

La eliminación de bacterias y amebas de vida libre altamente patógenas en aguas residuales

Ma. Teresa Orta de Velásquez, Ma. Neftalí Rojas-Valencia y Alberto Ayala

Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Coordinación de Ingeniería Ambiental, Ciudad Universitaria, Coyoacán, México D.F. México.

*El objetivo de este proyecto era determinar la efectividad del ozono como desinfectante contra microorganismos de alta resistencia en aguas residuales. Se aplicó una dosis de ozono de 51.5 mg/L a muestras sintéticas y naturales de las bacterias *V. cholerae*, *S. typhi* y el protozoo *Acanthamoeba*, y a indicadores de contaminación biológica como bacterias coliformes totales (TC) y el coliformes fecales (FC) durante diversos períodos de tiempo, a un pH 5 y 7. También se realizaron análisis simultáneos de parámetros físico-químicos que pudiesen interferir en el proceso de desinfección. Los resultados mostraron que tras 14 minutos todas las bacterias y amebas habían sido destruidas por completo, además de una clara reducción de algunos de los parámetros físicos y químicos.*

Palabras clave Ozono, Bacteria patógena, Tratamiento de aguas residuales, Protozoo *Acanthamoeba*, *V. cholerae*, *S. typhi*, Irrigación.

INTRODUCCIÓN

Las aguas residuales tratadas constituyen un importante recurso hidráulico en áreas con una gran densidad de población en las que las reservas de agua dulce son limitadas. De hecho, los granjeros mexicanos han utilizado aguas residuales para regar sus campos durante más de cien años, una práctica que todavía hoy continúa en lugares como Morelos, el estado de México y el Valle del Mezquital. No obstante, dado el elevado grado de contaminación de las aguas de este país por microorganismos como bacterias, protozoos y nematodos intestinales (helminths), la irrigación de verduras y productos hortícolas destinados al consumo con aguas residuales supone un grave peligro para la salud.

La contaminación está presente en las siguientes concentraciones: coliformes fecales, (FC) de 10^7 a 10^9 MPN/100 mL; *Salmonella typhi*, de 10^5 a 10^9 MPN/100 mL; *Vibrio cholerae*, de 10^4 a 10^6 MPN/100 mL; Enterococci, 78/100 mL; *Coliphages* 1350/100 mL (Juárez-Figueroa et al., 2003), y *Cryptosporidium*, de 10^3 a 10^4 quistes/L (Cifuentes, 2000). También aparecen los siguientes géneros de amebas: *Acanthamoeba* (71,3 %), *Vahlkampfia* (10 %), *Pelomyxa* (6,4 %) y *Mayorella* (5,0 %) (Matuz, 2001).

Las bacterias de *Salmonella typhi* y *Vibrio cholerae* son uno de los principales focos de infecciones gastrointestinales en México y Latinoamérica, porque las bacterias resultan difíciles de controlar. Los parásitos protozoarios como la *Giardia* y el *Cryptosporidium* también constituyen un problema, porque se adaptan bastante bien a la vida en el agua y provocan enfermedades incluso a bajas concentraciones (Owens et al., 2000).

Dado el riesgo para la salud pública que los microorganismos representan a estos niveles y con esta diversidad, es obvio que la desinfección es la fase más importante del tratamiento de las

aguas residuales, especialmente cuando éstas van a reutilizadas con fines agrícolas. Sin embargo, todos los microorganismos citados arriba son resistentes a las dosis de cloro y los tiempos de contacto aplicados actualmente en las plantas de tratamiento de aguas residuales de Ciudad de México (Rojas, 2004).

Por ello, el objetivo de este estudio era determinar la capacidad desinfectante del ozono y la viabilidad técnica de aplicar un método avanzado de tratamiento con ozono para destruir los microorganismos que han desarrollado una resistencia tenaz a los agentes desinfectantes comunes.

METODOLOGÍA

Este proyecto analizó las aguas residuales procedentes de la depuradora municipal del Cerro de la Estrella, en Ciudad de México. Estas instalaciones tratan aguas con residuos tanto industriales como domésticos, y su efluente se utiliza principalmente en la irrigación de paisajes urbanos y en la refrigeración industrial. No obstante, al final también acaba en los canales de Xochimilco, donde es utilizado para regar las cosechas.

