ambiental para la seguridad de los trabajadores.

Con el empleo de un sistema de duchas y concentraciones de 1,5 mg/L de ozono disuelto en una planta procesadora de ajo fueron reportadas reducciones entre un 20 y 30 % en conteos de mesófilos aerobios.⁹ Resultados similares han sido obtenidos con el empleo de disoluciones con grandes concentraciones de hipoclorito de sodio, superiores a 125 mg/L, requeridas para el lavado con este desinfectante, aunque esto provocó problemas de deterioro en la instalación que tuvieron que ser solucionados con la aplicación del ozono. El costo de inversión del sistema de ozonización en esta planta fue de 19 000 USD y el tiempo de recuperación de 17 meses favorecido por la reducción del costo de operación debido a la disminución del consumo de hipoclorito y de gastos por mantenimiento de la instalación.^{9,17}

En una empaquetadora industrial de fresas con una amplia distribución en EE. UU., que emplea desde 1998 un sistema de lavado por ducha con agua ozonizada con 3 mg/L, se ha logrado la reducción de mesófilos aerobios, *Echerichia coli*, hongos y mohos, así como prolongar la vida de anaquel de las fresas.^{17,27} Por otra parte, la empresa *Taste Apple*, reporta la experiencia satisfactoria del lavado de manzanas con agua ozonizada. El empleo de un sistema de canal de agua con 0,1 mg/L de ozono disuelto permitió una reducción de 70 000 hasta 730 colonias de hongos por gramo, mientras que por un sistema de duchas de agua con 1 a 3 mg/L, igual carga inicial disminuyó hasta 1 200 colonias de hongos por gramo.¹³ Un estudio realizado por Hampson y McLean³⁴ a escala de planta piloto, en el lavado de tomates verdes mediante su inmersión en agua ozonizada, con 0,75 mg/L durante 10 min, no observó ningún efecto en el valor nutricional (vitamina A, vitamina C y ácido fólico), lo cual sugiere que el ozono no penetra en el fruto.

Otra aplicación importante del agua ozonizada es su empleo en la higienización o desinfección de las líneas de producción y equipamiento de las plantas procesadoras o de elaboración.^{9,27,35} Un importante reporte de equipos comerciales, instalados a nivel industrial, para la aplicación del ozono en fase acuosa en la industria agro-alimentaria fue realizado por Loeb.²³ En él se describe cómo un sistema de contacto identificado como *NatureWash™* de la Praxair permite realizar varias operaciones tales como: el lavado previo, la desinfección con agua ozonizada y el secado con aire de frutas y hortalizas mínimamente procesados (frescos y cortados). En el propio equipo, el agua ozonizada es reciclada con un 80 % de aprovechamiento. Los resultados indican que se extiende la vida de anaquel de los productos y que pueden ser almacenados a una temperatura más elevada. Otro equipo referido es el llamado *Multi-Point-Intervention* de la DEL Ozone Inc. destinado para la desinfección de superficies y productos, el cual garantiza un caudal de agua ozonizada de 15 L/min con una concentración de ozono disuelto de 2 mg/L. Por otra parte, se informa que el sistema *Tech Clean-in Place (CIP)* desarrollado por *ClearWater* ha sido instalado en procesadoras de ajo, en la industria del vino y de cerveza en California. La validación del sistema *Anti-Microbial Ozone System (Intervent)* fue implementado con resultados exitosos.

Aunque el desarrollo tecnológico resulta apreciable, sin embargo, es criterio de los autores que los sistemas de contacto para el lavado con agua ozonizada pueden ser diseñados de acuerdo con la disponibilidad de recursos, siempre que se garantice la transferencia del ozono de la fase gaseosa al seno del líquido y un adecuado con-

tacto entre el ozono disuelto y el producto agrícola. La implementación del método de inmersión con burbujeo no resulta compleja y los ozonizadores que se acoplan pueden tener una menor capacidad de generación que los requeridos por el método de las duchas o aspersión, ya que demanda una menor concentración de ozono disuelto.

Efecto del pH y la temperatura del agua

El proceso de ozonización en medio acuoso descrito por Hoigné y Staehelin involucra dos especies químicas,³⁶ el ozono molecular a pH bajo y los radicales hidroxilo ($\cdot\text{OH}$) a pH elevado, que tienen un tiempo de vida medio muy bajo y son generados por la descomposición del ozono, por lo tanto, la estabilidad del ozono se incrementa cuando decrece el pH. Según los criterios de varios autores, la oxidación ocurre por la acción de ambas especies y la desinfección fundamentalmente por la acción del ozono molecular.^{37,38} Estudios realizados avalan que la inactivación de varios microorganismos se incrementa al disminuir el pH; Facile *et al.*³⁹ observaron una mayor disminución de esporas de bacterias aerobias en medio ácido, tras aplicar menores concentraciones de ozono disuelto y tiempos de contacto. De manera similar, Foegeding apreció un incremento de la letalidad del ozono contra esporas de *Bacillus* y *Clostridium* al disminuir el pH del medio.¹² Hasta el momento, predomina el criterio del empleo de agua ozonizada a pH bajo, el cual los autores del presente trabajo comparten. No obstante, se han desarrollado investigaciones^{15,38,40} al respecto y continúa el interés de evaluar el efecto del pH, la disminución del ozono molecular y el papel de los radicales libres en la inactivación microbiológica.

En el lavado con agua ozonizada de frutas y hortalizas, también es importante considerar, el efecto del pH del agua en la prolongación de la vida de anaquel. En este sentido, Wei *et al.*⁴¹ evaluaron el efecto del ozono en lechugas y fresas bajo condiciones controladas de pH, tiempo de contacto, temperatura y concentración de ozono disuelto. Estos autores observaron que el tratamiento con ozono a pH menores que 8 retardó sustancialmente la velocidad de respiración de lechugas y la pérdida de firmeza, sin un efecto importante en la reducción de la microbiota natural. Respecto a las fresas, bajo las mismas condiciones, la ozonización no arrojó ningún efecto en estos indicadores por lo que recomendaron entonces la evaluación del efecto del pH para cada producto antes del tratamiento.

