

# Impacto económico y calidad microbiológica de aguas tratadas con ozono

**Mayra Bataller Venta, Lidia Asela Fernández García, Eliet Véliz Lorenzo y Caridad Álvarez Álvarez.**

Centro de Investigaciones del Ozono, Apartado Postal 6414, Ciudad de La Habana, Cuba. Correo electrónico: [mayra.bataller@cnic.edu.cu](mailto:mayra.bataller@cnic.edu.cu)

Recibido: 6 de noviembre de 2006. Aceptado: 16 de enero de 2007.

Palabras clave: ozono, desinfección, agua embotellada, animales de laboratorio.  
Key words: ozone, disinfection, bottled water, laboratory animals.

**RESUMEN.** Los objetivos del trabajo consistieron en evaluar el impacto económico y la calidad microbiológica de aguas tratadas con ozono, tecnología que ha sido instalada en embotelladoras de agua, en instalaciones para la cría de animales libres de gérmenes patógenos en el Centro Nacional de Producción de Animales de Laboratorio, el cual dispone de varios sistemas de tratamiento de agua con ozono, así como en las salas blancas del Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología, donde se mantienen esos animales para la evaluación de diferentes medicamentos. Se aplica un procedimiento que permite estimar la dosis de ozono a aplicar y la concentración de ozono disuelto a la salida de la columna de contacto. Se comprobó que el empleo de una sola etapa de contacto resulta válido en la práctica. La aplicación del ozono en el tratamiento de agua, tanto en las embotelladoras, como en las unidades de producción de animales de laboratorio, tiene una elevada factibilidad técnico económica respecto a otros tratamientos y garantiza eficazmente la desinfección del agua. Los resultados indican que no se ha encontrado una vía de tratamiento adecuado para la eliminación de la contaminación microbiológica por *Pseudomonas aeruginosa* en las embotelladoras, solo la aplicación del ozono al agua antes de envasar junto a la desinfección de la línea de producción con agua que contiene una gran concentración de ozono disuelta resulta satisfactoria. El método tradicional (térmico) que se emplea para el tratamiento del agua de beber de los animales de laboratorio resulta engorroso y muy costoso, mientras el costo de producción anual del tratamiento con ozono es alrededor de siete veces más barato.

**ABSTRACT** The objectives of the paper consisted of the evaluation of the economic impact and the water microbiological quality, by applying ozone disinfection. This technology has been installed in water bottled industry, as well as in facilities for the breeding of pathogenic germ-free animals located in the National Center of Laboratory Animal Production and in the Genetic and Biotechnology Engineering Center facilities, where the laboratory animals remain during different drugs evaluation. A procedure to estimate the applied ozone dose and the dissolved ozone concentration at the contact column exit was used. The use of a single contact stage in the practice was valid. The ozone applied in the water treatment as in the bottling of water, as in production units of laboratory animals has a high economic and technical feasibility as compared to other treatments. Ozone guarantees efficient water disinfection. An appropriate treatment for the elimination of microbiological contamination for *Pseudomonas aeruginosa* in water bottled industry was not found. However, the water ozonization during the bottling process and sanitizing the plant lines, with a high dissolved ozone concentration, provides an adequate disinfection. The conventional thermic water treatment used for the consumption of laboratory animals is difficult and very expensive, being the annual production cost of the ozone treatment around seven times cheaper.

## INTRODUCCIÓN

Dos aspectos han influido en el incremento de la aplicación del ozono como alternativa para la desinfección de aguas respecto a la cloración. Uno corresponde a la formación de compuestos organoclorados debido a la reacción del cloro con la materia orgánica presente en el agua y el otro es el insuficiente poder de desinfección que presenta este compuesto.<sup>1</sup> Es importante señalar, que el tratamiento con cloro no garantiza la eliminación de determinados tipos de microorganismos patógenos tales como los virus, *Legionella*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Entamoeba histolytica*, quistes de *Giardia* y *Cryptosporidium parvum*, *Mycobacterium*, etc.<sup>2</sup> En un estudio realizado por Liyanage<sup>3</sup> sobre inactivación de *Giardia* y *Cryptosporidium* se resalta la aplicación del ozono como la alternativa de desinfección más eficiente. Por otra parte, la ozonización resultó la solución para el control de los brotes de *Cryptosporidium* ocurridos en los últimos años en Estados Unidos y Canadá.<sup>4,5</sup>

La seguridad de la ejecución de la etapa de desinfección de aguas destinadas a diferentes usos resulta muy importante para lograr la calidad microbiológica requerida.