Las muestras de agua utilizadas en el estudio se tomaron en la planta cada dos semanas y durante un período de doce meses. Para llevar a cabo los análisis microbiológicos se recogió un litro de agua residual de cada uno de los tres puntos de muestra: del afluente (agua bruta), del agua procedente de la etapa de tratamiento secundario y del efluente clorado. Se tomaron tres litros más de cada punto para las pruebas físicas y químicas, sumando todas las muestras recogidas un total de 12 litros. Además, para concentrar bacterias en cada visita se depositaron hisopos de Moore en el lugar y se recogieron veinticuatro horas después.

El ozono se aplicó a muestras naturales y sintéticas de las bacterias *V. cholerae*, y *S. typhi* y los protozoos *Acanthamoeba*, y a indicadores de contaminación biológica como las bacterias coliformes totales (TC) y coliformes fecales (FC). Se realizaron también análisis simultáneos de varios parámetros físico-químicos que pudiesen interferir en el proceso de desinfección.

El proceso para determinar la capacidad de desinfección del ozono se desarrolló como sigue: para aislar y cuantificar *V. cholerae* se utilizaron dos métodos. En el primero, el método del Número más Probable (MPN), se utilizó agua peptonada alcalina como medio de cultivo; en el segundo, el método del filtro de membrana, se usó agar selectivo tiosulfato citrato bilis sacarosa (TCBS). *S. typhi* también fue cuantificado mediante este método, pero el medio de cultivo utilizado fue agar Bismuto Sulfito. La cuantificación de TC también se llevó a cabo mediante este método, aunque utilizando agar M-ENDO. Los tres tipos de bacteria, *V. cholerae*, *S. typhi* y TC, fueron incubados a $35^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}$ durante 24 horas, mientras que los coliformes fecales (FC) se cuantificaron en un medio MFC y se incubaron en un baño de agua a $44,5^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}$, también durante 24 horas.

En las pruebas controladas en laboratorio las bacterias patógenas fueron identificadas con el sistema API 20E, utilizando como referencia las cepas certificadas *V. cholerae* NO 01 WFCC-449 y *S. typhi* ATCC-6539.

La biomasa certificada se usó para preparar una suspensión en agua destilada esterilizada que con turbidez máxima de grado 3 en la escala nefelométrica de McFarland. Después se añadió 1 mL de inóculo inicial de esta suspensión a 999mL de agua destilada esterilizada, proporcionando valores fluctuantes aproximadamente entre 10^5 y 10^7 MPN/mL. Se simulaban así las dosis de *V. cholerae* y *S. typhi* presentes habitualmente en las aguas residuales, y

después las muestras de control preparadas se sometieron al sistema de ozonización descrito en Rojas et al. (2001).

Además de las muestras de control sintéticas con bacterias certificadas compradas también se prepararon otras con amebas. En este caso se obtuvieron primero aislándolas de las aguas residuales. Ambos tipos de muestras fueron sometidos al mismo tratamiento con ozonización, tal y como se describe a continuación.

El agua inoculada con bacterias y amebas fue ozonizada en un reactor discontinuo en intervalos de 15 minutos, y se tomaron muestras periódicamente para medir la eficacia del proceso de desinfección. Dichas muestras se recogieron del centro del reactor mediante jeringas esterilizadas. Durante los primeros 14 minutos se tomaron cada dos minutos, y después cada 15. Se crearon diluciones de factor 1/10 a partir de cada muestra, y después las muestras se filtraron y cultivaron en medios selectivos. Se llevó a cabo el análisis de correlación, y se determinó el período de mortalidad del 90% de la concentración inicial de bacterias (t_{90}).

Se aislaron las amebas y las bacterias de las aguas residuales no procesadas, y lo mismo se hizo tras la fase de tratamiento secundario y la de desinfección con cloro y ozono. Para aislar *S. typhi*, *V. cholerae*, TC, FC y las amebas se tomaron muestras de 1000 mL de los puntos mencionados anteriormente; dichas muestras se almacenaron a temperatura ambiente en botellas ambarinas esterilizadas y de boca ancha. Las muestras fueron transportadas inmediatamente al laboratorio para analizarlas. Para aislar las amebas se prepararon concentraciones de entre 250 y 500 mL de agua residual y luego se filtraron mediante una membrana.