Con relación a la temperatura del agua de lavado hay determinadas discrepancias en los resultados, que pueden estar dadas por el tipo de microorganismo, la fisiología de la fruta u hortaliza, el valor de la temperatura empleada y las condiciones previas de tratamiento. Es conocido que el ozono logra mayor solubilidad a bajas temperaturas, por lo tanto, se plantea de manera general que el empleo de agua fría es más efectiva en el proceso de lavado de los productos, así como de las superficies de equipos.^{14,42} Por otra parte, hay que considerar que la temperatura del agua de lavado desempeña un papel importante en la prevención de la penetración de microorganismos al interior del producto. Al enfriar el agua, debido a la caída de temperatura en el producto, se genera una contracción de los gases dentro de él que crea un vacío que posibilita la penetración de agua y microorganismos al interior del producto.^{34,42} Para prevenir este inconveniente, Artés² plantea, que la temperatura del agua de lavado debe ser unos 5 °C más elevada que la temperatura del fruto u hortaliza.

Cantwell y Kasmire reportan estudios de la introducción de *Salmonella* spp. dentro de tomates sometidos

a un cambio de temperatura de 15 °C, así como de *Echerichia coli* O157:H7 en lechugas.⁸ Sin embargo, en un intervalo de temperatura entre 10 y 26 °C se reporta la eficacia de la inactivación de varios microorganismos patógenos presentes en hojas de lechuga, frescas y cortadas, expuestas a concentraciones de ozono disuelto entre 0,5 y 4,5 mg/L durante tiempos de contacto de hasta 3,5 min.⁴³

Kim¹² señala que algunos autores han observado un efecto menor en la cinética de inactivación de virus y bacterias al disminuir la temperatura de 5 a 1 °C, mientras otros reportan un incremento de la efectividad del ozono al aumentar la temperatura. Sin embargo, un análisis teniendo en cuenta la energía de activación indica que bajo una misma dosis de ozono, el grado de inactivación de las bacterias y esporas bacterianas será mayor a menor temperatura, mientras para los protozoos la efectividad de la inactivación será menor.^{38,44}

El estudio del prelavado de zanahorias con agua ozonizada realizado por Klaiber⁴⁵ no redujo los conteos microbianos a 4 °C y pH 8 después de 2 min. Baur⁴⁶ tampoco observó una mejoría de la calidad microbiológica de lechugas prelavadas a 4 °C respecto al prelavado con agua con cloro. Yuan *et al.*³³ evaluaron la eficacia bactericida del ozono en el lavado de manzanas, naranjas y papas, inoculadas con *Echerichia col*, empleando temperatura de 2 °C y concluyeron que a concentraciones de ozono disuelto por debajo de 1 mg/L es inefectivo el lavado, mientras que a 2 mg/L solo se alcanza un 90 % de inactivación del patógeno. Este resultado puede estar dado por la baja temperatura empleada. En el lavado de tomates verdes inmersos en agua ozonizada, Hampson y McLean³⁴ observaron poca variación en la inactivación de mesófilos aerobios y coliformes totales respecto al control. Ambos plantean que este resultado puede estar relacionado con el efecto de la baja temperatura del agua de lavado, la fisiología del tomate y la presencia de microorganismos en zonas de difícil acceso del ozono, como la región del pedúnculo.

Teniendo en cuenta, los resultados antes mencionados se recomienda mantener en el tratamiento con ozono en fase acuosa, un pH bajo y una temperatura del agua superior a la del producto. En general, se propone emplear el agua a temperatura ambiente y mantener el pH del agua procedente del acueducto (pH neutro). No obstante, debe realizarse la evaluación del efecto de la temperatura y el pH para cada producto frutícola y hortícola previamente al tratamiento.

Aplicación en las ensaladas mixtas de frutas y de hortalizas

El incremento en la demanda de estos productos ha movilizado un sector muy importante de la industria de alimentos.⁴⁷ Sin embargo, la pudrición de ensaladas de frutas y hortalizas frescas y cortadas, aun bajo refrigeración, es la mayor inquietud de los productores. Los microorganismos más comunes asociados a estos productos causantes de enfermedades transmitidas por alimentos son: *Salmonella* spp., *Listeria monocytogenes*, *Shigella* spp. y *Echerichia coli* O157:H7, además de que existen peligros potenciales de contaminación con bacterias anaerobias como *Clostridium botulinum*.⁸

Otro aspecto es que en los productos mínimamente procesados la respiración se incrementa por las operaciones de pelado y cortado, siendo su vida de anaquel menor que la de los productos frescos no cortados. En este sentido, estas operaciones provocan daños mecánicos que aumentan el riesgo de alteración de los tejidos, lo que provoca menor resistencia al pardeamiento enzi-

mático y al ataque de microorganismos. El tratamiento con agua ozonizada ha sido reportado como beneficioso para estos productos.

Zhuang *et al.*⁴⁸ evaluaron el efecto de este tratamiento en la fisiología de coliflores frescas y cortadas, que fueron empacadas y almacenadas bajo refrigeración. Propusieron mantener las coliflores bajo una concentración de ozono disuelto de 1 mg/L durante 50 min para garantizar el control de los microorganismos. Aunque no observaron diferencias significativas en la velocidad de respiración, en el contenido de proteínas y en la peroxidación lipídica respecto al control, sí observaron una reducción en la formación de etileno después de 22 h de almacenamiento. Por el contrario, Zhang *et al.*⁴⁹ reportaron que la velocidad de respiración de apio cortado fresco fue retardada por el tratamiento con ozono, similar comportamiento observaron Beltrán *et al.*⁵⁰ en lechugas procesadas. Estos resultados se corresponden con los de Wei *et al.*⁴¹ que bajo condiciones muy controladas observaron la disminución de la velocidad de respiración en lechugas. Por tanto, los autores de este trabajo consideran que hay un efecto favorable del lavado con agua ozonizada al disminuir la velocidad de respiración. Otros factores fisiológicos que afectan la calidad de estos productos mínimamente procesados antes del consumo deben ser estudiados con mayor profundidad.

Recientemente, Lorente⁸ realizó una revisión extensa sobre el procesamiento de hortalizas mínimamente procesadas y planteó que el empleo del ozono es un método de tratamiento y conservación adecuado. Destacó que concentraciones de ozono de 2 mg/L en el agua de lavado permiten reducciones de contaminación microbiológica superiores al 90 %, similares a las alcanzadas con concentraciones de cloro igual o mayores a 100 mg/L.

