

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE QUÍMICA

**EFFECTO DESINFECTANTE DEL OZONO SOBRE
HUEVOS DE HELMINTOS, BACTERIAS Y AMIBAS
EN AGUAS RESIDUALES**

Tesis

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
QUIMICO DE ALIMENTOS**

PRESENTA

Alberto Ayala Islas

México, D.F.

2007



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado Asignado

Presidente	Prof. Eduardo Bárzana García
Vocal	Profa. Hilda Elizabeth Calderón Villagómez
Secretario	Profa. Maria Teresa Orta Ledesma
1er Suplente	Prof. Alejandro Camacho Cruz
2do Suplente	Prof. Francisco Ruiz Terán

Sitio en donde se desarrolló el tema:

Instituto de Ingeniería, UNAM

Dra. Maria Teresa Orta Ledesma
Asesor del tema

Dra. María Neftalí Rojas Valencia
Supervisora técnica

Alberto Ayala Islas
Sustentante

Agradecimientos

Mi más profundo agradecimiento a todas las personas que participaron de alguna manera en la buena terminación de esta tesis:

A la Dra. María Teresa Orta Ledesma por su dirección, apoyo y sus opiniones durante este largo trabajo.

A la Dra. María Neftalí Rojas Valencia por su asesoría técnica, su dedicación, su consejo, su opinión y su amistad .

Al Dr. Eduardo Bárzana García por sus comentarios y sugerencias.

A la M. en C. Hilda Elizabeth Calderón Villagómez por sus comentarios y preguntas que enriquecieron este trabajo.

A mis padres por su amor, aliento y paciencia.

A mis hermanas Dalia y Jareni por ese apoyo incondicional y sus palabras en los momentos más difíciles.

A mis sobrinos Héctor y Arturo por mostrarme una forma diferente de ver las cosas y por jugar conmigo.

A Yahaira quien sin su apoyo esta tesis no la hubiera terminado. Por ser una persona muy especial a la que tengo muy arraigada en mi corazón. En verdad muchas gracias.

A Nair y Alejandra por su amistad, su compañerismo y los grandes momentos que pasamos durante la elaboración de esta tesis.

Al Dr. Alfredo Vázquez por su aliento, su amistad y sus sabios consejos en los momentos que más los necesitaba.

A Eva por su gran amistad y todo su cariño, además de su ayuda y su valentía de decirme tan magnificas pero duras palabras en su momento. Y también por ser tan risueña.

A Norma por su amistad y la forma como logró que diera ese último paso y por fin terminara esta tesis

A Carla por su cariño, amistad, su aliento y su admiración. y por compartir conmigo una pequeña parte de su vida

A la UNAM por darme la oportunidad de ser parte de ella

A la DGAPA por su apoyo económico al proyecto

INDICE

1. Resumen	3
2. Introducción	4
3. Antecedentes	8
4. Objetivos	11
4.1. Objetivo General	11
4.2. Objetivos Específicos	11
4.3. Alcances	12
5. Hipótesis	13
6. Metodología	14
7. Resultados y discusión.	20
7.1. Resultados bacteriológicos.	21
7.1.1. Resultados bacteriológicos a pH 3	22
7.1.2. Resultados bacteriológicos a pH 5	24
7.1.3. Resultados bacteriológicos a pH 7	25
7.1.4. Resultados bacteriológicos comparativos de ozonización a diferentes condiciones de pH	26
7.1.5. Resultados bacteriológicos de las muestras de la planta de tratamientos de agua	30
7.2. Amibas	30
7.3. Huevos de Helminetos	33
7.4. Resultados Fisicoquímicos.	33
7.4.1. Sólidos disueltos totales (SDT)	35
7.4.2. Turbiedad	36
7.4.3. Demanda Química de Oxígeno (DQO)	38
7.4.4. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)	42
7.4.5. pH	43
7.4.6. Alcalinidad	44
7.4.7. Ozono disuelto	44
8. Conclusiones	45
9. Bibliografía	47

INDICE DE TABLAS Y FIGURAS

1.	Tabla 1. Ventajas y desventajas del ozono en el tratamiento de aguas residuales	7
2.	Figura 1. Diagrama del procedimiento utilizado para el aislamiento de bacterias patógenas a partir de aguas residuales	15
3.	Figura 2. Equipo generador de ozono	17
4.	Tabla 2. Resultados bacteriológicos de la desinfección con ozono a pH 3, 5 y 7 con flujos de 9.2, 18.4, 36.8 mg de O ₃ / L	21
5.	Tabla 3. Resultados bacteriológicos de la desinfección con ozono después de 15 minutos	23
6.	Gráfica 1. Disminución de la carga microbiana durante las diferentes etapas del tratamiento de agua residual utilizando diferentes condiciones de desinfección.	27
7.	Gráfica 2. Variación de la carga microbiana durante el proceso de tratamiento de agua residual en una planta de tratamiento Cerro de la Estrella	28
8.	Gráfica 3. Comparación de la desinfección con ozono y cloro al final de la cadena del tratamiento de agua residual.	29
9.	Figura 3. <i>Vannella sp</i> a) forma flotante b) trofozoito	31
10.	Figura 4. <i>Mayorella sp</i> a) forma flotante b) trofozoito	31
11.	Figura 5. <i>Acanthamoeba sp</i> a) trofozoitos, b) quistes	32
12.	Tabla 4. Disminución de huevos de helmintos al aplicar ozono en agua residual	33
13.	Tabla 5. Resultados fisicoquímicos de la desinfección con ozono	34
14.	Tabla 6. Cambio de los parámetros fisicoquímicos de una etapa a la siguiente, expresada en porcentaje, donde el signo negativo indica una disminución.	36
15.	Gráfica 4. Comportamiento de los parámetros fisicoquímicos medidos durante el proceso normal de tratamiento de agua residual utilizando cloro como desinfectante.	37
16.	Gráfica 5. Comportamiento de los parámetros fisicoquímicos medidos durante el proceso de tratamiento de agua residual utilizando ozono como desinfectante a nivel laboratorio y aplicándolo por una hora y ajuste a pH 3.	39
17.	Gráfica 6. Comportamiento de los parámetros fisicoquímicos medidos durante el proceso de tratamiento de agua residual utilizando ozono como desinfectante a nivel laboratorio y aplicándolo por una hora y ajuste a pH 5.	40
18.	Gráfica 7. Comportamiento de los parámetros fisicoquímicos medidos durante el proceso de tratamiento de agua residual utilizando ozono como desinfectante a nivel laboratorio y aplicándolo por una hora sin ajuste de pH.	41

1. Resumen

Las bacterias *Salmonella typhi* y *Vibrio cholerae* y los protozoarios del género *Acanthamoeba sp*, ocupan los primeros lugares por incidencia en enfermedades gastrointestinales en México y Latinoamérica por su difícil control. Estos microorganismos llegan a resistir las dosis y tiempos de contacto con cloro que se aplican usualmente en las plantas de tratamiento de agua residual de la Ciudad de México.

En este trabajo se determinó la capacidad de desinfección del ozono en muestras de agua residual municipal con altas concentraciones de estos microorganismos (1.4E+06 UFC para *Vibrio cholerae* y 1.6E+06 UFC para *Salmonella typhi*), y se aplicó ozono a concentraciones de 9.2, 18.4 y 36.8 mg O₃/L en fase gas, a diferentes condiciones de pH (3, 5 y 7) y tiempos de contacto (0, 15 y 60 min.). Paralelamente se evaluó la demanda de ozono por parámetros fisicoquímicos. Los resultados mostraron un claro decremento en las concentraciones de bacterias y algunos parámetros fisicoquímicos, eliminando a los 15 min. de aplicación de ozono, el 99.98% de las bacterias; logrando en todos los casos el cumplimiento de la norma NOM-001-SEMARNAT-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las descargas de aguas residuales. El tiempo máximo de ozonización aplicado fue de 1 h, esto con la finalidad de conocer el efecto sobre amibas y huevos de helmintos, ya que éstos son más resistentes a los métodos de desinfección que las bacterias.

Con respecto a la evaluación de los parámetros fisicoquímicos, en términos generales, se observó una reducción casi total de DBO₅ (de 95.2%), la turbiedad se removió en un 98.58%, la DQO se redujo en 86.6% y la alcalinidad disminuyó aproximadamente en 10 mg expresados como CaCO₃/L. Las muestras de campo no mostraron variaciones de Sólidos Disueltos Totales y de pH por la acción del ozono.