Para aislar y cuantificar la *Acanthamoeba* se utilizó un agar nutritivo específico para amebas de vida libre (FLA), y para cuantificar el crecimiento amebiano se utilizó un invertoscopio Nikon Mod. Tms (con objetivos 10x y 20x) tomando como base el método propuesto por Matuz (2001), y se incubó durante 48 horas a 22°C. En todas las pruebas se aplicó a la entrada del reactor una concentración de ozono en fase gaseosa de 36,8 mg O₃/L a un caudal de 0,5 L/min para obtener una dosis final de 51,5 mg/L. Este proceso se llevó a cabo con unos valores de pH de 7 y 5.

Previamente se había determinado la dosis de ozono para tres concentraciones de ozono gaseoso de 9.2, 18.4 y 36.8 mg O₃/L, con un caudal de 0,25, 0,5 y 1 L/min, durante varios períodos de tiempo y a un pH 3, 5 y 7 en el entorno controlado del laboratorio (ver Tabla 1).

Se calculó la dosis de ozono:

$$D[O_3] = \frac{[O_3]_{g,i} * V'g * t}{V_r} \quad (1)$$

$D[O_3]$ =dosis de ozono (mg/L)

$[O_3]_{g,i}$ = concentración de ozono en fase gaseosa

$V'g$ = caudal de gas (0,25, 0,5 1 a L/min)

Vr = volumen del reactor (5L)

t= tiempo de ozonización

El ozono gaseoso fue producido mediante un generador Emery Trailigaz Labo 76 (Wedeco, París, Francia) usando aire enriquecido con oxígeno como gas de alimentación (ver Figura 1). Durante las pruebas de ozonización las concentraciones de ozono en fase gaseosa se midieron mediante el método iodométrico (Birdsall et al., 1952) tanto a la entrada del reactor como a la salida. También se midió la concentración del ozono disuelto utilizando el método índigo (Bander and Hoigné, 1981).

Además de estudiar la acción del ozono sobre los microorganismos también se estudió su efecto en algunos de los parámetros físico-químicos relacionados con el proceso de desinfección. Los métodos empleados fueron los siguientes: la Turbidez (NTU) se midió con un turbidímetro (Hach 2100P, Loveland, CO, USA); la conductividad y los sólidos disueltos totales se determinaron mediante conductimetría (medidor de Conductividad/TDS de Hach, modelo P/N 446600-00); el pH se determinó mediante el método electrométrico (Cole-Parmer 05669-20, potenciómetro para pH con microordenador, Vernon Hills, IL, USA), y el COD, mediante el método colorimétrico con una unidad digestora COD (reactor COD Hach y el espectrofotómetro de lectura directa Hach DR/2000).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados mostraron que las bacterias *Salmonella typhi* y *Vibrio cholerae*, y las tres amebas de vida libre *Vanella sp.*, *Mayorella sp.* y *Acanthamoeba sp.* estaban presentes en todas las muestras de agua residual. Ésta última, *Acanthamoeba sp.*, resulta especialmente preocupante, dado que posee una gran capacidad de adaptación y demuestra una considerable tolerancia hacia una amplia gama de condiciones ambientales; puede dañar el sistema nervioso central e incluso causar la muerte, sobretodo en el caso de niños pequeños. Esta cepa, al igual que las otras bacterias, se encontró tanto en el afluente previo a la filtración como en el efluente posterior a la cloración.

Tras la aplicación del ozono, las muestras sintéticas muestran en cada una de las fases del proceso de ozonización un claro descenso del número de *V. cholerae*, *S. typhi*, Fc, Tc y amebas. La Figura 2 muestra que a los 8 minutos de la ozonización se obtuvo una proximidad adecuada a los estándares establecidos para la irrigación (1000 MPN/100 mL), y que a los 14 minutos todas las bacterias y amebas habían sido completamente destruidas, lo que en cualquier caso se ajusta al estándar NOM-001-ECOL-1996, que establece el límite máximo de contaminantes en vertidos de aguas residuales permisible para cualquier receptor, ya se trate de agua o suelo.

La Figura 2 también presenta los coeficientes de correlación (r), los cuales incluyen unos valores significativamente altos, de 0,95 en el caso de *S. typhi* y de 0,99 en el caso de *V. cholerae* y FC. El proceso de inactivación muestra una cinética de primer orden en lo que se refiere a la concentración bacteriana. Los períodos de inactivación del 90% de la población inicial de microorganismos (t_{90}) oscilaron entre 2 y 14 minutos, dependiendo de la concentración y la sensibilidad de las diferentes cepas bacterianas.