Strickland *et al.*⁵¹ destacaron los resultados favorables, durante seis años, de la aplicación del ozono en el procesamiento y empaque de ensaladas frescas y cortadas en la *Strickland Producer Co.* Asimismo, Rice¹⁷ plantea que la introducción del lavado con agua ozonizada permite una reducción de la elevada concentración de cloro (200 mg/L) que requiere el tratamiento convencional de las ensaladas. [Este autor resume los resultados obtenidos de varios indicadores del proceso al aplicar lavados con 0,5 a 1,5 mg/L de ozono disuelto, seguido de un lavado con concentraciones de cloro mucho menores]. Además, aprecia un incremento de la vida de anaquel de hasta de 25 d y una reducción del 60 % del consumo de agua, con la correspondiente disminución del costo de operación y de los volúmenes de vertimiento.

Aunque a nivel internacional el sector del mercado de ensaladas mixtas de frutas y hortalizas es reducido,⁹ dado el incremento actual de la demanda de estos productos y la información obtenida, se recomienda el lavado con agua ozonizada previamente a su empaquetamiento, independientemente de la tecnología que se disponga para el empaque. En Cuba, el sector del mercado dirigido al turismo y al servicio de aerolíneas debe ser valorado para su introducción.

Tratamiento con ozono en fase gaseosa de frutas y hortalizas

El lavado con agua, incluso con empleo del ozono, en ocasiones no es suficiente para eliminar la contaminación microbiológica que provoca importantes pérdidas por putrefacción de los productos.¹⁴ La aplicación del ozono en fase gaseosa, en productos frutícolas y hortícolas, además de tener un efecto importante en la inactivación de microorganismos, interviene en la disminución de la concentración de etileno.

La maduración de las frutas y hortalizas es un proceso complejo asociado al incremento de la producción de etileno, considerada como la fitohormona de la maduración, que tiene importantes efectos sobre la fisiología de estos productos.^{6,8} La degradación del etileno en el aire por el ozono ha sido bien estudiada.⁵² El ozono gaseoso puede bombarse hacia el interior del local de almacenamiento, de manera continua o intermitente, insertando los ozonizadores en la unidad de ventilación o aire acondicionado que garantiza la climatización.⁴ También, tratamientos puntuales son realizados en tiempos muy cortos y bajo elevadas concentraciones, respecto a las empleadas durante el almacenamiento.⁹

Efecto de la temperatura y la humedad relativa

La temperatura y la humedad relativa representan un papel primordial en el crecimiento de los microorganismos en la superficie de frutas y hortalizas. A medida que estos factores aumentan se produce un crecimiento exponencial de los microorganismos. Las condiciones recomendadas de temperatura y humedad, para la aplicación del ozono en fase gaseosa, pueden ser ajustadas a las condiciones requeridas en la práctica industrial para la conservación de esos productos. Es conocido que las bajas temperaturas favorecen la estabilidad del ozono y su efectividad.^{4,12} El empleo de la refrigeración, según el producto, debe estar acompañado de elevada humedad relativa siempre que se garantice un control del crecimiento de microorganismos.^{8,12,14} El poder germicida del ozono es despreciable por debajo del 45 % de humedad relativa y se recomiendan valores por encima del 90 %. La necesidad de la presencia de humedad en la célula microbiana para su inactivación por el ozono ha sido dilucidada desde hace décadas.¹¹

La velocidad o tasa de transpiración depende de los factores biológicos propios de cada producto y las condiciones ambientales en las que son mantenidos. La transpiración es uno de los factores causantes del deterioro fisiológico, pues provoca pérdida de turgencia y deshidratación.^{7,53} Esto trae como resultado una apariencia poco atractiva y pérdidas de peso, lo que reduce la calidad del producto y su valor comercial.

Las temperaturas utilizadas en la refrigeración disminuyen la actividad de las enzimas y los microorganismos responsables del deterioro, reducen el ritmo respiratorio y conservan las reservas que son consumidas en este proceso, retardando así la maduración, asimismo reducen el déficit de la presión de vapor entre el producto y el medio ambiente, disminuyendo la pérdida de agua por transpiración.⁷ Por su parte, la humedad relativa incide en las pérdidas de peso dadas por la pérdida de agua de los productos. Como esta es directamente proporcional a la diferencia de presión de vapor entre el producto y el medio ambiente y esta diferencia de presión a su vez es inversamente proporcional a la humedad relativa del aire alrededor del producto, para evitar este problema, junto con el empleo de las bajas temperaturas es recomendado mantener una gran humedad relativa, por tanto, el déficit entre las presiones de vapor es menor y la transpiración se reduce.^{7,12,53}

El tratamiento con ozono gaseoso de locales refrigerados ha sido efectivo en la reducción de *Listeria monocytogenes*.⁴ Kim *et al.*¹² resaltaron la ocurrencia de una reducción de la pérdida de peso y de la podredumbre de manzanas almacenadas bajo concentraciones de ozono en el aire de 5 a 6 mg/m³ durante 4 h/d, a una humedad relativa entre 90 y 95 % y una temperatura de 1 °C. Otros reportes iniciales han atribuido el incremento de la vida

útil de manzanas y naranjas a la oxidación del etileno y remoción de productos metabólicos por el ozono, aunque indicaron un efecto determinante en la desinfección, aspecto sostenido por estudios posteriores. Barth *et al.*⁵⁴ no observaron crecimiento de hongos y presencia de daños en fresas tratadas durante 12 d a 12 °C, bajo concentraciones de ozono de 0,2 a 0,6 mg/m³. Por otra parte, Pérez *et al.*⁵⁵ trataron fresas bajo una concentración de ozono de 0,7 mg/m³ y a 2 °C durante 3 d con lo que lograron una efectividad parcial en la prevención de *Botrytis cinerea* cuando se almacenaron posteriormente durante 2 d a 20 °C.