2. Introducción

En México existen diferentes tipos de enfermedades por infecciones gastrointestinales. De acuerdo con el Sistema Nacional de Información de Salud (SINAIS) de la Secretaría de Salud (SSA), en 2003 dichas infecciones ocuparon la decimoctava causa de muerte general en la población con 4,561 casos y la primera entre la población infantil preescolar (de 1 a 4 años) con 648 casos. Además, en el año 2004, la Dirección Nacional de Epidemiología indicó que se tuvieron a nivel nacional, 185,424 casos de ascariasis, 388 casos de teniasis, 524,646 casos de otras helmintiasis, 834,601 casos de amibiasis intestinales, 406 casos de cisticercosis, 40,906 casos de giardiasis, 100,563 casos de otras infecciones debidas a protozoarios, 25,952 casos de fiebre tifoidea, 109,444 casos de paratifoidea y otras salmonelosis, 22,321 casos de shigelosis, 39,947 casos de intoxicaciones bacterianas por alimentos, y 4,778,135 infecciones intestinales por otros organismos y mal definidas (Sistema Único de Información para la Vigilancia Epidemiológica, Dirección General de Epidemiología 2004).

El uso de aguas tratadas deficientemente para riego agrícola representa un riesgo para la salud porque puede transportar una gran cantidad de agentes patógenos como bacterias, virus, protozoarios y huevos de helmintos que provienen de animales o individuos infectados. Esto hace necesario y urgente aplicar un tratamiento adecuado al agua residual para su reutilización segura, principalmente en agricultura, ya que estos microorganismos son normalmente transmitidos por vía hídrica

.La desinfección es la última de varias etapas en el tratamiento de agua residual. Dado que el desinfectante ideal aún no se ha creado, la desinfección con cloro es actualmente la tecnología disponible más ampliamente utilizada. A pesar de que el cloro presenta muchos beneficios para la salud pública y el tratamiento de agua, estudios recientes indican también que puede existir una relación causal entre la desinfección del

agua con cloro y la salud reproductiva y/o fetal (Reynolds, 2002 y Bove, 2002). Otros estudios han indicado que el consumo de agua clorada puede tener efectos negativos a largo plazo como cáncer (Jolley, 1990).

Cuando se añade cloro al agua de origen que contiene materias orgánicas naturales (MONs), tales como los ácidos húmico y fúlvico de plantas podridas, u otros residuos orgánicos, éste reacciona con los agentes orgánicos para formar productos derivados, como los trihalometanos (THMs). Los principales THMs de preocupación son: 1) cloroformo (CHCl_3), 2) bromoformo (CHBr_3), 3) bromodiclorometano (CHCl_2Br), y 4) clorodibromometano (CHClBr_2). Colectivamente, estos compuestos son conocidos como THMs totales (THMTs). Otros grupos principales de productos derivados de la desinfección incluyen los ácidos haloacéticos y los haloacetnitrilos (Bove, 2002).

Los oficiales de salud pública advierten que los riesgos a la salud asociados a los THMs son pequeños comparados con los riesgos de las enfermedades propagadas a través del agua, por lo que es importante continuar con el proceso de desinfección a menos que éste pueda ser sustituido por una alternativa efectiva que proporcione un suministro de agua más seguro (Reynolds, 2002).

Tomemos en cuenta la situación de Perú en 1991, cuando los procesos de cloración del agua fueron detenidos en parte debido a la preocupación por los efectos negativos potenciales de los THMs. El resultado de esto fue el primer brote de cólera en la región desde principios del siglo, ocasionando más de 1 millón de casos y 13,000 muertes en 5 años en Latinoamérica. En los países desarrollados, el agua que contiene más de 80 ppb de THMTs es considerada inaceptable para consumo. Sin embargo, los suministros alternos pueden no estar accesibles (USEPA, 1999 y Reynolds, 2002).

En México, la amibiasis es una de las causas principales de infecciones gastrointestinales por lo que es necesario un control sanitario importante para disminuir su incidencia. El uso de cloro es ineficaz para eliminar a estos microorganismos porque, en condiciones extremas, tienen la particularidad de formar quistes altamente resistentes (Tay,1991).

También hay bacterias que deben considerarse en el tratamiento de agua como *Salmonella typhi* que ocupa los primeros lugares en incidencia en infecciones gastrointestinales y *Vibrio cholerae* 01 variedad rugosa que logra adaptarse a concentraciones altas de cloro modificando su morfofisiología (Orta, 1998).

Una alternativa para la desinfección de aguas residuales es el ozono. El ozono tiene características que le confieren un gran potencial para ser usado en la desinfección de agua residual: a) desinfección y control de algas, hongos, bacterias protozoarios y virus, b) oxidación de contaminantes inorgánicos como el Fe y el Mn, c) oxidación de micro contaminantes, como la destrucción de compuestos que producen olor y color, el incremento de la biodegradabilidad de compuestos orgánicos y la prevención de la formación de halometanos, d) mejora en la coagulación de varios compuestos, e) mejora en la filtración, f) aumento en la vida del carbón activado y g) es considerado como uno de los agentes microbicidas y virucidas más rápido y eficaz que se conoce, ver tabla 1 (Geering, 1999; Langlais, 1991; Garay, 1992 y Rakness, 1993).

A pesar de sus ventajas, no existen estudios internacionales ni nacionales que reporten el efecto del ozono sobre microorganismos de difícil control como *Acanthamoeba sp*, *Salmonella typhi* y *Vidrio cholerae* 01 en conjunto.

La importancia de este trabajo fue ver el efecto que tiene el ozono y su poder desinfectante sobre microorganismos patógenos de difícil control, como los ya menciona-

Tabla 1. Ventajas y desventajas del ozono en el tratamiento de aguas residuales.

Ventajas	Desventajas	Referencia
Es un desinfectante eficaz y un oxidante químico poderoso tanto en reacciones orgánicas como inorgánicas.	Requiere de alta energía eléctrica.	Hoigné, 1998
Altamente eficiente como bactericida y virucida, destruye estos microorganismos por medio de oxidación de la masa proteica y la desinfección es llevada a cabo en segundos.	Es relativamente más complejo para operar y mantener que el sistema de cloración.	Garay, 1992 y Rakness, 1993
Mejora la calidad del agua – reduciendo la DBO ₅ y DQO hasta en un 20%.	Riesgo moderado.	Hoigné, 1998
No se han encontrado compuestos tóxicos o efectos mutagénicos en los efluentes secundarios urbanos tratados con ozono.	Baja solubilidad.	Langlais, 1991
Es un agente altamente efectivo para el tratamiento avanzado de las aguas residuales, efluentes secundarios y terciarios principalmente.	La inestabilidad de su eficiencia puede ser generada por el mal uso	Hoigné, 1998
Contribuye a un incremento en el oxígeno disuelto.	Es más costoso que la cloración.	Hoigné, 1998
Destruye algunos compuestos orgánicos tales como las sustancias húmicas, que son precursoras de la formación de (THMs), plaguicidas e hidrocarburos.	-----	Grebenyuk, 1993
Oxida contaminantes inorgánicos como el hierro y el manganeso.	-----	Doré, 1989
Mejora la floculación y coagulación.	-----	Jekel, 1994 y Orta, 1998
Altamente eficiente en la reducción de color y olor.	-----	Killops, 1986

dos. Además se analizó el impacto de la ozonización sobre algunos parámetros físico-químicos en una planta de tratamiento de agua residual, como la DBO₅, DQO, turbiedad, sólidos disueltos totales, la alcalinidad y la influencia del pH en el comportamiento del ozono.

3. Antecedentes

El ozono es el estado alótopo del oxígeno en el que cada molécula se compone de tres átomos del mismo (O_3). A temperatura y presión ambientales el ozono es un gas de olor picante e incoloro, que en grandes concentraciones puede volverse azulado. El nombre del ozono proviene del griego “ozein” que significa oler. Este nombre fue utilizado por primera vez en 1840 por Schoenbein quien le dio ese nombre al olor característico descrito por primera vez en 1785 por von Marum en una máquina electrostática. En 1804, Cruikshank percibe el mismo olor en un ánodo (Colaboradores de Wikipedia, 2006).

La capacidad del ozono como desinfectante de agua contaminada fue reconocida en 1886 por Meritens (Langlais, 1991). En 1889, el químico francés Maruis Paul Otto hizo los primeros estudios con ozono en la Universidad de París (Le Paulouë, 1999).

El uso del ozono en plantas de tratamiento de agua residual se conoce desde hace más de cien años (Rice, 1986), la primera aplicación a escala industrial para el tratamiento de agua, fue en 1893 en Holanda y, a partir de ese momento se extendió su uso en Europa. En 1906 en Niza, Francia, se construyó la primera planta de tratamiento de agua por ozono y se llamó “Bon Voyage”, pero, durante la Primera Guerra Mundial, se descubrió el cloro y sustituyó al ozono por ser de menor costo (Le Paulouë, 1999).