La eficiencia del proceso de desinfección con ozono depende en gran medida del diseño del reactor, por lo que es necesario tener en cuenta la hidrodinámica, las condiciones de operación y los indicadores de calidad del agua.<sup>6</sup> En la desinfección

con ozono el criterio de diseño "virucida", junto al concepto de "ozonización verdadera" obtenida de los resultados de Block<sup>7</sup> se convirtió en la base del diseño de la práctica internacional de tratamiento de agua, que indica el empleo de dos cámaras de contacto (como mínimo) en el que en la primera se introduce el 60 % del ozono total, mientras que en la segunda el 40 % restante y se debe mantener una concentración residual de 0,4 mg/L durante 4 min.<sup>8</sup>

En cuanto a la importancia relativa entre el tiempo de contacto y la concentración de ozono residual existen contradicciones. Sin embargo, hay un consenso y se conocen diferentes resultados sobre la inactivación de micobacterias,<sup>9</sup> de diferentes especies de *Pseudomonas*,<sup>10</sup> de quistes de *Giardia*,<sup>11</sup> y de varias especies de bacterias,<sup>12</sup> que indican que la clave de la eficiencia de la desinfección con ozono está en el aumento de la concentración residual, con lo que se logra una inactivación más rápida. Esto no quiere decir que el proceso de desinfección sea independiente del tiempo de contacto, sino que en este proceso es más conveniente mantener una concentración de ozono residual elevada (mayor de 0,4 mg/L).<sup>8</sup>

El ozono tiene potencialidades como alternativa eficiente para el tratamiento de aguas en los casos que se requiera de una gran calidad microbiológica, así como para mantener otros requerimientos específicos de calidad. Teniendo en cuenta estas premisas, la ozonización se ha aplicado en Cuba en objetivos económicos especiales como la industria farmacéutica, cría de animales de laboratorio, la industria embotelladora de aguas y el tratamiento de aguas residuales de gran riesgo biológico, que procesan volúmenes de agua relativamente pequeños. La introducción de la tecnología de tratamiento de desinfección de aguas con ozono en cada instalación requiere de un estudio previo del problema, de una etapa de selección de los equipos, del montaje, ajuste de las condiciones de operación durante la puesta en marcha y la evaluación correspondiente.

Actualmente, más de diez embotelladoras en Cuba garantizan su producción con el beneficio de la aplicación del ozono. Además, se ozoniza el agua de beber de animales libres de gérmenes patógenos en el Centro de Producción de Animales de Laboratorio (CENPALAB) y en el Centro de Ingeniería Genética y

Biotecnología (CIGB). El objetivo del trabajo consistió en evaluar los resultados del empleo de la tecnología de desinfección de aguas con ozono en estos objetivos económico sociales, teniendo en cuenta el impacto económico y la calidad microbiológica del agua tratada.

## MATERIALES Y METODOS

### Aspectos generales de la tecnología de desinfección de agua con ozono

La fuente de abasto de agua en las embotelladoras procede de aguas subterráneas (manantiales o pozos), en las instalaciones para agua de bebida de animales de laboratorio procede del acueducto y antes de la ozonización el agua se filtra por carbón activado para eliminar el cloro libre residual (Fig. 1). La ozonización del agua se realiza en una columna de burbujeo de acero inoxidable o PVC provista en su parte inferior de un difusor de vidrio poroso. El contacto gas-líquido en la columna se realiza continuamente y a contracorriente.