Sarig *et al.* evaluaron la exposición de racimos de uvas a un flujo de 8 mg/min durante 20 min y observaron una considerable reducción de colonias de bacterias, hongos y levaduras, además en el almacenamiento a temperaturas bajas apreciaron una disminución de las pérdidas por pudrición. Por otro lado, se logró el control de la inactivación de uvas inoculadas previamente con *Rhizopus stolonife* y los resultados fueron similares a la fumigación con dióxido de azufre.¹²

Respecto al almacenamiento de cebollas y papas existen reportes alentadores bajo concentraciones de ozono de 0,2 mg/m³ por 5 h/d durante 5 d, que revelaron una disminución de la actividad de la catalasa y peroxidasa, del crecimiento de microorganismos y en el porcentaje de pérdidas. Estudios a escala industrial con 3 mg/m³, 6 a 14 °C y 93 a 97 % de humedad relativa indicaron que la composición química y las propiedades organolépticas de estos productos varió poco.¹² Asimismo, una evaluación¹⁷ de los resultados del almacenamiento de cebollas y papas durante meses bajo concentraciones de 1,5 mg/m³ indicó una gran factibilidad económica y un elevado control de la enfermedad podredumbre del cuello (*neck rot*), ocasionada por un hongo en las cebollas y de la podredumbre rosada (*pink rot*), causada por *Phytophthora erythroseptica* en las papas. Estos productos fueron expuestos previamente a 600 mg/m³ durante 15 a 30 s empleando el sistema *O3Zone-Tunnel*, la aplicación y el resultado de este esquema de tratamiento puede relacionarse con la presencia de las esporas.

Una investigación⁵⁶ con zanahorias inoculadas con hongos patógenos y expuestas durante 8 h/d por 28 d bajo un flujo de gas de 0,5 L/min con concentraciones de hasta 60 mg/L indicó una reducción del crecimiento en función del aumento de la concentración de ozono, la velocidad de respiración y la pérdida de electrolitos, así como alguna diferencia de color total. Un reporte de la ozonización de cinco variedades de tomates a 12 °C y 85 % de humedad relativa, destacó que la mayor utilidad se basa en el control fitosanitario del producto.⁵⁷

En el tratamiento con ozono gaseoso, es recomendable evaluar la alternativa de aplicación teniendo en cuenta el manejo poscosecha que requiera la fruta u hortaliza en cuestión. Si el producto al ser cosechado está contaminado por hongos es recomendable aplicar elevadas concentraciones de ozono gaseoso en tiempos cortos, identificada esta alternativa como una fumigación de *shock*, y mantener después una concentración baja durante el tiempo de conservación requerido antes del consumo. En otros casos, puede aplicarse la ozonización con el empleo de bajas concentraciones de ozono en el ambiente de los locales o cámaras donde se almacenen los productos. Es importante considerar las condiciones de temperatura y humedad que requiere cada producto, así como las recomendaciones generales para la ozonización.

Efecto de la resistencia y de la accesibilidad del ozono al microorganismo

Se plantea el orden descendente de resistencia al ozono siguiente: protozoos, hongos, bacterias esporuladas, bacterias no esporuladas y virus.⁵⁸ Las investigaciones concluyen que existe una relación entre las características morfológicas de los microorganismos y su resistencia al ozono.^{15,44}

La sensibilidad de bacterias patógenas como *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus*, *Bacillus cereus*, *Enterococcus faecalis*, *Salmonella enteritidis* spp. *thyphimurium* y *Yersinia enterocolitica* a la acción del ozono en fase acuosa ha sido demostrada.⁵⁹ El ozono destruye las bacterias por una oxidación progresiva de los componentes celulares. El mecanismo de acción indica la oxidación de la pared celular y la membrana citoplasmática, por lo tanto, la diferencia de sensibilidad al ozono de las bacterias debe estar relacionada con las diferentes estructuras y composición de la pared celular.^{5,15,44,59} Los estudios realizados en medio acuoso por Lezcano *et al.*^{60,61} en bacterias Gram positivas revelaron que *Staphylococcus aureus* presenta mayor resistencia al ozono respecto a *Candida albicans* y *Streptococcus faecali* y en el caso de las bacterias Gram negativas *Pseudomona aeruginosa* presenta mayor resistencia respecto a *Shigella sonnei*, *Salmonella thyphimurium* y *Escherichia coli*. Ambos estudios de Lezcano *et al.* revelan que la inactivación de las bacterias sigue una ley cinética de segundo orden dependiendo de las concentraciones de ozono disuelto y de los microorganismos.^{60,61}

Aunque queda claro que el ozono es efectivo en la inactivación de bacterias, tanto células vegetativas como esporas, estas últimas presentan resistencia bajo determinadas condiciones de ozonización.^{12,62} Una investigación llevada a cabo por Vijayanandraj *et al.*⁶³ relacionada con la inactivación de esporas del hongo *Aspergillus niger*, causante de la enfermedad *black rot* de las cebollas en medio acuoso, confirma que el ozono no tuvo efecto inhibitorio en las esporas bajo las condiciones estudiadas, siendo limitado el efecto solo al micelio vegetativo. Foegedin comprobó la dificultad de la inactivación con ozono de esporas de *Bacillus* y *Clostridium* y la resistencia que ejercía la cobertura de las esporas al actuar como una barrera.¹² Sin embargo, se reporta que poblaciones de esporas correspondientes a patógenos comunes en poscosecha tales como *Penicillium digitatum*, *Penicillium italicum*, *Penicillium expansum*, *Monilinia fructicola*, *Rhizopus stolonifer*, *Botrytis cinerea* y *Geotrichum citri-aurantii* no sobrevivieron al tratamiento de 3 min y 1,5 mg/L.⁵¹

Por otra parte, varios investigadores han reportado que la ubicación de los microorganismos en fisuras o heridas en el producto afecta la efectividad de los desinfectantes, ya que se limita el acceso a los microorganismos.^{64,65} Seo y Frank⁶⁵ reportaron que *Echerichia coli* O157:H7 internada en los estomas de hojas de lechugas limitaron el contacto con el desinfectante. Han *et al.*⁶⁶ inocularon *Echerichia coli* O157:H7 en la superficie de pimientos verdes y reportaron que después del tratamiento el crecimiento de este patógeno no fue significativo en las áreas no dañadas. Sin embargo, después de una incubación de 24 h a 37 °C apreciaron un crecimiento significativo en aquellos pimientos con superficies dañadas, debido a que el microorganismo pudo alojarse en estas zonas al no tener acceso al desinfectante.