El ozono tiene ciertas características importantes para su aplicación en el tratamiento de aguas residuales, pues es un desinfectante eficaz y un oxidante químico poderoso tanto en reacciones orgánicas como inorgánicas (Hoigné, 1998); es altamente eficiente como bactericida y virucida. Su mecanismo de destrucción se basa en la oxidación de la masa proteica y la desinfección es llevada a cabo en segundos (Garay, 1992 y Rakness. 1993), también mejora la calidad del agua, reduciendo la DBO_5 y DQO

hasta en un 20% (Hoigné, 1998). Hasta ahora, no se han encontrado compuestos tóxicos o efectos mutagénicos en los efluentes secundarios urbanos tratados por ozonización (Langlais, 1991), es un agente altamente efectivo para el tratamiento avanzado de las aguas residuales, efluentes secundarios y terciarios, además, contribuye a un incremento en el oxígeno disuelto (Hoigné, 1998); destruye algunos compuestos orgánicos como las sustancias húmicas, que son precursoras de la formación de trihalometanos, plaguicidas e hidrocarburos (Grebenyuk, 1993); oxida contaminantes biológicos inorgánicos como el hierro y el manganeso (Doré, 1989); mejora la floculación y coagulación (Jekel, 1994 y Orta, 1998), y es altamente eficiente en la reducción del color y olor (Killops, 1986).

Actualmente el método de desinfección más usado para el tratamiento de agua es la cloración. Este método puede llevarse a cabo usando tres diferentes fuentes de cloro: hipoclorito de sodio, dióxido de cloro o cloro gaseoso. Por razones de seguridad y facilidad de transporte el método de cloración a partir de hipoclorito de sodio es el más utilizado a pesar de que su costo es de casi el doble respecto al del cloro gaseoso, es decir, el hipoclorito de sodio tiene un costo de 0.0547 dólares por m^3 mientras el cloro gaseoso tiene un costo de 0.0292 dólares por m^3 (Rojas, 2004).

El ozono es 25 veces más efectivo que el ácido hipocloroso y 2500 a 3000 veces más potente y rápido que el hipoclorito de sodio (Singer, 1989). A pesar de tener un costo de 0.043 dólares por m^3 (Liberti, 1999), mayor que el cloro gaseoso y semejante al hipoclorito de sodio, su efectividad como desinfectante justifica su implementación como proceso secundario de tratamiento de agua.

Recientemente, se han hecho estudios en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, sobre el efecto del cloro sobre bacterias de importancia médica como *Salmonella typhi* y

Vibrio cholerae y se ha visto que pueden desarrollar resistencia a este compuesto (Orta, 1998).

Las investigaciones sobre el efecto bactericida del ozono dan resultados alentadores, no obstante se enfocan normalmente a un método experimental a nivel laboratorio en donde se inoculan microorganismos en agua potable, se ozona la muestra y se determina el tiempo de contacto y la dosis para su destrucción (Wurrman, 1955). En la mayoría de las ocasiones, estos resultados no pueden ser aplicados a la realidad, por lo que resulta necesario hacer estudios en aguas residuales que no solo contienen microorganismos, sino compuestos orgánicos e inorgánicos.

4. Objetivos

4.1. Objetivo General

- Determinar la capacidad de desinfección del ozono en agua residual con presencia de las bacterias patógenas *Salmonella typhi* y *Vibrio cholerae*, así como protozoarios patógenos del género *Acanthamoeba sp* y huevos de helmintos.

4.2. Objetivos Específicos

- Estudiar el efecto del ozono sobre bacterias, protozoarios y huevos de helmintos, en función de los parámetros demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO), alcalinidad, pH, turbiedad y sólidos disueltos totales, los cuales interfieren en el proceso de desinfección

- Determinar las dosis óptimas de ozono y tiempos de contacto para la destrucción de bacterias, protozoarios y huevos de helmintos presentes en aguas tratadas con fines de reuso

- Producir un agua tratada que cumpla la norma oficial mexicana NOM-001-ECOL-1996 para aguas residuales de uso agrícola.

4.3. Alcances

- Asegurar que el tratamiento con ozono en aguas residuales elimine a todos los microorganismos patógenos presentes en aguas tratadas con fines de reuso.
- Determinar diferentes concentraciones de ozono requeridas para eliminar indicadores biológicos de contaminación como coliformes totales y fecales.

5. Hipótesis

El tratamiento con ozono puede destruir o inactivar microorganismos patógenos de alta resistencia como *Vibrio cholerae*, *Salmonella typhi*, protozoarios del género *Acanthamoeba sp* y huevos de helmintos que se encuentran en aguas residuales y que otros desinfectantes no logran destruir.

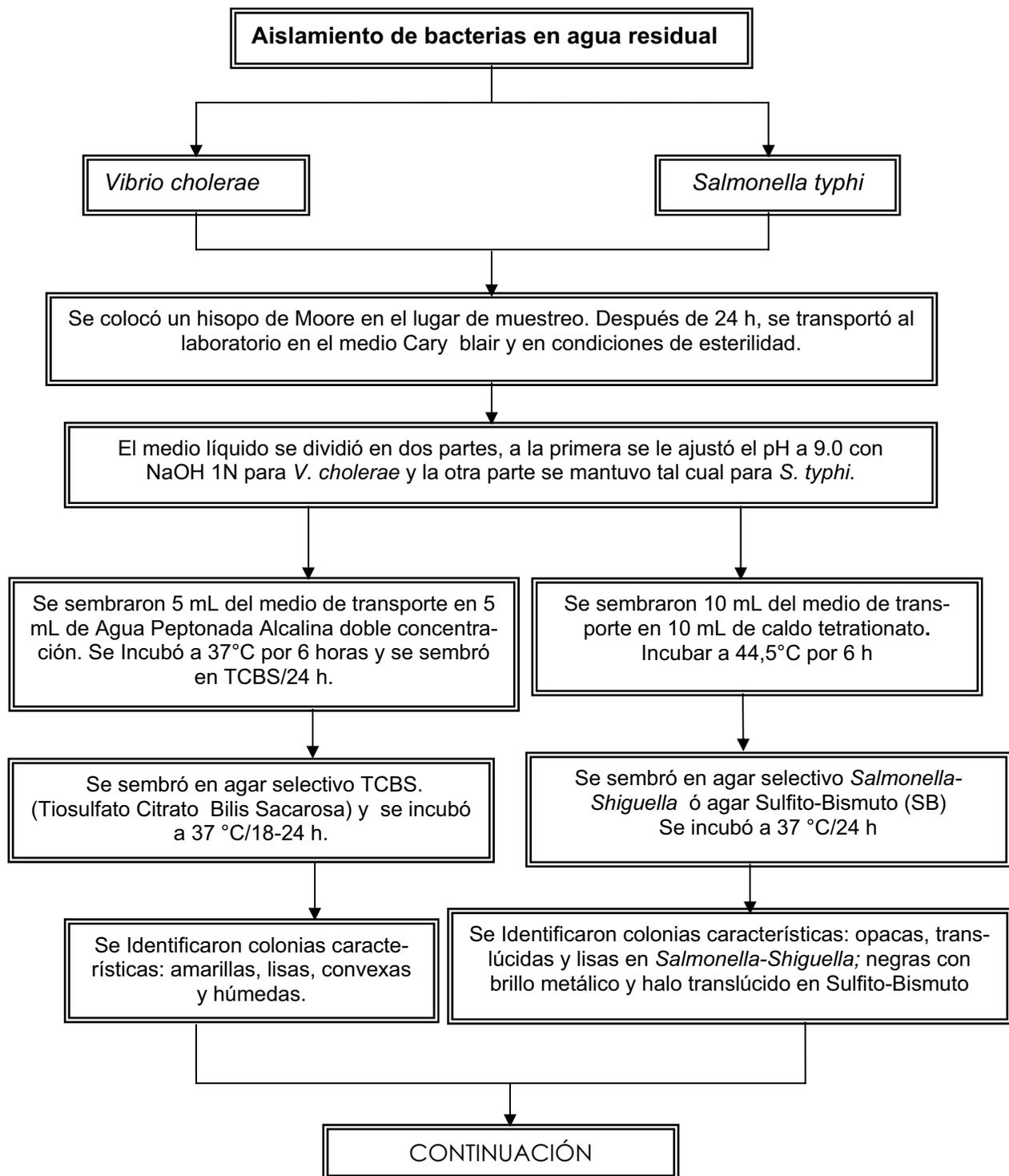
6. Metodología

El primer paso de la investigación fue una revisión bibliográfica referente al tema. Se adquirieron cepas certificadas de *Vibrio cholerae* ATCC 14035 y *Salmonella typhi* ATCC 0779 para ser usadas como parámetros de los resultados obtenidos en muestras de campo. Se instaló el equipo para utilizar el ozono como agente desinfectante y se montaron las técnicas de análisis necesarias para la segunda fase.