Anteriores prácticas y otros estudios han demostrado que el ozono puede destruir las membranas celulares y el protoplasma, y que este proceso impide la reactivación celular en bacterias, coliformes, virus y protozoos (Langlais et al., 1991; US EPA, 1999).

El ozono inactiva las bacterias mediante reacciones de oxidación (Lazcano, 1999). Como puede verse en la Figura 3, (a) la membrana celular es la primera área afectada; después (b) el ozono ataca las glucoproteínas, los glucolípidos, o cierto aminoácidos, y también actúa sobre los grupos sulfhidrilos de ciertas enzimas (US EPA, 1999); (c) el efecto del ozono en las paredes celulares empieza a resultar evidente; (d) las paredes celulares comienzan a descomponerse tras estar en contacto con el ozono; (e) la membrana celular es perforada durante este proceso; y finalmente, en (f) la célula se desintegra o sufre lisis celular.

Este proyecto examinó además la capacidad desinfectante de una dosis de ozono de 51,5 mg/L con valores de pH de 5 y 7, sometidas a distintos tiempos de contacto (0, 10, 15 y 30 minutos).

Resultados de la aplicación de ozono en amebas

La Figura 4 muestra la inactivación de *Acanthamoeba sp.* tras la aplicación de una concentración de ozono gaseoso de 36,8 mg O₃/L (a 0,5L/min) con diferentes tiempos de contacto. El coeficiente de correlación también resultó significativo (0,99), y el proceso de inactivación mostró una cinética de primer orden, como sucedía en el caso de las bacterias.

Como se ha descrito anteriormente, la *Acanthamoeba sp* predominaba en las aguas residuales sometidas a estudio. Esta circunstancia puede deberse a que la pared del quiste de la *Acanthamoeba sp* contiene celulosa, lo que la hace tremendamente resistente a las condiciones ambientales externas. El ozono actúa volviendo permeable la membrana celular; entonces el ozono acuoso penetra el quiste (a pesar de que posee una pared de celulosa doble) y daña la membrana citoplásmica. Una penetración más amplia afecta el núcleo celular, los ribosomas y otros componentes estructurales (US EPA, 1999).

La *Acanthamoeba sp* causa meningoencefalitis fulminante, que puede causar la muerte en un período de entre 3 y 6 días, y encefalitis granulomatosa crónica, que puede matar en un período de tiempo algo más largo. La *Acanthamoebae* también puede provocar infecciones severas en otros órganos, como los pulmones, la piel, los ojos y los oídos. Si la eliminación de amebas de vida libre como ésta fuera factible, también sería factible reducir las infecciones en humanos.

Las investigaciones con otras especies de protozoos han descubierto que el quiste de *Giardia lamblia* es tan sensible al ozono como la *Mycobacteria* en forma de espora (Langlais et al., 1991). También se ha demostrado que el ozono es el desinfectante más efectivo para inactivar el *Cryptosporidium* (Rennecker et al., 1999), un dato importante porque éste está considerado como el protozoo más resistente: es diez veces más resistente que la *Giardia* (US EPA, 1999).

Además de estas conclusiones, los resultados de los experimentos con *Acanthamoeba sp.* (véase Figura 5) han demostrado que estas amebas poseen mitocondrias y glutatión, además del gen de la glutatión reductasa y compuestos tioles obtenidos mediante HPLC (Ondarza et al; 2002). Este compuesto, tiol, podría ser el objetivo de la acción del ozono contra este parásito, ya que se ha sugerido que el ozono entra en acción directa y rápidamente con los compuestos sulfurados R-HS⁻ (Doré, 1989), con una constante de velocidad de $KO_3 = 1,1E10^6 M^{-1} s^{-1}$ en un medio ácido.

La Tabla 2 muestra el porcentaje de supervivencia de cada microorganismo obtenido de los CT con ozono. En todos los casos los microorganismos resultaron ser muy susceptibles a la ozonización, y se observó una marcada reducción de la concentración bacteriana. También se descubrió en todos ellos una correlación lineal entre el logaritmo de la concentración

bacteriana (N) y el tiempo de contacto, siendo significativos ($\alpha = 0,05$) los coeficientes de correlación lineal (r) en todos los experimentos (véase las Figuras 2 y 4, y la Tabla 2).