En este sentido, la experiencia de la aplicación de 0,5 a 5 mg/L de ozono disuelto por Naito y Takahara⁵ indicó que el efecto antimicrobiano del ozono resultó mayor en la

superficie de los tejidos del producto que en sus tejidos internos. Estos autores destacan que la efectividad del tratamiento depende de la concentración inicial de microorganismos y de la ubicación de estos en el producto. También, Achen y Yousef⁶⁷ en un estudio con manzanas inoculadas con *Escherichia coli* O157:H7 lograron, en la superficie, la inactivación de 3,7 y 2,6 log de Unidades Formadoras de Colonias (99,99 y 99,9 %) empleando respectivamente el método del burbujeo directo y el de inmersión. Mientras que en la zona del tallo-cáliz el valor obtenido fue menor de 1 log (99 %) para ambos métodos de contacto. Este resultado se corresponde con los analizados en el estudio de Hampson y McLean³⁴ con tomates inmersos en agua ozonizada. Otro reporte reciente de Rodgers *et al.*⁶⁸ plantea la reducción de hasta 5 log (99,999 %) de mesófilos aerobios en manzanas, fresas y lechugas con 3 mg/L durante 5 min de lavado. Hay que tener en cuenta las cortaduras o daños mecánicos, que puedan ocurrir durante el proceso de cosecha, los cuales adicionan materia orgánica que disminuye la acción del desinfectante.

En general, no se reporta un control adecuado respecto a las esporas que estén ubicadas dentro de heridas o cortaduras de un producto. En este sentido, Smilanick *et al.*⁵¹ realizó una evaluación del efecto del agua ozonizada en la extensión de la vida de anaquel de frutas cítricas, peras y uvas mediante la aplicación de 1,5 hasta 10 mg/L a temperaturas de 18 a 22 °C y pH de 7,5 a 7,9. Las frutas fueron inmersas en un tanque con recirculación del agua ozonizada, después secadas y almacenadas entre de 10 a 20 °C. Los resultados no revelaron un efecto significativo en la reducción de esporas inoculadas, antes del tratamiento, en cortaduras realizadas a los frutos. Sin embargo, sí hubo un control de la desinfección en la superficie de los frutos. La población de esporas de *Botrytis cinerea* causante del *gray mold* en los racimos de uvas fue reducida. Se destaca que es prometedor el empleo del ozono en el control del *brown rot* causado por la *Monilia fructicola* presente en la superficie de las peras, dado los resultados favorables en cinco variedades de peras tratadas con 1,5 mg/L durante 1 min. También, se indica en este estudio que un tratamiento severo de 15 min y 5 mg/L logró una mayor inactivación, pero causó daños superficiales en las peras. Por otra parte, en las frutas cítricas no fue reducido el número de esporas de hongos *Penicillium digitatum* y *Geotrichum citri-aurantii* (*green mold* y *sour rot*), las cuales fueron previamente colocadas en cortaduras, aunque fue aplicada una concentración de ozono disuelto de 10 mg/L durante 20 min.

Palou *et al.*⁶⁹ realizaron una evaluación de la desinfección de naranjas y limones inoculados con *Penicillium italicum* y *Penicillium digitatum* con ozono gaseoso, bajo 0,6 mg/m³ y 5 °C, durante varias semanas. Los resultados mostraron que la infección por estos hongos fue retardada y la esporulación reducida, siendo más resistente el *Penicillium digitatum*. Respecto a *Botrytis cinerea*, estos autores obtuvieron en melocotones bajo una atmósfera de ozono una inhibición del crecimiento micelial y de la esporulación, mientras que en uvas no se logró un control de este patógeno. Por otra parte, el tratamiento con 0,7 y 3 mg/m³ a temperaturas de 2 °C de fresas inoculadas con este hongo aunque retardó el crecimiento fúngico no logró controlar las pérdidas cuando las frutas fueron almacenadas a temperatura ambiente.

El análisis de este acápite conduce a considerar que la acción desinfectante del ozono es fundamentalmente sobre la superficie de los productos, dado por su bajo poder de penetración. Esto limita su acción germicida

cuando el producto tiene algún daño o herida. Sin embargo, en la práctica comercial, si el producto presenta una infección profunda, es descartado para el consumo y por lo tanto que predomine su acción superficial no representa una desventaja. Bajo condiciones adecuadas, la aplicación del ozono permite un control del crecimiento de los microorganismos en la superficie del producto sin afectar su composición química y sus propiedades organolépticas. Es importante tener en cuenta el tipo, la concentración inicial y el estado fisiológico de crecimiento del microorganismo, así como su sensibilidad al ozono.

Limitaciones de la aplicación del ozono

Aunque la acción predominante del ozono es superficial, considerando la información consultada, algunos autores reportan efectos no favorables relacionados con la afectación de determinados compuestos presentes en el interior del fruto. Qiang *et al.*⁷⁰ hacen una alerta tanto en el tratamiento en fase acuosa como gaseosa en la disminución del contenido de tioles, que desempeñan un papel como antioxidantes en la dieta humana. Estos autores encontraron en un estudio de varias hortalizas que su contenido (nmol/g) varía según el producto y que la afectación del contenido de tioles bajo el tratamiento con ozono fue menor respecto a otros agentes desinfectantes, como el cloro y el peróxido de hidrógeno y destacaron que la magnitud del efecto depende de la concentración de ozono, del tiempo de exposición, la superficie y el tipo de producto, por ejemplo, si es un vegetal que tiene sus hojas expuestas o un fruto, donde su cáscara actúa como una barrera.

Wei *et al.*⁴¹, en el tratamiento con agua ozonizada, también destacan la importancia del control del ozono disuelto y el tiempo de exposición de acuerdo con el producto. Recientemente, los efectos no favorables del agua ozonizada sobre la concentración de antioxidantes y fitohormonas corroboraron que es necesario evaluar previamente las de ozono disuelto.⁷¹ Sin embargo, otros reportes del efecto sobre los antioxidantes, como la vitamina C, indican poca afectación del contenido.^{34,49,50,55}

Al igual que otros tratamientos, la ozonización tiene su alcance y limitaciones. En este sentido, se propone que a cada producto se le realice un estudio y evaluación previa, ya que el efecto del ozono en la fisiología y calidad de los productos varía de acuerdo con la composición química que presenten, el tipo de producto, la dosis aplicada, la concentración de ozono y el tiempo de exposición. Una aplicación no adecuada, por ejemplo, un exceso de ozono, puede ocasionar daños en los tejidos del producto con algún deterioro o pérdida de calidad.