La parte experimental del proyecto consistió en realizar experimentos a nivel laboratorio utilizando muestras de campo para determinar la capacidad de desinfección del ozono sobre las bacterias *Vibrio cholerae* y *Salmonella typhi*, el protozooario *Acanthamoeba sp.* y huevos de helmintos. Se probó el tratamiento de desinfección con ozono en agua residual tratada y con alto contenido de microorganismos para corroborar su eficiencia en un caso real.

Las bacterias *Vibrio cholerae* y *Salmonella typhi* fueron aisladas a partir de agua residual cruda proveniente de la planta de tratamiento de agua municipal del Cerro de la Estrella, ubicada en la Avenida San Lorenzo No. 32, Colonia San Juan Jalpa, delegación Iztapalapa, México D. F. para identificar y corroborar su existencia en este tipo de agua residual.

Posteriormente, las bacterias aisladas fueron identificadas mediante el sistema API 20E y comparadas con las cepas de referencia *Vibrio cholerae* ATCC 14035 y *Salmonella typhi* ATCC 0779 (ver figura 1).



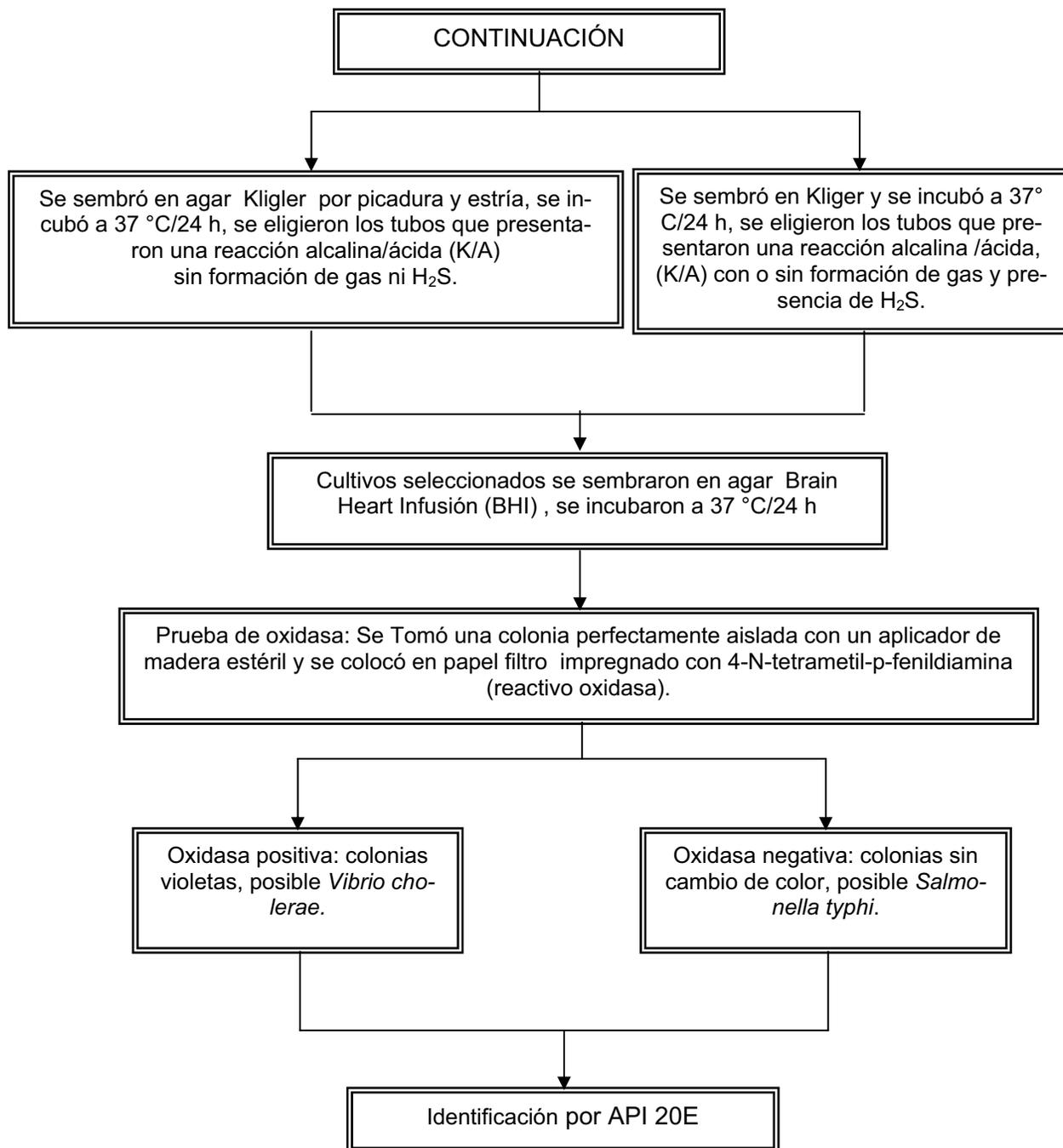


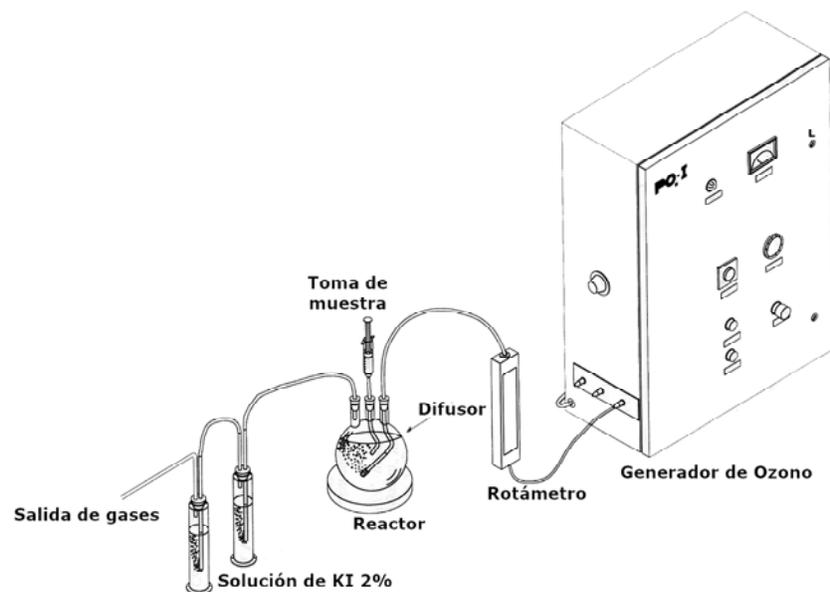
Figura 1. Diagrama del procedimiento utilizado para el aislamiento de bacterias patógenas a partir de aguas residuales

Durante esta etapa, además se cuantificó el número de bacterias de *Vibrio cholerae*, *Salmonella typhi*, así como de coliformes totales y fecales a partir de una alícuota de las muestras de la planta. Se utilizó la técnica de filtro con membrana en placas de agar tiosulfato citrato bilis sacarosa (TCBS), agar sulfito de bismuto y agar MF-C respectivamente para determinar el número de unidades formadoras de colonias (UFC).

La cuantificación se realizó en tres puntos del proceso tradicional de tratamiento de agua residual municipal del Cerro de la Estrella: 1) en el agua residual cruda, 2) en el agua obtenida después del tratamiento primario (antes de la filtración) y 3) en el agua obtenida después de la desinfección con cloro.

En el laboratorio se ozonizó por medio de un equipo generador de ozono (Figura 2) PQ-I, una muestra representativa para ver la capacidad de desinfección de este agente en la etapa anterior a la cloración en la planta de tratamiento de agua y

cuantificar, durante y al final de la ozonización, las UFC de las bacterias en estudio y comparar estos resultados con los obtenidos en la etapa después de la cloración de la planta de tratamiento.



Además se estudió el efecto del ozono sobre bacte-

Figura 2. Equipo generador de ozono

rias, protozoarios y huevos de helmintos, y sobre los parámetros que interfieren en el proceso de desinfección como son: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Turbiedad y Sólidos Disueltos Totales (SDT), y la posible influencia del ozono en la alcalinidad y el pH.