El agua que sale de la columna con una determinada concentración de ozono disuelto pasa a un tanque de balance, de donde es bombeada para su consumo. El tiempo de residencia del agua en este tanque varía de acuerdo con su empleo. El agua embotellada requiere el menor tiempo posible que garantice, en el momento de sellar la botella, una concentración de ozono disuelto entre 0,2 a 0,3 mg/L, condiciones establecidas por la International Bottled Water Association.<sup>13</sup> Mientras que, el agua destinada a la cría de animales de laboratorio requiere de un tiempo en el tanque que garantice

reducir la concentración de ozono disuelto por debajo de 0,05 mg/L antes de su empleo. Esto garantiza que el animal no beba agua con ozono disuelto y es una solicitud de los especialistas en este tipo de animales. En todas las instalaciones se requiere de un adecuado control de la concentración de ozono disuelto en el agua en los puntos siguientes: a la salida de la columna, antes de ser suministrada a los animales y en las embotelladoras cuando se sella la botella. Con la frecuencia establecida en cada caso se realiza la desinfección de las tuberías y tanques con un agua que contiene una gran concentración de ozono disuelto.

El ozono empleado se produce a partir de aire u oxígeno en equipos de fabricación cubana con una producción máxima de 20 g/h, modelos OZOCENIC y AQOZO de CIOZONO. Cuando el ozono se obtiene a partir de aire se emplea un secador. El ozono residual en el gas a la salida de la columna se descompone catalíticamente con el empleo de un destructor de ozono colocado en la parte superior de la columna.

### Criterios de diseño general para la tecnología de desinfección de aguas

Como criterios de diseño se tienen los siguientes: el empleo de una sola etapa de contacto o sea una columna de burbujeo,<sup>14</sup> el volumen útil de la columna representa el 90 % del total (considerando la expansión volumétrica del líquido debido a la introducción del gas), la relación altura/diámetro de la columna debe ser la mayor posible, pero es importante mantener un valor por debajo de 15,<sup>15</sup> para evitar el fenómeno de

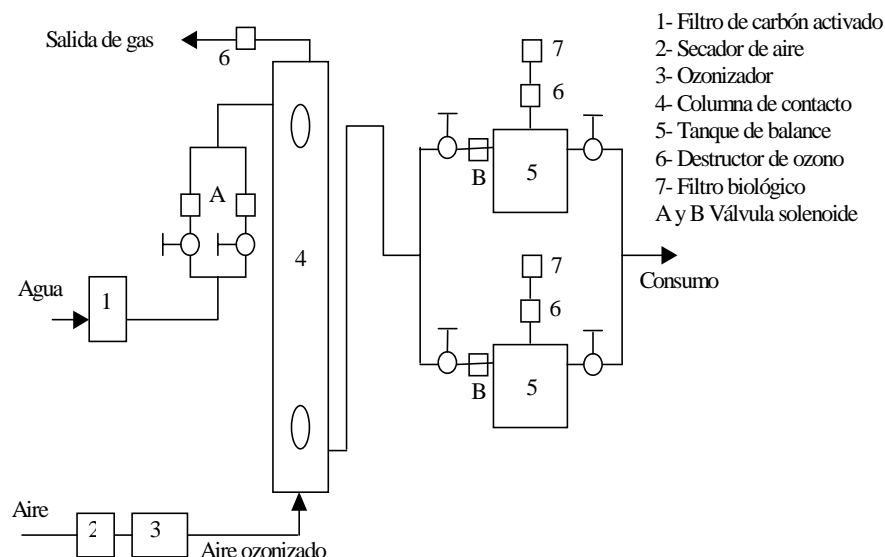


Fig. 1. Esquema general de la tecnología de tratamiento de agua con ozono.

coalescencia de las burbujas, que afectaría la eficiencia del contacto debido a la disminución de la transferencia de masa del ozono del gas al líquido. El volumen de la columna y su relación altura-diámetro difieren para cada instalación, el valor de esta relación oscila entre 10 y 15. El tiempo de contacto entre el agua y el ozono se ajusta de 2 a 4 min para las embotelladoras, y entre 4 y 10 min para el agua destinada a la cría de animales de laboratorio.