Resultados de las muestras de aguas residuales municipales procedentes de la planta de tratamiento del Cerro de la Estrella

La Tabla 3 muestra los resultados microbiológicos correspondientes a los microorganismos encontrados en las distintas etapas (desde el afluente hasta la desinfección con cloro y ozono) de la planta de tratamiento del Cerro de la Estrella.

En la Figura 6 se debería observar que, a partir de los 15 minutos de aplicación de ozono con una dosis de 51,5 mg/L a un pH 7, el 100% de TC, *S. typhi* y *V. cholerae* habían sido destruidas. Con el pH 5 se detectó un comportamiento similar. En el caso de las amebas, la concentración fue menor con dicho pH. Sin embargo, dado que las muestras de bacterias y amebas se recogieron en diferentes días, no se puede afirmar categóricamente que la reducción se deba totalmente al proceso de ozonización. No obstante, tras 15 minutos ya no se observó crecimiento bacteriano, independientemente de la concentración.

La Figura 6 muestra los resultados obtenidos tras la aplicación de dos desinfectantes convencionales, cloro y ozono. Se puede ver que la mayor parte de los microorganismos patógenos sobreviven a la aplicación del cloro, pero su número se reduce significativamente o son completamente eliminados cuando se les añade ozono.

Las Tablas 4 y 5 presentan los efectos del ozono sobre algunos parámetros físico-químicos que requieren de este compuesto, como la turbidez, los sólidos disueltos totales (TDS), la BOD₅ y el COD, con diferentes valores de pH.

La variación de parámetros físicos/químicos en función del tiempo de ozonización aparece en la Tabla 4. Se puede advertir que los TDS permanecieron constantes, sin que hubiera cambio alguno con la aplicación de un pH 7 y una dosis de ozono de 51,5 mg/L. La alcalinidad y el pH también permanecieron constantes, y la COD se redujo un 50% en una hora. Dado que la BOD₅ sólo se evaluó al final del proceso, no queda claro si en este caso se produjo algún cambio.

Tabla 5 (ozono con un pH 5). El SDT se redujo a un tercio de su valor inicial a los 15 minutos. El COD se redujo un 5% en el mismo tiempo, y un 10% en 60 minutos. La BOD₅ mostró al final una eliminación del 24%. La presencia de BOD₅ residual tras la ozonización nos hace especular con la presencia de sustancias resistentes a la oxidación por ozono en el caso de pH ácido a temperatura ambiente. Aunque se trata de un proceso discontinuo, el ozono se añade de manera constante, y ésa es la razón por la que los niveles de DO₃ se incrementan en vez de reducirse con el tiempo.

En las muestras naturales de agua la BOD se reduce más rápido que el COD, lo que significa que en condiciones naturales la oxidación enzimática destruye rápidamente cualquier compuesto biológico existente; es lo que sucede normalmente en las plantas de tratamiento que operan con procesos biológicos. Una vez que los microorganismos han muerto, su masa celular o residual muestra una BOD baja porque está formada por compuestos procedentes de una fase de estabilización avanzada, pero el valor del COD es elevado porque dichos compuestos no se pueden oxidar biológicamente. La reducción de la BOD fue causada por la elevada dosis de ozono (51,5 mg/L) que se aplicó durante 1 hora.

Comparación de las estimaciones de costos de los dos desinfectantes convencionales

Los costes de los sistemas de desinfección mediante cloro dependen del fabricante, de la localización y la capacidad de la planta de tratamiento, y de las características de las aguas a tratar. Los compuestos de hipoclorito, por ejemplo, suelen ser más caros que el gas de cloro (véase Tabla 6). Sin embargo, son numerosas las ciudades importantes que han elegido utilizar hipoclorito simplemente para evitar tener que transportar el gas de cloro por áreas urbanizadas. Además de los costes de cloración, en algunos casos es necesario incluir el coste de la decloración porque puede incrementar el coste total de la desinfección entre un 30 y un 50%.

Los costes anuales del funcionamiento y el mantenimiento de un sistema de desinfección mediante cloro también incluyen el consumo eléctrico, los compuestos químicos, los materiales de limpieza, la reparación del equipamiento y los costes del personal. Los resultados de un estudio llevado a cabo por la Fundación de investigación del ambiente acuático (Water Environment Research Foundation), elaborado con efluentes secundarios procedentes de instalaciones desinfectantes cuyos caudales oscilaban entre 0,04 y 7,4 m³/s, reveló unos costes de desinfección de 28,14 dólares (21,7 €)/1000m³, o 0.022 €/m³ para una dosis de cloro de 20 mg/L; y costes de 31.28€/1000m³ o 0,031€/m³ por decloración (EPA, 1999).