Cada quince días se hicieron muestreos en la planta de tratamiento de aguas residuales mencionada. En cada muestreo se tomaron 4 litros de los puntos de muestreo influente y efluente clorado y 8 litros para el punto antes de la filtración, se empleó 1 L para el análisis de microorganismos y 3 litros para las pruebas fisicoquímicas; y para el caso del punto de la filtración, además se utilizaron 4 litros para la ozonización. A la par se hicieron muestreos por 24 h para concentrar bacterias en un hisopo de Moore (Rojas, 2004).

El análisis de caracterización de parámetros fisicoquímicos fue realizado mediante los métodos que se describen a continuación:

La turbiedad (UTN) se midió usando el método nefelométrico con un turbidímetro Hach, modelo 2100P turbidimeter.

Los sólidos disueltos totales se determinaron por conductimetría usando un equipo Hach Conductivity/ TDS meter, modelo P/N 44600-00.

Las determinaciones de pH se realizaron por el método electrométrico usando un potenciómetro Cole-Palmer, Modelo 05669-20 Microcomputer pH-visión.

Las determinaciones de DQO se realizaron por el método colorimétrico usando un equipo digestor para DQO HACH COD reactor y espectrofotómetro HACH DR/2000 Direct reading spectrophotometer (Norma Mexicana NMX-AA-030-SCFI-2001).

La DBO₅ se determinó mediante el método electrométrico con electrodo de membrana usando un oxímetro polarográfico YSI Modelo 54ARC con escalas de 0-10 mg/L (Norma Mexicana NMX-AA-028-SCFI-2001)

La determinación de alcalinidad se obtuvo usando el método de titulación directa con ácido sulfúrico 0.2 M (Norma Mexicana NMX-AA-036-SCFI-2001).

En la figura 1, se muestra un diagrama detallado del procedimiento utilizado para el aislamiento de bacterias patógenas a partir de aguas residuales.

Para el aislamiento de amibas de las muestras colectadas se realizó una centrifugación de volúmenes que variaban de 250 a 500 mL de agua residual. Las muestras centrifugadas se decantaron para obtener un concentrado de entre 10 y 20 mL. Posteriormente, el concentrado se sembró en agar no nutritivo (NNE), un medio especial para amibas con bacterias Gram negativas muertas (*Enterobacter aerogenes* o *Escherichia coli*) por pasteurización durante 1 h y a 68 °C (Matuz, 2001). Se procedió a la identificación de los protozoarios que se encontraron en el medio según una guía de identificación con la utilización de un invertoscopio (Page, 1988)

Para la determinación y cuantificación de huevos de helmintos se utilizó la técnica reportada en el anexo 1 de la norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. Se consideraron solo los puntos referentes y aplicables a agua residual.

7. Resultados y discusión.

Se realizaron 20 muestreos en la planta de tratamiento de agua residual en tres puntos diferentes (influyente, antes del filtro y después de la cloración). En dichas muestras se identificaron y cuantificaron las bacterias *Salmonella typhi* y *Vibrio cholerae* además de coliformes totales y fecales; se identificaron algunos géneros de amibas de vida libre como *Acanthamoeba sp.*, *Mayorella sp.*, y *Vanella sp.* y se cuantificaron huevos de helmintos.

En el punto antes del filtro se recolectó el doble de muestra, la mitad fue usada en la detección y cuantificación de microorganismos antes mencionada, al resto se le aplicó el método de desinfección con ozono a nivel laboratorio. La ozonización se realizó estableciendo diferentes condiciones de pH (3, 5 y 7) y burbujeando ozono, en cada condición de pH, a tres diferentes flujos (9.2, 18.4 y 36.8 mg de O₃/L). En las condiciones de pH 5 y flujo de 0.5 mg O₃/min y pH 7 y flujo de 1.0 mg de O₃/min están promediados los datos de 3 muestreos, en las demás condiciones sólo están promediados los datos de 2 muestreos.

Para las condiciones de pH 3 y 5, este parámetro se ajustó con ácido clorhídrico concentrado antes de empezar el flujo de ozono correspondiente. Sólo las muestras recolectadas en el punto antes del filtro fueron sometidas a la acción del ozono e inoculadas con otra muestra concentrada por decantación del mismo punto del proceso, para asegurar un mayor contenido de microorganismos al momento de llevar a cabo la desinfección con ozono.

7.1. Resultados bacteriológicos.

Para realizar el análisis bacteriológico, se realizaron diluciones de la muestra desde 10^{-1} hasta 10^{-6} ; cuando en ninguna dilución se detectó crecimiento se reportó como <1 UFC. Cuando la cuenta en placa fue imposible de realizar, ya que se observaba un crecimiento sin límites, se determinó como incontable (Inc).

En los muestreos recolectados en el punto después de la cloración realizada por la planta de tratamiento de agua residual, no se encontró crecimiento de *Vibrio cholerae* pero si de *Salmonella typhi* y coliformes totales y fecales. Según los resultados mostrados en la tabla 2 a pesar de disminuir considerablemente el número de bacterias presentes en el agua al pasar por las diferentes etapas, se observa que la cloración no es un método de desinfección efectivo para *Salmonella typhi* y coliformes totales y fecales, ya que a su término se encontraron unidades formadores de colonias (UFC) del orden de 10^2 .

Tabla 2. Resultados bacteriológicos de la desinfección con ozono a pH 3, 5 y 7 con flujos de 9.2, 18.4, 36.8 mg O_3/L

Resultados microbiológicos												
Parámetros	Influyente	Antes del filtro	Efluente clorado	Aplicación de O_3								
				Dosis (mg O_3/L)	Tiempo (min)							
					0		60		0		60	
					pH 3		pH 5		pH 7			
CT (UFC/100 mL)	3.2E+06	1.0E+04	2.5E+02	9.2	8.9E+02	<1	3.8E+02	<1	Inc	<1		
				18.4	8.5E+02	<1	8.8E+03	<1	Inc	<1		
				36.8	3.9E+02	<1	Inc	<1	Inc	<1		
CF (UFC/100 mL)	1.1E+06	4.6E+03	1.3E+02	9.2	7.2E+02	<1	2.4E+02	<1	2.3E+03	<1		
				18.4	6.0E+02	<1	3.8E+02	<1	2.5E+03	<1		
				36.8	5.0E+01	<1	Inc	<1	7.8E+02	<1		
<i>Vibrio cholerae</i> (UFC/100 mL)	1.4E+05	3.6E+02	<1	9.2	3.3E+02	<1	1.3E+03	<1	1.3E+02	<1		
				18.4	9.1E+01	<1	5.4E+02	<1	3.0E+02	<1		
				36.8	<1	<1	7.5E+01	<1	4.9E+02	<1		
<i>Salmonella typhi</i> (UFC/100 mL)	1.6E+06	4.5E+03	8.6E+01	9.2	2.9E+02	<1	2.1E+02	<1	2.1E+03	<1		
				18.4	5.2E+02	<1	8.3E+03	<1	Inc	<1		
				36.8	2.0E+01	<1	Inc	<1	Inc	<1		

CT=coliformes totales, CF=coliformes fecales

Por otra parte, la aplicación de ozono a nivel laboratorio logró que no se detectara el crecimiento de estos microorganismos a los 60 minutos, en todas las condiciones

probadas. La tabla 2 muestra que a este tiempo, no se detectan colonias de ninguno de los microorganismos estudiados.

En la tabla 2 se encuentran reportados únicamente los resultados obtenidos a los 60 minutos de ozonización, pues fue este tiempo el aplicado para eliminar huevos de helmintos y amibas. Sin embargo, para la desinfección de bacterias se obtuvieron resultados cada 15 minutos hasta completar una hora. En este último tiempo no se detectaron bacterias ni amibas. En la tabla 3 se encuentran los resultados a los 15 minutos.

7.1.1. Resultados bacteriológicos a pH 3

Como en todas las condiciones de pH, se manejaron tres flujos de ozono. En los tres casos se reporta una cantidad de <1 UFC de las bacterias en estudio posterior a 60 minutos de ozonización (ver tabla 2). Así también, los resultados de los tres flujos, mostraron que después de 15 min. de aplicación de ozono, no se encontró crecimiento de ninguna de las bacterias estudiadas (ver tabla 3), a diferencia de otras condiciones de pH mayor en la que se encuentran ligeras cantidades de algunos tipos de bacterias. Esto se debe a que a pH ácido la acción del ozono es más efectiva, pues actúa de manera directa como O₃ molecular.

Debido a la importancia clínica de *Vibrio cholerae* debemos señalar que la carga de este agente infeccioso contenida en el agua residual es menor con respecto a la contenida del resto de las bacterias en estudio. Este hecho puede ser resultado de las medidas sanitarias realizadas durante los últimos diez años en contra de este agente etiológico.