### Parámetros necesarios para el diseño tecnológico y la adecuación de la tecnología a una instalación

Para el adecuado diseño de la tecnología se necesita conocer del volumen de agua a consumir en la instalación, la calidad del agua a tratar y de la requerida para su uso. Con esta información se define el volumen de la columna y las condiciones de operación en cada instalación. Por otra parte, es necesario estimar la concentración de ozono disuelto en el agua a la salida de la columna y la dosis de ozono a aplicar. La estimación de estos dos parámetros se describen a continuación:

#### Estimación de la concentración de ozono a la salida de la columna

Si se considera que el pH permanece constante durante el proceso y que la reacción del ozono con las sustancias es lo suficientemente lenta, la velocidad total de disminución de ozono disuelto puede expresarse como:

$$-(d C_{O_3L}/dt) = k C_{O_3L} \quad (1)$$

donde:

$$k = k_{OH^-} C_{OH^-} + k_A C_A + k_B C_B + \dots + k_N C_N$$

La expresión (1) describe una cinética de pseudoprimer orden y es la base del método desarrollado<sup>16</sup> para la determinación de la cinética global de consumo de ozono que se realiza en este trabajo. La concentración de ozono a la salida de la columna se puede determinar a partir de la integración de la expresión de pseudoprimer orden (1) que queda como:

$$\ln C_{O_3LS} = \ln C'_{O_3L} - k t s \quad (2)$$

donde:

$C_{O_3LS}$  concentración de ozono que debe tener el agua a la salida de la columna (mg/L).

$C'_{O_3L}$  concentración de ozono que debe tener el agua transcurridos 4 min desde su salida de la columna (0,4 mg/L).<sup>8</sup>

$t s$  tiempo de contacto después de la salida de la columna (4 min).<sup>8</sup>

$k$  constante cinética de consumo de ozono disuelto ( $s^{-1}$ ).

#### Estimación de la dosis de ozono a aplicar

Para la estimación de la dosis de ozono a aplicar, se realizan las operaciones siguientes:

- Determinación experimental de  $k$ .<sup>16</sup>
- Estimación de la  $C_{O_3LS}$  por la expresión (2).
- Determinación de la diferencia entre  $C_{O_3LS}$  y la que tiene el agua transcurridos los cuatro minutos, para así obtener el consumo de ozono durante el "paso de desinfección" que equivale a un 40 % del total del ozono consumido durante el proceso, esto permite conocer el consumo de ozono en el "paso de oxidación" que equivale al 60 % del consumo además de los 0,4 mg/L a alcanzar.

Considerando una eficiencia de contacto del 90 % se obtiene la dosis a aplicar al agua.

La dosis de ozono aplicada (DA) en la práctica en cada instalación se determina por la expresión siguiente:

$$DA = (Q_G \cdot C_{O_{3ge}})/Q_L \quad (3)$$

donde:

$Q_G$  caudal de gas (L/h).

$Q_L$  caudal de agua (L/h).

$C_{O_{3ge}}$  concentración de ozono en el gas a la entrada de la columna (mg/L).

En el análisis estadístico se empleó el paquete de programas Statgraphics -Plus V. 5.0.

#### Medición de la concentración de ozono en el gas y en el agua

La concentración de ozono en el gas durante la calibración del generador de ozono fue determinada a 256 nm en un espectrofotómetro modelo Ultrospec III Pharmacia, así como en un analizador Anseros durante la puesta en marcha y funcionamiento. Este equipo Anseros se instala en una derivación de la tubería por donde se introduce la corriente gaseosa a la columna y reporta constantemente en una pantalla la concentración de ozono en el gas. Por otra parte, la concentración de ozono disuelto en el agua se determina por el método del índigo<sup>17</sup> y directamente con el empleo de un equipo modelo Dulcometer que se instala en la tubería de salida del agua de la columna e indica la concentración en una pantalla.

#### Análisis microbiológico de las aguas

En las embotelladoras los análisis microbiológicos del agua se realizaron con la frecuencia y control de

microorganismos patógenos según las Normas Cubana para Agua de Bebida Envasada NC: 1984 y NC 2: 1996.<sup>18,19</sup> Para el agua envasada específicamente se analizan cinco muestras de cada lote. Para este estudio además, se tomaron muestras de agua en diferentes puntos de la línea de producción antes y después del tratamiento con ozono para la determinación de mesófilos totales, coliformes totales y *Pseudomonas aeruginosa*.

Por otra parte, en CENPALAB el control de la calidad microbiológica del agua de bebida de los animales es muy estricto.<sup>20</sup> Para este estudio, se estableció un esquema de muestreo de agua durante un mes en los puntos siguientes: salidas del tanque receptor, del filtro de carbón activado, de la columna, y del tanque de balance y fregadero. Se determinó el conteo total de mesófilos aeróbicos, *Pseudomonas aureginosa*, *E. coli*, *Staphylococcus aureus* y *Candida albicans*.