Perspectivas en Cuba

En el Departamento de Tecnologías de Tratamiento con Ozono en el que se desempeñan los autores, se desarrollan investigaciones dirigidas a la aplicación del ozono en la industria agro-alimentaria con perspectivas importantes. Un resultado a destacar es la aplicación de la ozonización en tomates de casas de cultivo y cosechados verde-pintones. Bajo concentraciones de ozono gaseoso de 25 a 45 mg/m³ durante varios días, fue lograda una disminución de las pérdidas por pudrición y por daños fisiológicos en los tomates ozonizados y no se observó ningún efecto en la acidez valorable, el pH ni en el contenido de sólidos solubles. En los grupos tratados a concentraciones más bajas, la pérdida de peso y de firmeza fueron menores respecto al control. La desinfección con agua ozonizada de tomates maduros, inoculados con *Escherichia coli* ATCC 25922, fue efectiva

bajo concentraciones de ozono disuelto entre 0,5 y 1 mg/L y tiempos de contacto de hasta 30 min.^{72,73}

Actualmente, se están desarrollando investigaciones en colaboración con el Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas en la conservación de semillas de papa de importación. Los resultados preliminares de la aplicación de ozono gaseoso, mostraron que la brotación no fue afectada.⁷⁴ Respecto al estudio del tratamiento de fruta bombas para el control de hongos patógenos en colaboración con el Instituto Nacional de Investigaciones en Viandas Tropicales los resultados son muy alentadores y ya se encuentra también bajo estudio el plátano.

Como estrategia fundamental, el Centro de Investigaciones del Ozono se ha planteado el manejo poscosecha de los productos para que no pierdan su calidad comercial y mantengan su valor nutricional. No obstante, dentro de la cadena productiva de un producto dado se tiene el propósito de incursionar en etapas agrícolas, biotecnológicas y en la industria. La experiencia de los especialistas de este Centro en diferentes aplicaciones del ozono junto al trabajo integral y multidisciplinario permitirá introducir adecuadamente los resultados de los proyectos, incrementar la capacitación científico-tecnológica, así como establecer líneas de financiamiento y mercado. También, se incluye como herramienta el análisis patentométrico para la toma de decisiones.⁷⁵

Consideraciones finales

Como estrategia general en el tratamiento y conservación de frutas y hortalizas está establecido combinar los métodos físicos con los químicos. Respecto a la aplicación del ozono, se especifica la ozonización de ambientes y el lavado con agua ozonizada. Teniendo en cuenta los aspectos evaluados en este trabajo, como estrategia de aplicación del ozono se propone realizar un análisis integral del sistema de gestión y manejo de cada producto dado. El punto o puntos críticos, dentro de la cadena productiva, deben ser identificados para que la ozonización tenga mayor impacto y factibilidad.

En opinión de los autores, la aplicación del ozono tiene perspectivas importantes en la poscosecha de frutas y hortalizas, tanto cuando van a ser consumidas frescas, almacenadas por razones de control del mercado o procesadas en la industria. Es conocido que la problemática en el comercio de frutas y hortalizas está dirigida hacia las barreras fitosanitarias. Para aprovechar los beneficios y el alcance potencial del tratamiento con ozono es necesario realizar estudios previos, que permitan proponer y validar las condiciones de ozonización adecuadas para cada producto o para cada grupo de productos con características similares.

La aplicación del ozono bajo concentraciones relativamente bajas y tiempos de contacto cortos, permite la inactivación de microorganismos, garantiza la calidad del producto agrícola e incrementa su resistencia al deterioro. El efecto germicida del ozono es incrementado cuando aumenta la humedad relativa, el tiempo de contacto y la concentración de ozono. Además, su acción es fundamentalmente superficial y su efectividad depende de la temperatura y el pH del medio, del tipo de producto, grado de contaminación y sensibilidad del microorganismo. Es importante el diseño adecuado de los equipos o locales para el tratamiento, en fase gaseosa o acuosa, así como conocer la demanda de ozono del medio para distinguir entre la dosis de ozono aplicada y el ozono residual necesario.

Queda claro, que la ciencia y la tecnología de la aplicación del ozono en la industria agro-alimentaria

está en desarrollo. Las contribuciones de publicaciones y estudios en general permiten apreciar el reto y asegurar el alcance, así como el dominio que se va alcanzando a nivel mundial. Muchos productores han obtenido la verificación de sus tecnologías, que bajo protocolos adecuados podrán ser evaluados por la (U.S. EPA) la cual ha desarrollado un programa de Verificación de Tecnologías del Medioambiente.²³

Considerando los resultados y valoraciones expuestos aquí es posible plantear que el empleo del ozono merece un espacio dentro de la estrategia del desarrollo sostenible, tanto en países desarrollados como en vías de desarrollo, dada la necesidad de incrementar la producción y la búsqueda de alternativas viables para el tratamiento y conservación de frutas y hortalizas.

CONCLUSIONES

La aplicación adecuada del ozono es una alternativa de tratamiento sustentable en la poscosecha de frutas y hortalizas. Sin embargo, se recomienda realizar un estudio previo de las condiciones de tratamiento para cada producto, así como realizar un análisis integral del sistema de gestión del producto para lograr un mayor impacto y factibilidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Parra A, Hernández JE. Fisiología y poscosecha de frutas y hortalizas. 1ra ed. Universidad Nacional de Colombia: 2007: p.67-80.
2. Artés F. Nuevas tendencias en la poscosección del tomate fresco. Alimentación, Equipos y Tecnología. 1999;5:143-51.
3. Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO. Conference 33rd Session. The State of Food and Agriculture, Roma, Italia, 2005.
4. Suslow TV. Basics of ozone applications for postharvest treatment of fruits and vegetables. Perishables Handling Quarterly.1998;94:9-11.
5. Naitoh S, Takahara H, Mi-La Cho, Chong-Hyeon Yoon, Sue-Yun Hwang, Mi-Kyung Park, So-Youn Min, Sang-Heon Lee, Ho-Youn Kim. Ozone contribution in food industry in Japan. Ozone Sci Eng. 2006;28:425-29.
6. Saltveit M. Effect of ethylene on quality of fresh fruits and vegetables. Postharvest Bio Tech. 1999;15:279-92.
7. Cañet FM, Gordillo M, Vega M, Pérez L. Manual de manejo poscosecha de frutas y vegetales para mercados selectos y la exportación. INIFAT, La Habana, Cuba, 2004.
8. Lorente GY. Estado actual de las investigaciones, la producción y el consumo de alimentos hortalizas listos para consumir. [Tesis Diploma]. Ciudad de La Habana. Universidad de La Habana; julio; 2006.
9. Rice RG. User successes with ozone for agricultural products and food treatment. Proceeding of 17th World Ozone Congress. August 22-25, 2005. Strasbourg, France.
10. Naito S. and Takahara H. Recent developments in food and agricultural uses of ozone as antimicrobial agent. Proceeding of the 18th Ozone World Congress. August 27-29, 2007. Los Angeles, USA.
11. Food and Drugs Administration of US. Secondary direct food additives permitted in food for human consumption. Federal Register. 2008;39:17-26
12. Kim JG, Yousef AE, Dave S. Application of ozone for enhancing the microbiological safety and quality of foods. J Food Protec. 1999;62:1071-87.
13. Graham DM. Ozone antimicrobial applications in food processing. Ozone III Conference, 2002. Fresno CA, USA.
14. Suslow TV. Ozone application for postharvest disinfection of edible horticultural crops. ANS Publication. 2004;8133:1-8.
15. Naito S. Ozone Inactivation of Food spoilage acid-producing bacteria. Proceeding of the 19th Ozone World Congress & Exhibition IOA. August 31-September 3, 2009. Tokyo, Japan.
16. Rice RG. Ozone in the United States of America-State of the Art. Ozone Sci Eng. 1999;21:99-103.
17. Rice RG. IOA-PAG. User success report-commercial applications of ozone in Agri-Food, Ozone News. 2007;35:7-21.