Existen variaciones inherentes a la descarga de agua, ya que es heterogénea y presenta fluctuaciones no controlables. Este hecho se evidencia en la tabla 2 donde en

las muestras usadas para la condición de 36.8 mg O₃/L, se encontró un crecimiento antes de iniciar la ozonización (tiempo cero), menor que el encontrado en las muestras usadas para los otros dos flujos, 18.4 y 9.2 mg O₃/L.

Tabla 3. Resultados bacteriológicos de la desinfección con ozono después de 15 min.

Aplicación de O ₃									
Parámetros	Dosis (mg O ₃ /L)	Tiempo (min)							
		0		15		0		15	
		pH 3		pH 5		pH 7			
CT (UFC/100 mL)	9.2	8.9E+02	<1	3.8E+02	<1	Inc	5.0E+01		
	18.4	8.5E+02	<1	8.8E+03	1.6E+02	Inc	1.6E+02		
	36.8	3.9E+02	<1	Inc	<1	Inc	<1		
CF (UFC/100 mL)	9.2	7.2E+02	<1	2.4E+02	<1	2.3E+03	<1		
	18.4	6.0E+02	<1	3.8E+02	<1	2.5E+03	<1		
	36.8	5.0E+01	<1	Inc	<1	7.8E+02	<1		
<i>Vibrio cholerae</i> (UFC/100 mL)	9.2	3.3E+02	<1	1.3E+03	<1	1.3E+02	<1		
	18.4	9.1E+01	<1	5.4E+02	<1	3.0E+02	<1		
	36.8	<1	<1	7.5E+01	<1	4.9E+02	<1		
<i>Salmonella typhi</i> (UFC/100 mL)	9.2	2.9E+02	<1	2.1E+02	<1	2.1E+03	<1		
	18.4	5.2E+02	<1	8.3E+03	<1	Inc	1.0E+01		
	36.8	2.0E+01	<1	Inc	<1	Inc	1.0E+01		

CT=coliformes totales, CF=coliformes fecales

En las condiciones de la tabla 2, pH 3 y flujo de ozono de 36.8 mg O₃/L, no se detecta crecimiento *Vibrio cholerae* a tiempo cero, por lo tanto se reportó como <1 UFC. Además, las cantidades iniciales de las bacterias estudiadas a las diferentes condiciones de pH, mostraron que las encontradas a pH 3 son menores con respecto a las encontradas a pH 5 y 7. Esto puede deberse a la disminución del pH en la muestra preparada para la desinfección, pues las bacterias en estudio son sensibles a los cambios de pH y el ajuste de esta condición antes de comenzar el proceso de desinfección, pudo provocar una baja en la carga microbiana.

7.1.2. Resultados bacteriológicos a pH 5

Para esta condición de pH, también se aplicaron las tres diferentes concentraciones de ozono.

Se observa que Vibrio cholerae mantiene la tendencia de crecimiento bajo mostrada en las muestras iniciales de todos los experimentos.

Para el caso particular de la concentración de 36.8 mg O₃/L los conteos iniciales fueron reportados como incontables para todas las bacterias excepto para *Vibrio cholerae* (75 UFC/100 mL). Posterior a los 15 minutos de aplicación de ozono, no se detecta crecimiento de ninguno de los microorganismos, (ver tabla 3). Esto nos habla de la eficacia de la ozonización como método de desinfección, ya que, a pesar de que las muestras contengan cantidades elevadas de microorganismos al inicio, el ozono es capaz de destruirlos por su efecto oxidante hasta un punto en el cual, ya no son detectables.

En los resultados de la desinfección de la tabla 3 con una concentración de 18.4 mg O₃/L se observó que después de 15 minutos de aplicación de ozono, tampoco hubo crecimiento detectable de ningún microorganismo con excepción de los coliformes totales (160 UFC/100 mL). Después de 60 minutos de ozonización no se detectó crecimiento de ningún tipo de bacterias (tabla 3).

Los resultados para la concentración de 9.2 mg O₃/L no tuvieron una cantidad inicial tan elevada de microorganismos como en los demás casos a pH 5, debido posiblemente a lo heterogéneo de las descargas de agua residual. Con la concentración más pequeña en esta condición de pH, también se logra inhibir el crecimiento de los mi-

croorganismos, pues no se detecta ningún crecimiento a los 15 ni a los 60 minutos del proceso de desinfección (ver tablas 2 y 3).

Según los resultados mostrados previamente, las tres concentraciones de ozono a pH 5 resultan ser efectivas en la remoción de estos microorganismos con una aplicación mínima de 15 minutos.

7.1.3. Resultados bacteriológicos a pH 7

Estas son las condiciones normales en las que trabaja una planta de tratamiento de agua, por lo que también se estudió el efecto del ozono sin modificar el pH de la muestra. En estos casos se tienen resultados que varían con respecto a los otros dos casos de pH. Las muestras a las que se aplicó la concentración de 36.8 mg de O₃/L, contenían una carga microbiana inicial muy alta y, aunque en casi todos los casos se inhibe el crecimiento de los microorganismos a los 15 minutos de la aplicación de ozono, en el caso de *Salmonella typhi*, se encontró 1 UFC/100 mL a este tiempo (ver tabla 3). Esto nos muestra, a pesar del pH alto, la alta eficacia del ozono para eliminar bacterias a pesar de no utilizar el pH óptimo para la reactividad del mismo.

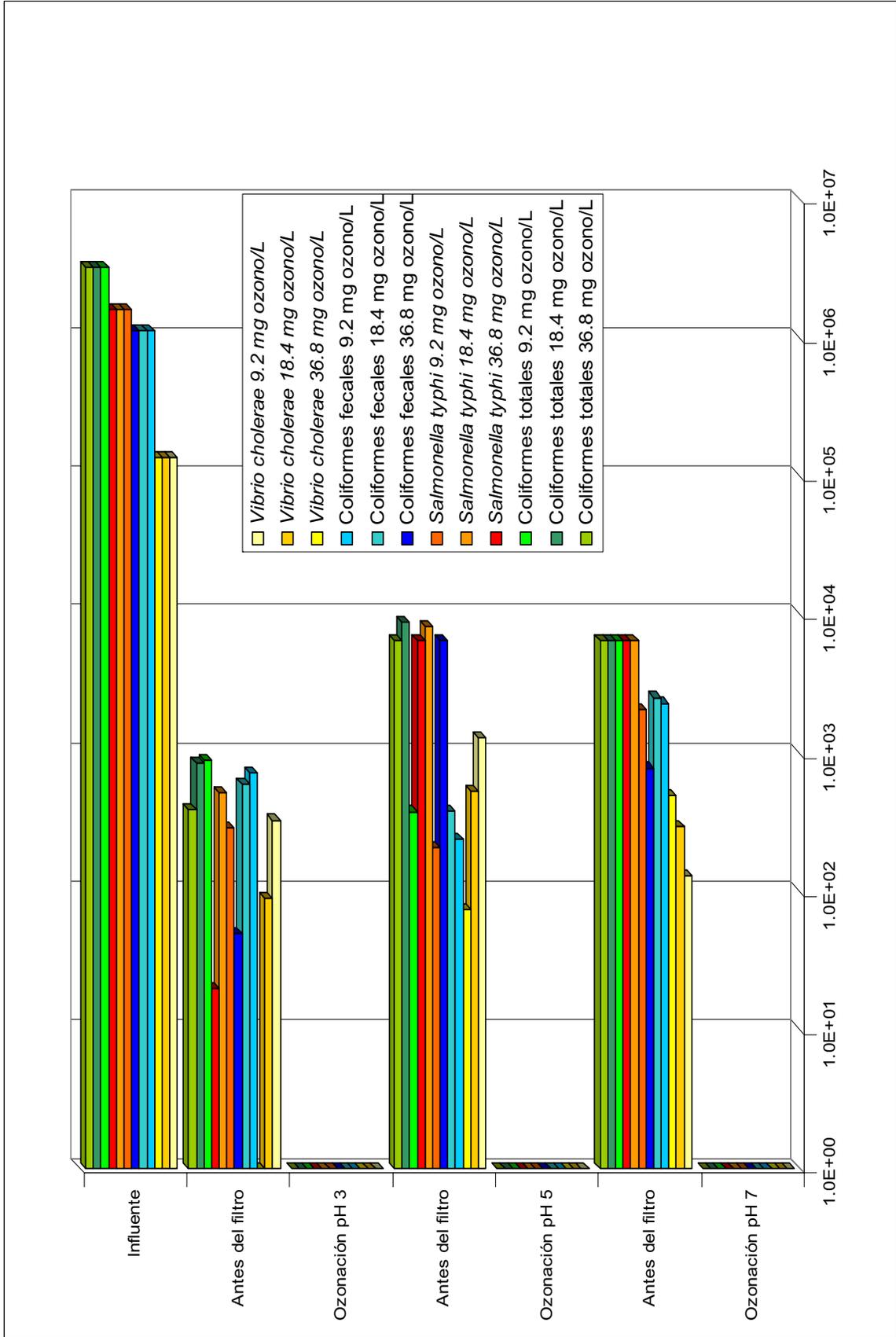
Con la aplicación de la concentración de 18.4 mg de O₃/L, no se observaron los mejores resultados, pues al inicio se tiene una cuenta microbiana alta que se ve reducida pero no eliminada por completo a los 15 min de contacto con el ozono, (ver tabla 3). Se encontró desarrollo de coliformes totales y *Salmonella typhi* a los 15 minutos en 160 UFC y 1 UFC respectivamente. El hecho de que coliformes totales y *Salmonella typhi* tuvieron las cuentas más altas al inicio de esta etapa podría explicar su resistencia hasta este punto. Además, el efecto oxidante del ozono se ve disminuido a pH neutro.