Los análisis microbiológicos de las muestras de agua en ambas tipos de instalaciones se realizaron de acuerdo con las técnicas usuales reportadas en los métodos normalizados.<sup>21</sup>

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Resultados de la aplicación del ozono en el tratamiento de agua embotellada

Se apreció que las aguas de las embotelladoras "El Fraile" y "Peña Azul" presentaron las mayores  $k$  y los menores tiempos de vida media y al ser comparados estadísticamente con los valores del resto de las embotelladoras se obtuvieron diferencias significativas (Tabla 1). El tiempo de vida media corresponde al tiempo en que el valor de la concentración de ozono disuelto inicial se reduce a la mitad. Este resultado indicó que estas aguas eran las de menor calidad, ya que presentaban un mayor consumo de ozono, por lo que requirieron una dosis de ozono aplicada de 2 g/m<sup>3</sup>. El resto de las plantas requirió una dosis de alrededor de 1 g/m<sup>3</sup>, que es la recomendada para garantizar la desinfección en este tipo de proceso.<sup>13</sup>

Se comprobó que el procedimiento para estimar la DA y la  $C_{O_3LS}$  es una herramienta útil, los cuales sirven de referencia. En todas las instalaciones se aplica una dosis de ozono mayor que la calculada como un criterio de seguridad, lo cual es un requerimiento del cliente. De esta forma, se garantiza la calidad de la

**Tabla 1.** Parámetros cinéticos, concentración de ozono disuelto y dosis aplicadas que requirieron las aguas de diferentes embotelladoras.

Instalación	$(k \pm DE) \cdot 10^4$ n = 10 (s <sup>-1</sup> )	C <sub>O<sub>3</sub>LS</sub> <sup>1</sup>	(C <sub>O<sub>3</sub>LS</sub> <sup>2</sup> ± DE) n = 5 (mg/L)	DA <sup>1</sup>	(DA <sup>2</sup> ± DE) n = 5	(t <sub>1/2</sub> ) (min)
La Cotorra	16,6 ± 0,7	0,60	0,65 ± 0,02	0,99	1,5 ± 0,1	6,9
El Caney	12,4 ± 1,4	0,54	0,60 ± 0,04	0,83	1,3 ± 0,2	9,3
El Copey	9,3 ± 1,4	0,50	0,50 ± 0,02	0,72	1,3 ± 0,5	12,3
Peña Azul	22,0 ± 3,0	0,68	0,75 ± 0,01	1,22	2,0 ± 0,1	5,2
La Palma	11,8 ± 0,9	0,53	0,60 ± 0,04	0,80	1,2 ± 0,3	9,7
El Fraile	37,7 ± 4,6	0,99	1,00 ± 0,01	2,17	2,0 ± 0,1	3,1
Vitapura	9,8 ± 0,4	0,51	0,65 ± 0,05	0,75	1,2 ± 0,6	11,8
Genética -P	6,3 ± 1,3	0,46	0,50 ± 0,02	0,61	1,5 ± 0,2	18,3
Industria Farm.	8,6 ± 0,3	0,49	0,60 ± 0,03	0,69	1,0 ± 0,5	13,4
Ciego Montero	10,4 ± 0,8	0,51	0,50 ± 0,03	0,75	0,8 ± 0,1	11,2
Los Portales	6,7 ± 0,7	0,47	0,70 ± 0,02	0,64	0,8 ± 0,1	17,2
Amaro	2,5 ± 0,4	0,42	0,50 ± 0,02	0,50	1,2 ± 0,3	46,2
Pinar del Río	5,5 ± 0,6	0,47	0,55 ± 0,01	0,64	1,2 ± 0,5	21,0

C<sub>O<sub>3</sub>LS</sub> Concentración de ozono disuelto en el agua a la salida de la columna. DA Dosis de ozono aplicada. <sup>1</sup> Parámetro estimado.