18. Larocque R. Ozone applications in Canada. *Ozone Sci Eng.* 1999;21:119-26.
19. Le Pauloue J. and Langlais B. State of the art of ozonation in France. *Ozone Sci. Eng.* 1999;21:153-62.
20. Overbeck PK. Regulatory environment impact on small systems. Proceeding of the 14th Ozone World Congress. August 23-26, 1999. Michigan, USA.
21. Loeb BL. Ozone safe. *Ozone News.* 2009;37:16-20.
22. Haruo I and Velioglu S. Recent Topics Related to Ozone Generation in Japan. Proceeding of the 19th Ozone World Congress & Exhibition IOA. August 31-September 3, 2009. Tokyo, Japan.
23. Loeb BL. Ozone IV Highlights recent developments in the use of ozone for food and agricultural processing, *Ozone News.* 2005;33:18-22.
24. World Health Organization. Food Safety Issues: Surface decontamination of fruits and vegetables eaten raw. Genova: WHO/FSF/FOS, 1998.
25. De Marini DM, Abu-Shakra A, Felton CF Mutation spectra in *Salmonella* of chlorinated, chloraminated or ozonated drinking water extracts: Comparison to MX. *Environ Molec Mutag.* 1995;26:270-78.
26. World Health Organization. I. Monographs on the evaluation of carcinogenic risk to human. Organization WWH. Genova, 2004.
27. Rice RG, Graham D, Charles D. Ozone as antimicrobial agent for the treatment, storage and processing of food in the gas and aqueous phases supporting of data for a food additive petition. Proceeding of the 15th World Ozone Congress. August 29-31, 2001. London, England.
28. McKenzie KS, Sarr AB, Mayura K, Bailey RH, Millar DR, Rogers TD. Oxidative degradation and detoxification of mycotoxins using a novel source of ozone. *Food Chem Toxic.* 1997;35:807-20.
29. Zotti M, Porro R, Vizzini A, Manoti MG. Inactivation of *Aspergillus* ssp. by ozone treatment. *Ozone Sci. Eng.* 2008;30:423-30.
30. Karaca H and Velioglu Y. Ozone applications in fruit and vegetable processing. *Food Reviews International.* 2007;23:91-106.
31. Cataldo F. Ozone decomposition of patulin - A micotoxin and food contamination. *Ozone Sci Eng.* 2008;3:197-201.
32. Sopher CD. The use of gaseous ozone in the US Agri-food industry. Proceeding of the 18th Ozone World Congress. August 27-29, 2007. Los Angeles, USA.
33. Yuan J, Novak J, Steiner E. Bactericidal efficacy of washing fruits and vegetables using ozone. IOA/PAG Conference Vancouver. October 20-22, 1998. Vancouver, Canada.
34. Hampson B and McLean MR. Impact of ozonation on the nutritional quality and microbial load of fresh-market tomatoes. IOA/PAG Vancouver Conference. October 20-22, 1998. Vancouver, Canada.
35. Hampson B. Use of ozone for winery and environmental sanitation. *Practical Winery and Vineyard.* 2000;2:27-30.
36. Beltrán F. Ozone reaction kinetics for water and wastewater systems. 1ra ed. Washington DC: Lewis Publishers: 2004: p.232-41.
37. Hunt NK and Mariñas BJ. Kinetics of *Escherichia coli* inactivation with ozone. *Water Res.* 1997;31:1335-42.
38. von Gunten U. Ozonation of drinking water: Part II. Disinfection and by-product formation in presence of bromide, iodide or chlorine. *Water Res.* 2003;37:1469-84.
39. Facile N, Barbeau B, Prevost M, Koudjonou B. Evaluating bacterial aerobic spores as a surrogate for *Giardia* and *Cryptosporidium* inactivation by ozone. *Water Res.* 2000;34:3238-46.
40. Cho M, Cheng H, Yoon J. Effect of pH and importance of ozone initiated radical reactions in inactivating *Bacillus subtilis* spore. *Ozone Sci Eng.* 2002;24:145-50.
41. Wei K, Zhou H, Zhou T, Gong J. Comparison of aqueous ozone and chlorine as sanitizers in the food processing Industry: Impact of fresh agricultural produce quality. *Ozone Sci Eng.* 2007;29:113-20.
42. Beuchat LR and Ryu JH. Produce handling and processing practices. *Emerging Infec. Dis.* 1997;3:459-65.
43. Omez H and Akbas Y. Optimization of treatment of fresh-cut green leaf lettuce. *J Food Eng.* 2009;90:487-94.
44. Finch GR, Haas C, Oppenheimer JG, Trussell R. Design criteria for inactivation of *Cryptosporidium* by ozone in drinking water. *Ozone Sci Eng.* 2001;23:259-84.
45. Klaiber RG, Baur S, Magel L, Hammes W, Carle R. Quality of shredded, packaged carrots as affected by different washing treatments. *J Food Sci.* 2004;69:161-6.
46. Baur S, Klaiber R, Hammes WP, Carle R. Sensory and microbiological quality of shredded, packaged iceberg lettuce as affected by pre-washing produces with chlorinated and ozonated water. *Innovative Food Sci Eng Tech.* 2004;5:45-55.
47. González GA, Ayala F, Ruiz S, Cruz R, Cuanca F. Estado actual del mercado de frutos y vegetales frescos cortados. Simposio Estado Actual del Mercado de Frutos y Vegetales Cortados en Iberoamérica. 2004. San José, Costa Rica.
48. Zhuang H, Lewis L, Michelangleli DF. Ozone water treatments for preserving quality of packed, fresh-cut broccoli under refrigeration. *Sci. et Tec. du froid.* 1994;6:267-276.
49. Zhang LL, Yu Z, Gao X. Preservation fresh-cut celery by treatment of ozonated water. *Food Control.* 2005;16:279-83.
50. Beltrán D, Selma MV, Marin A, Gil MI. Ozonated water extends the shelf life of fresh-cut lettuce. *J Agric Food Chem.* 2005;53:5654-63.
51. Smilanick JL, Margosan DM, Mlikota-Glaber F. Impact of ozonated water on the quality and shelf-life of fresh citrus, stone fruit and table grapes. *Ozone Sci Eng.* 2002;24:343-56.
52. Dickson RG, Law SE, Kay SJ, Eiteman MA. Abatement of ethylene by ozone treatment in controlled atmosphere storage of fruits and vegetables. International Winter Meeting American Society Agriculture Engineering. December 15-18, 1992. Tennessee, USA.
53. Kader AA. Postharvest technology of horticultural crops. ANS Publication. 2002;3311:535-42.
54. Barth MM, Zhou C, Mercie R, Payne FA. Ozone storage effects on anthocyanin content and fungal growth in blackberries. *J Food Sci.* 1995;60:1286-88.
55. Pérez AG, Sanz C, Ríos JJ, Olías R, Olías JM. Effects of ozone treatment on postharvest strawberry quality. *J Agric and Food Chem.* 1999;47:1652-56.
56. Liew CL, Prane R. Effect of ozone and storage temperature on postharvest diseases and physiology of carrots (*Caucus carota L.*). *J American Soc Hortic Sci.* 1994;119:563-567.
57. Amigo P. Efectos del ozono sobre el tomate en postcosecha. 2007. [Consultado: 20 de abril de 2007]. Disponible en: <http://www.cuencarural.com>.
58. Pérez-Rey R, Chavez H, Baluja C. Ozone inactivation of biologically-risky wastewaters *Ozone Sci Eng.* 1995;17:409-12.
59. Guzel-Seydim ZB, Greene AK, Seydim AC. Use of ozone in the food industry. *Swiss Soc. Food Sci and Tech.* 2003;37:453-60.
60. Lezcano I, Pérez-Rey R, Baluja C, Sánchez E. Ozone inactivation of *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli*, *Shigella sonnei* and *Salmonella thyphimurium* in water. *Ozone Sci Eng.* 1999;21:293-99.
61. Lezcano I, Pérez-Rey R, Baluja C, Sánchez E. Ozone inactivation of microorganisms in water: Gram positive bacteria and yeast. *Ozone Sci Eng.* 2001;23:183-87.
62. Kim JG and Yousef A.E. Inactivation Kinetics of foodborne spoilage and pathogenic bacteria by ozone. *J Food Sci.* 2000;65:521-28.
63. Vijayanandraj VR, Nagendra D, Mohan N. Effect of ozone on *Aspergillus niger* causing black rot disease in onion. *Ozone Sci Eng.* 2006;28:347-50.
64. Cherry JP. Improving the safety of fresh produce with antimicrobials. *Food Tech.* 1999;53:4-7.
65. Seo KH and Frank JF. Attachment of *Escherichia coli* O157:H7 to lettuce leaf surface and bacterial viability in response to chlorine treatment as demonstrated by using confocal scanning laser microscopy. *J Food Protec.* 1999;62:3-9.
66. Han Y, Sherman DM, Linton RH, Nielson SS, Nelson PE. The effects of washing and chlorine dioxide gas on survival and attachment of *Escherichia coli* O157:H7 to green pepper surfaces. *Food Microb.* 2000;17:521-33.
67. Achen M and Yousef AF. Efficacy of ozone against *E.coli* O157:H7 on apples. *J Food Sci.* 2001;66:1365-70.
68. Rodgers SL, Cash JN, Siddiq M, Ryser ET. A comparison of different chemical sanitizers for inactivating *Escherichia*

- coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes* in solution and on apples, lettuce, strawberries, and cantaloupe. *J Food Protec.* 2004;67:721-31.
69. Palou L, Smilanic J, Crisosto C, Mansour M. Effect of ozone gaseous exposure on the development of green and blue molds on cold storage citrus fruit. *Plant Disease.* 2001;86:632-38.
70. Qiang Z, Demirkol O, Ercal N, Adams C. Impact of food disinfection using ozone and other oxidants on the beneficial antioxidant thiol content in vegetables. *J Agric Food Chem.* 2005;53:9830-40.
71. Chan GYS. Effects of ozonated water on antioxidants and phytomorores level of vegetables. *Sustainable Agri-Food Industry Use of Ozone and Relative Oxidants.* October 29-31, 2007. Valencia, Spain.
72. Bataller M, Santa-Cruz S, Fernández I, García M, Veliz E, Ramos Y. Ozone application for postharvest disinfection of tomatoes. *Proceeding of the 19th Ozone World Congress & Exhibition, August 31-september 3, 2009.* Tokyo, Japan.
73. Santa-Cruz S, Fernández I, Bataller M, García M, Veliz E, Ramos Y. Empleo de agua ozonizada en el manejo poscosecha de tomates. II Convención Internacional: Alimentación Saludable para la Comunidad y el Turismo. 14 al 17 de septiembre de 2009. La Habana, Cuba.
74. Riverol Y, Bataller M, Veliz E, Salomón JL. Efecto del ozono en la evolución del peso y la brotación de semillas de papa en estadio de latencia. Variedad *Red Scarlet*. II Convención Internacional: Alimentación Saludable para la Comunidad y el Turismo. 14 al 17 de septiembre, 2009. La Habana, Cuba.
75. Ramos G, Formoso A., García B. Conservación de frutas y vegetales con ozono. Modelo de estudios de inteligencia-CI G/07/10/09. Dpto. de Gestión de la Propiedad Intelectual, CNIC, 2009.