Cuando se usó el flujo de 9.2 mg de O₃/L, se encontró una disminución de microorganismos casi total, ya que después de los primeros 15 minutos de aplicación de ozono, se tuvieron 50 UFC de coliformes totales, no así del resto de los microorganismos evaluados que no tuvieron crecimiento. En este caso, también fueron los coliformes totales los microorganismos que se encontraron en mayor cantidad al inicio de la desinfección, hecho que también explicaría su presencia a los 15 minutos.

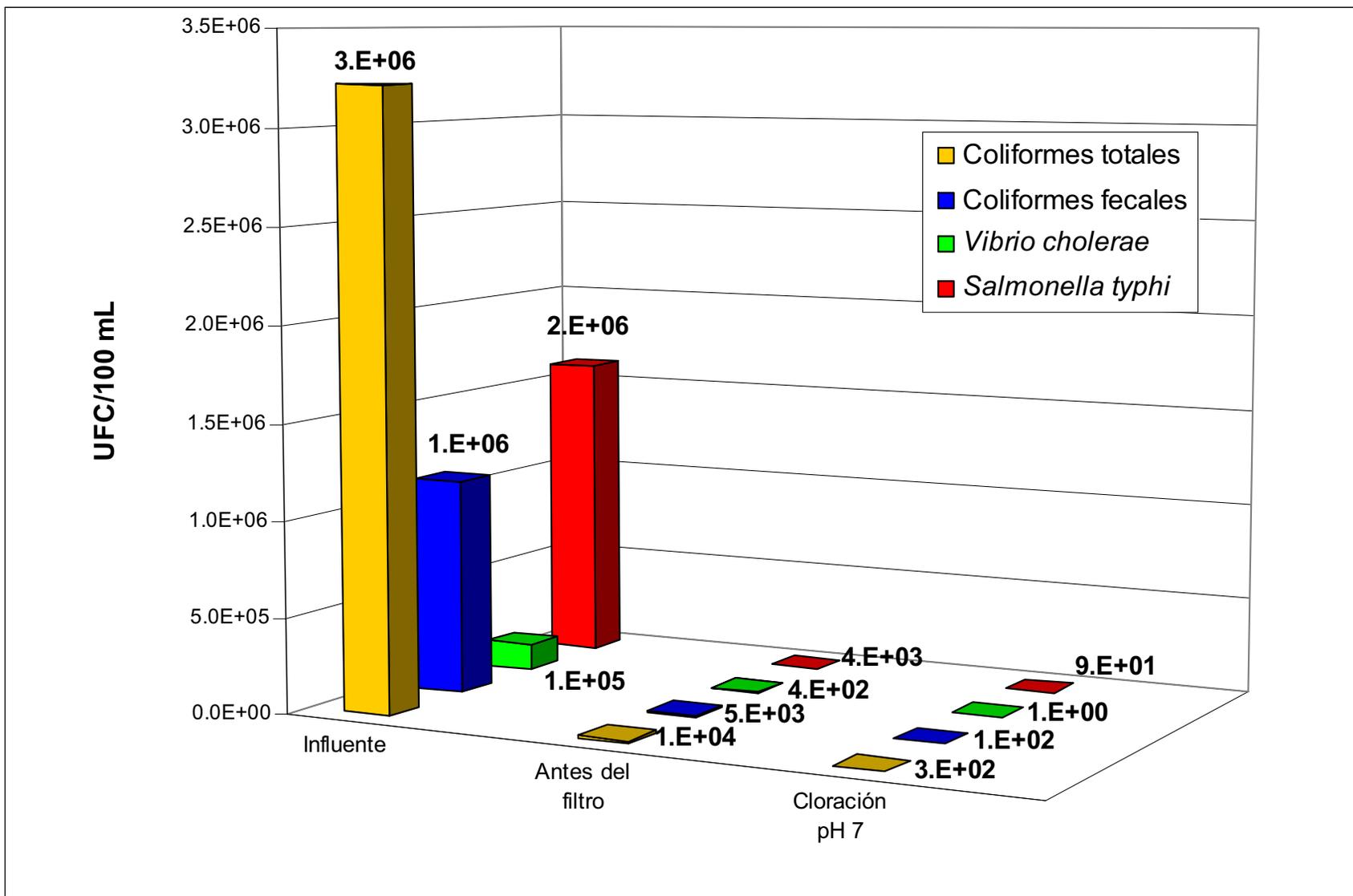
A los 60 minutos de ozonización, no se encontró crecimiento de ninguna de las bacterias analizadas. A pesar de verse disminuido el efecto del ozono a pH neutro, el resultado es muy bueno y nos muestra su capacidad como desinfectante aún en condiciones no tan favorables. Esto es importante para el proceso de tratamiento de agua residual pues sería complicado y aumentaría el costo ajustar al pH óptimo de acción del ozono la gran cantidad de agua que se requiere tratar.

7.1.4. Resultados bacteriológicos comparativos de ozonización a diferentes condiciones de pH.

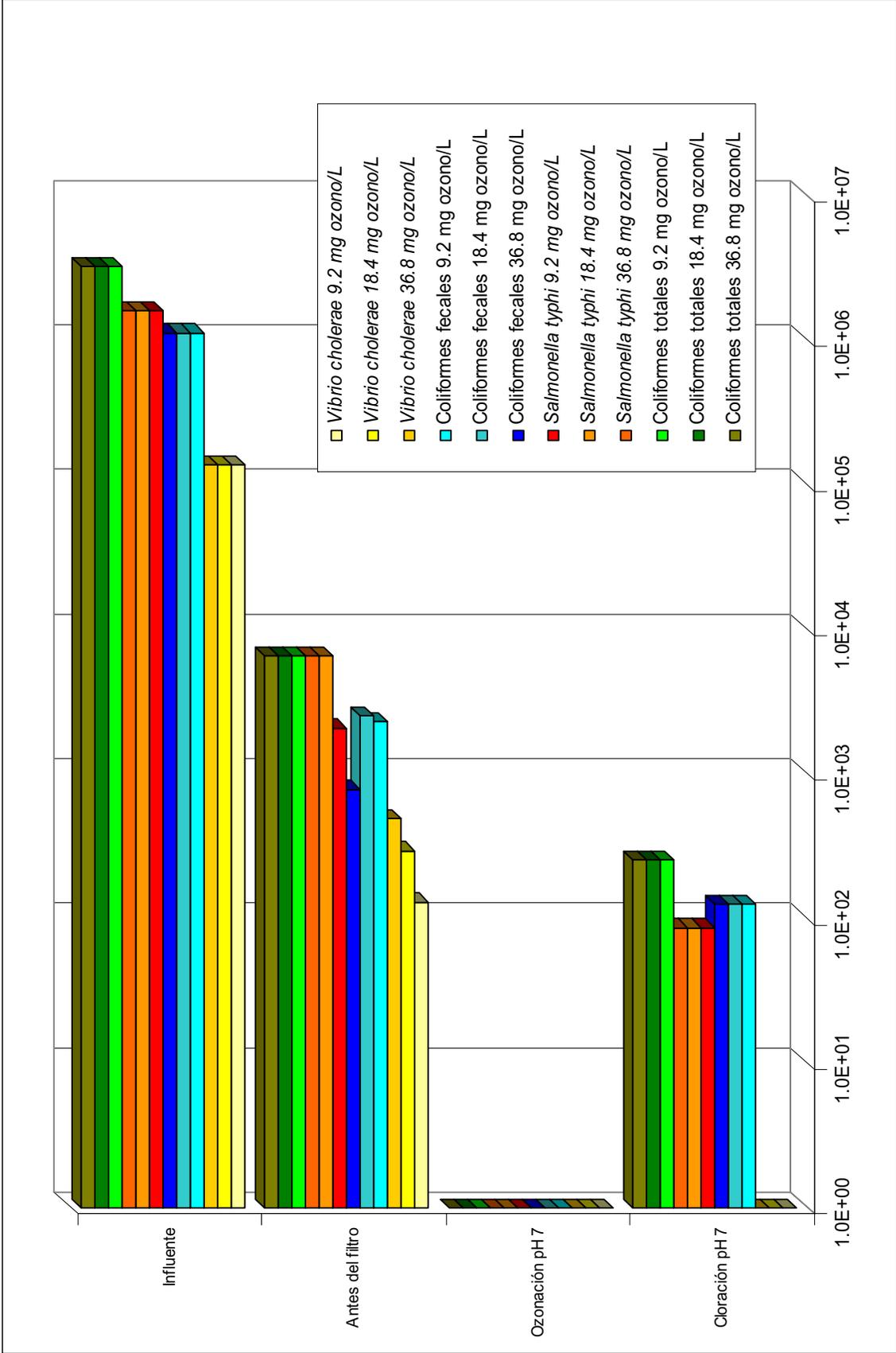
Se elaboró un gráfico que muestra la disminución de la carga microbiana debida a la aplicación de ozono (gráfica 1). Este gráfico nos permite ver que hay una disminución de todos los microorganismos de dos a tres órdenes de magnitud del punto influente al punto antes de la filtración. Esta disminución se atribuye al paso del agua por lodos activados y al proceso de sedimentación que se lleva a cabo entre estos dos puntos en la planta de tratamientos. Se observa también que el proceso de ozonización disminuye la carga microbiana hasta hacerla no detectable en las tres diferentes condiciones de pH. Este hallazgo es importante ya que se sabe que la acción del ozono es más eficiente a un pH 3 debido a que en estas condiciones se favorece el estado singlete del ozono, el cual es el responsable de realizar la oxidación (Rojas, 2004). El hecho de que los