<sup>2</sup> Parámetro medido en la práctica. (t<sub>1/2</sub>) Tiempo de vida media.

producción con un riesgo mínimo, dado algún incremento eventual del deterioro del agua a tratar. Si la calidad del agua tratada no cumple con la norma en algún momento, se deben reajustar las condiciones de operación o se evalúa el funcionamiento del sistema. En el caso de “El Fraile”, la dosis aplicada que se ajustó resultó un poco menor que la calculada debido a limitaciones con la capacidad de generación del equipo, no obstante, la calidad del agua embotellada cumplió y cumple con los requisitos establecidos.

### Control de la calidad microbiológica del agua

Después de la puesta en marcha de la tecnología de tratamiento con ozono en las diferentes embotelladoras, no se ha reportado por los clientes la presencia de *Pseudomonas aeruginosa* u otra bacteria en el agua envasada. Además, el agua embotellada mantiene su calidad microbiológica por más de seis meses, tiempo establecido por el cliente (Tabla 2). Se seleccionó la embotelladora “El Copey” debido a su elevada capacidad de producción. Los resultados correspondientes a la

determinación de la calidad microbiológica del agua indicaron que el criterio de emplear una sola etapa de contacto es adecuado, así como también, la dosis ajustada aplicada y la concentración de ozono residual a la salida de la columna.

### Impacto económico de la aplicación del ozono en el tratamiento de agua embotellada

Al igual que en otras embotelladoras, la presencia de la bacteria patógena *Pseudomonas aeruginosa* en el agua envasada en “El Copey” obligó a detener la producción. La

**Tabla 2.** Análisis microbiológico del agua en la línea de producción y en el agua envasada en la embotelladora “El Copey” que se corresponden con dos días de muestreo cercanos a la puesta en marcha.

Muestra	Lugar de muestreo	C <sub>O<sub>3</sub>LS</sub> (mg/L)	Coliformes totales (NMP/100 mL)	Conteo total (UFC/mL)	<i>P. aeruginosa</i>
1	Filtro de arena	–	9	100	7
	Entrada de la columna	–	9	100	7
	Salida de la columna	+	0	0	0
	Máquina llenadora	+	0	0	0
	Agua embotellada	+	0	0	0
2	Filtro de arena	–	9	150	5
	Entrada de la columna	–	9	150	5
	Salida de la columna	+	0	0	0
	Máquina llenadora	+	0	0	0
	Agua embotellada	+	0	0	0

NMP Número más probable. UFC Unidades formadoras de colonias. (+) Presencia, (–) no presencia de concentración de ozono disuelto en el agua. El ensayo de cada muestra de agua se realizó por triplicado.

aplicación de medidas higiénico sanitarias extremas, como lavado sistemático de la máquina llenadora con disolución concentrada y caliente de hidrógenocarbonato de sodio, así como con disoluciones muy concentradas de hipoclorito, la aplicación de la irradiación al agua con lámparas de luz ultravioleta, las cuales se instalaron entre el filtro de bujía y la máquina llenadora, en la práctica, no eliminaron la presencia de *Pseudomonas aeruginosa*.

Solo resultó satisfactoria la aplicación del ozono al agua antes de envasar junto a una previa desinfección de la línea de producción con agua con ozono disuelto. Por lo tanto, en el análisis económico no se pudo comparar con ningún tratamiento alternativo que resultase efectivo. Sin embargo, un análisis del costo marginal por fallo resultó útil para tener un criterio económico en cuanto a cifras y analizar la factibilidad de la inversión del sistema de tratamiento con ozono. La afectación económica del productor, en este caso de "El Copey", por la no comercialización del producto durante un mes estuvo en el orden de los 25 500 \$ US.

#### Agua para consumo de animales libres de gérmenes patógenos

En las instalaciones del CIGB y CENPALAB la dosis aplicada de ozono es elevada si se compara con la de la práctica internacional para la

desinfección de aguas (de 1 mg/L) (Tabla 3). El objetivo en este caso es garantizar la esterilización del agua, así como mantener una concentración de ozono disuelto elevada durante el recorrido del agua desde la salida de la columna hasta el tanque ubicado dentro de las salas blancas. Se verificó el empleo de una dosis de ozono elevada que garantizara una concentración de ozono residual a la salida de la columna mayor o igual que 0,9 mg/L. Por lo tanto, aunque se partió de valores estimados, estos dos parámetros se ajustaron en la práctica teniendo en cuenta el control de la calidad microbiológica del agua tratada con ozono. Concentraciones menores no garantizaron los resultados adecuados.