Antes de comparar los costes, los tiempos de contacto y la reducción logarítmica de cada desinfectante primero se debe fijar una dosis. La dosis necesaria para conseguir la inactivación de diferentes microorganismos varía sustancialmente en función del desinfectante, y lo mismo sucede en el caso de un desinfectante cuando se aplica a diferentes micro-organismos (véase la Tabla 6).

Hoy en día la cloración es más eficiente en términos de costes (0,021€/m³) que la desinfección con ozono (0,033€/m³). Sin embargo, cuando se requiere realiza decloración ésta eleva el coste a 0.0329€/m³, lo que en realidad termina igualando el coste final.

Tras estudiar la bibliografía, se puede afirmar que el ozono es el que posee el mayor poder germicida, seguido por el cloro. El ozono es 25 veces más efectivo que el ácido hipocloroso (HOCl), entre 2.500 y 3.000 veces más potente y rápido que el hipoclorito (OCl⁻); y 5.000 veces efectivo que la cloramina (NH₂Cl). Estos resultados se han evaluado comparando las constantes de tiempo con la concentración (CT) necesaria para eliminar el 99,99% de los microorganismos (Singer, 1989).

CONCLUSIONES

Los resultados mostraron una clara reducción en las concentraciones bacterianas y de amebas de vida libre, al igual que en algunos parámetros físico-químicos. Se observó que a los 14 minutos de aplicar el ozono el 99,98% de las bacterias había sido eliminado, y no se detectaron amebas de vida libre. Además, la inactivación de microorganismos proporciona una cinética de primer orden tras la aplicación del ozono.

Así, queda probado que el ozono destruye realmente las bacterias y amebas que resultan difíciles de combatir por otros medios. El hecho de que otros métodos de desinfección impliquen el uso de químicos que a veces resultan peligrosos en caso de consumo humano, y que siempre son nocivos para el medio ambiente, es especialmente importante.

La variación del pH en las muestras ozonizadas alteró el proceso de desinfección. No obstante, no hubo ninguna variación significativa entre el pH 5 y el 7, dado que con ambos niveles se

obtuvieron resultados notables en los parámetros bacterianos y en casi todos los parámetros físicos/químicos iniciales, al igual que en la destrucción de material orgánico.

El único parámetro físico/químico en el que el pH puede utilizarse para controlar la eficacia del ozono es en la BOD₅. Los resultados mostraron que el pH 5 mejoraba el ratio de eliminación de este parámetro en términos porcentuales.

Al igual que cualquier otro agente oxidante, el ozono sufre limitaciones al oxidar materia orgánica e inorgánica, dependiendo de la naturaleza y la concentración de los constituyentes del agua residual a tratar. Estos factores determinan la efectividad final del ozono, porque una cierta proporción de la materia orgánica o inorgánica puede ser resistente a la oxidación. Esto explica las variaciones observadas en los resultados de COD y BOD₅. A pesar de todo, el comportamiento del proceso de desinfección bajo las condiciones ya descritas nos permite afirmar con seguridad que los efluentes tratados con este método se ajustan a los estándares de calidad establecidos para las aguas residuales destinadas a la irrigación.

La implementación de un tratamiento basado en la desinfección con ozono puede causar el incremento de los impuestos sobre el agua, aunque no en la esfera del uso doméstico. Sin embargo, cuando se comparan los costes del agua con los costes de otros servicios públicos, como el gas, la electricidad o el servicio telefónico, el precio del agua sigue siendo mínimo. Además, el uso del ozono como desinfectante primario incrementa de forma espectacular la calidad del agua potable, y se ajusta a todas las regulaciones actuales incluso cuando la principal fuente de agua contiene una elevada cantidad de compuestos orgánicos.

En la actualidad, en términos de costes la cloración es más eficiente (0.021 €/m³) que la desinfección con ozono (0.0334 €/m³). Sin embargo, cuando se requiere realizar la dechloración ésta eleva los costes a 0.0331 €/m³, lo que termina igualando el coste final. Así, la ozonización no sólo es eficaz como desinfectante, sino que también mejora la calidad de las aguas residuales tratadas sin incrementar el coste total.