#### Control de la calidad microbiológica del agua tratada con ozono

Los resultados del control de la calidad microbiológica del agua en las diferentes unidades del CENPALAB y en el CIGB, indicaron que el empleo del criterio de una sola etapa de contacto es adecuado, así como la selección de una concentración de ozono residual de 0,9 mg/L a la salida de la columna de contacto.

Los análisis microbiológicos realizados al agua en los diferentes puntos de muestro en una unidad de CENPALAB, durante un mes después de la puesta en marcha de los tratamientos con ozono, demostra-

ron la efectividad de este (Tabla 4). Se realizaron 21 muestreos en los puntos posteriores al tratamiento con ozono, en los cuales no se detectó la presencia de bacterias y levadura. Sin embargo, se detectó la presencia de mesófilos aerobios, *Pseudomonas aeruginosa*, *E. coli*, *Staphylococcus aureus* y de *Candida albicans* en puntos antes del tratamiento con ozono.

#### Impacto económico de la aplicación del ozono en el tratamiento de agua para animales de laboratorio

Se realizó un análisis económico preliminar para un año de trabajo. Se tuvieron en cuenta solo los indicadores específicos de cada tecnología para un consumo de agua de 2 m<sup>3</sup>/d. Se apreció que la tecnología que emplea el tratamiento con ozono implica un costo de producción de 2 018 \$US/año, mientras que el del tratamiento térmico es de 14 236 \$US/año lo que demuestra la ventaja económica del tratamiento propuesto, al resultar el costo de producción anual alrededor de siete veces más barato. Por último, el período de recuperación de la inversión a partir del inicio de su ejecución es de 1,43 años, dado fundamentalmente por un aprovechamiento del 95 % de las capacidades en el primer año de explotación y por un costo de inversión ejecutado en el primer mes de 15 000 \$US.

**Tabla 3.** Parámetros cinéticos, concentración de ozono disuelto a la salida de la columna y dosis aplicada al agua de beber para animales libres de gérmenes patógenos en las instalaciones del CIGB y CENPALAB.

Instalación	$(k \pm DE) \cdot 10^4$ n = 10 (s <sup>-1</sup> )	$C_{O_3LS}^1$	$(C_{O_3LS}^2 \pm DE)$ n = 5 (mg/L)	DA <sup>1</sup>	$(DA^2 \pm DE)$ n = 5 (mg/L)	$t_{1/2}$ (min)
CIGB	13,3 ± 1,5	0,55	0,90 ± 0,03	0,92	6,0 ± 0,4	8,7
CENPALAB	12,0 ± 0,8	0,53	0,90 ± 0,01	0,80	7,5 ± 0,3	9,4

$C_{O_3LS}$  Concentración de ozono disuelto en el agua a la salida de la columna. DA Dosis de ozono aplicada. <sup>1</sup>Parámetro estimado. <sup>2</sup>Parámetro medido en la práctica.  $t_{1/2}$  tiempo de vida media.

**Tabla 4.** Resultados de los análisis microbiológicos realizados al agua en diferentes puntos de muestreo en una unidad de CENPALAB.

Tratamiento con ozono	Microorganismo				
	Mesófilos aerobios	<i>P. aeruginosa</i>	<i>E. coli</i>	<i>S. aureus</i>	<i>Candida albicans</i>
Antes	+	+	-	+	+
Después	-	-	-	-	-

Antes: muestreos a la salida del tanque receptor y a la salida del filtro de carbón activado. Después: muestreos a la salida de la columna y a la salida del tanque de balance. (+) Presencia y (-) ausencia del microorganismo.

**Tabla 5.** Comparación económica del tratamiento con ozono y el térmico.

Agua tratada con ozono		Agua esterilizada por el método térmico	
<b>Inversión inicial</b>	<b>\$US</b>	<b>Inversión inicial</b>	<b>\$US</b>
Dos generadores de ozono	8 000	Dos autoclaves	20 000
Dos columnas de contacto	2 000		
Elementos de automatización	5 000		
<b>TOTAL</b>	<b>15 000</b>	<b>TOTAL</b>	<b>20 000</b>
<b>Costo anual</b>	<b>\$US</b>	<b>Costo anual</b>	<b>\$US</b>
Depreciación	1 500	Depreciación	2 000
Mantenimiento	300	Mantenimiento	400
Consumo eléctrico	218	Consumo eléctrico	11 636
<b>TOTAL</b>	<b>2 018</b>	<b>TOTAL</b>	<b>14 236</b>

## CONCLUSIONES

El tratamiento con ozono se logra la desinfección del agua y se alcanza una calidad microbiológica elevada como la requerida por las instalaciones de los objetivos económico sociales estudiados. El criterio de una sola etapa de contacto ha demostrado su validez en la práctica.

La aplicación del ozono en el tratamiento de agua, tanto en las embotelladoras como en las unidades de producción de animales de laboratorio, es factible desde el punto de vista técnico económico y tiene un impacto económico positivo al garantizar la producción de agua embotellada con la calidad requerida y disminuir los costos de producción en la instalación de tratamiento de agua para animales de laboratorio.

## BIBLIOGRAFÍA

1. International Water Supply Association, The practice of chlorination: application, efficacy, problems and alternatives, 1989.
2. WHO. World Health Organization. Guidelines for Drinking Water Quality, 2nd Ed., 1996.
3. Liyanage L.R.J., Finch G.R. and Belosevic M. Sequential disinfection of *Cryptosporidium parvum* by ozone and chlorine dioxide. **Ozone Science & Engineering**, 19, 409, 1997.
4. Larocque R. Ozone applications in Canada: A state of the art review, **Ozone Science & Engineering**, 21, 119, 1999.
5. Rice R.G. Ozone in the United States of America-state of the art, **Ozone Science & Engineering**, 21, 99, 1999.
6. Roustan M. Modelling hydraulics of ozone contactors. **Ozone Science & Engineering**, 18, 99, 1996.
7. Block, J. C. Contribution to the Study of Disinfection of Drinking Water by Ozone. Doctoral Thesis, Universidad de Nancy, 1977.
8. Richard Y. Principles of ozone oxidation and disinfection design. **Ozone Science & Engineering**, 7, 163, 1985.
9. Farooq S. and Chian E. S. Basic concepts in disinfection with ozone. **J. Water Pollution Control Federation**, 49, 1818, 1977.
10. Novoa M.C., Pérez Rey R., Baluja C. y Regüíferos M. Estudio de la inactivación con ozono de dos especies de *Pseudomonas* aisladas de aguas naturales y residuales. **Revista CENIC Ciencias Químicas**, 20, 81, 1989.
11. Labatiuk C.W., Belosevic M. y Finch G.R. Factors influencing the ineffectivity of *Giardia muris* cysts following ozone inactivation in laboratory and natural water. **Water Research**, 26, 6, 733, 1992.
12. Lezcano I., Pérez Rey, R., Baluja C. y Sánchez E. Ozone inactivation of *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli*, *Shigella sonnei* and *Salmonella typhimurium* in water. **Ozone Science & Engineering**, 21, 293, 1999.
13. International Bottled Water Association, 2002.
14. Ramos R., Pérez R., Gómez M., Menéndez S., Molerio J., Bataller M., Disinfection of mineral water by ozonization in Cuba. Proceeding 8th Ozone World Congress Suiza, Vol. 2, G22-G29, 1987.
15. Charpentier J.C. Advances in Chemical Engineering. Academic Press, New York, Vol. 12, 9-93, 1981.
16. Pérez R., Baluja C., Alvarez C. Determination of applied ozone doses in water treatment. **Revista CENIC Ciencias Químicas**, 20, 5-12, 1989.
17. Bader H. and Hoigné J. Determination of ozone in water by the indigo method. **Water Research**, 15, 419, 1981.
18. NC1:1984. Agua de bebida envasada. Especificaciones.
19. NC 2:1996. Agua de bebida envasada. Especificaciones.
20. FELASA Validation and environmental monitoring of aseptic processing. Committee of Purity Microbiology. **Journal of Parenteral Science & Technology**, 44, 272-280, 1990.
21. APHA, AWWA, WPCE, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 16 th Ed. USA, 1985.