Gráfica 1. Disminución de la carga microbiana durante las diferentes etapas del tratamiento de agua residual utilizando diferentes condiciones de desinfección.



Gráfica 2. Variación de la carga microbiana durante el proceso de tratamiento de agua residual en una planta de tratamiento Cerro de la Estrella



Gráfica 3. Comparación de la desinfección con ozono y cloro al final de la cadena del tratamiento de agua residual.

resultados de desinfección a pH 7 sean muy parecidos a las otras condiciones de pH, representa una ventaja económica y operativa.

7.1.5. Resultados bacteriológicos de las muestras de la planta de tratamientos de agua.

Con respecto al proceso tradicional de tratamiento de agua de la planta de Cerro de la Estrella, se encontró una disminución de los microorganismos que se estudiaron en este trabajo, al utilizar cloro como desinfectante, pero no una completa eliminación o inhibición de su crecimiento. La disminución de la carga microbiana a través de todo el proceso se lleva a cabo no solo por la utilización de cloro, sino por lodos activados y sedimentaciones. Así para el punto en donde se adiciona cloro, la carga microbiana está muy disminuida como se ve en la gráfica 2, pero a pesar de esto, todavía hay una cantidad considerable de microorganismos que resistieron la cloración. El uso de ozono en lugar de cloro provocaría la completa eliminación de todos los microorganismos viables, incluyendo patógenos como *Vibrio cholerae* y *Salmonella typhi*, por lo que resulta un método importante a considerar para terminar el tratamiento de agua residual y provocar que no se detecte la presencia de microorganismos (gráfica 3).

7.2. Amibas

En esta prueba se identificaron tres géneros de amibas de vida libre en las muestras de agua residual en las diferentes etapas del proceso consideradas en el estudio de la planta de tratamientos de aguas municipales: el influente, antes de la filtración y el efluente clorado.

Los géneros de amibas de vida libre fueron *Vanella sp* (ver figura 3a y 3b), *Mayorella sp* (ver figura 4a y 4b) y *Achantamoeba sp* (ver figura 5a y 5b).

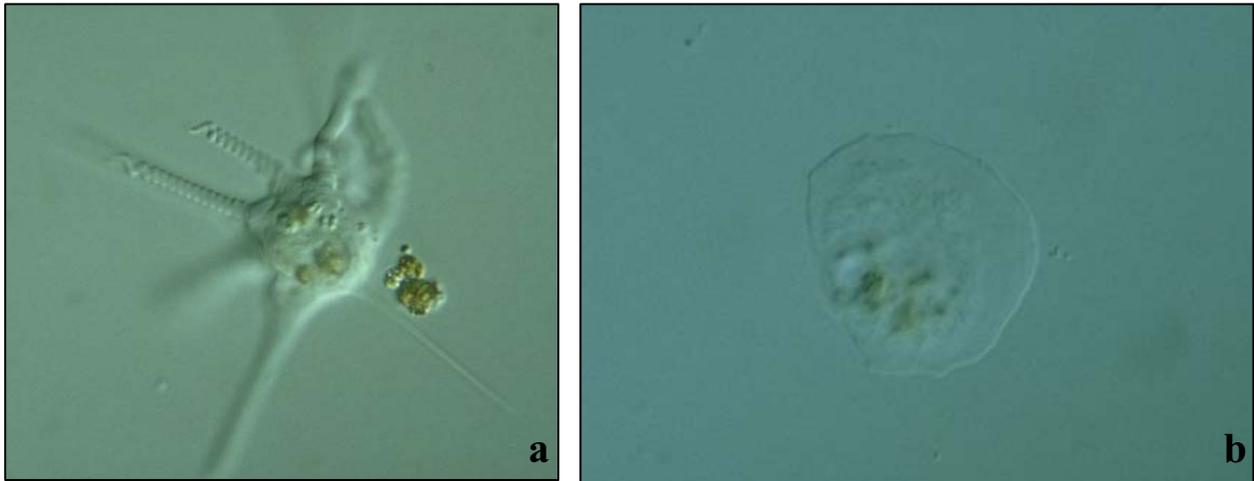


Figura 3. *Vannella sp* a) forma flotante b) trofozoito

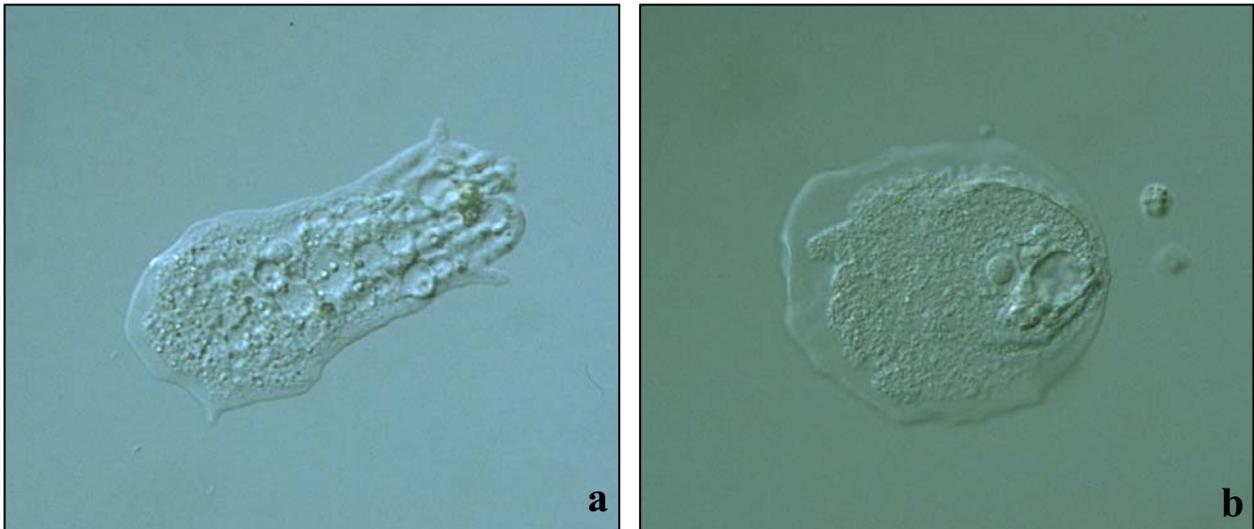


Figura 4. *Mayorella sp* a) forma flotante b) trofozoito

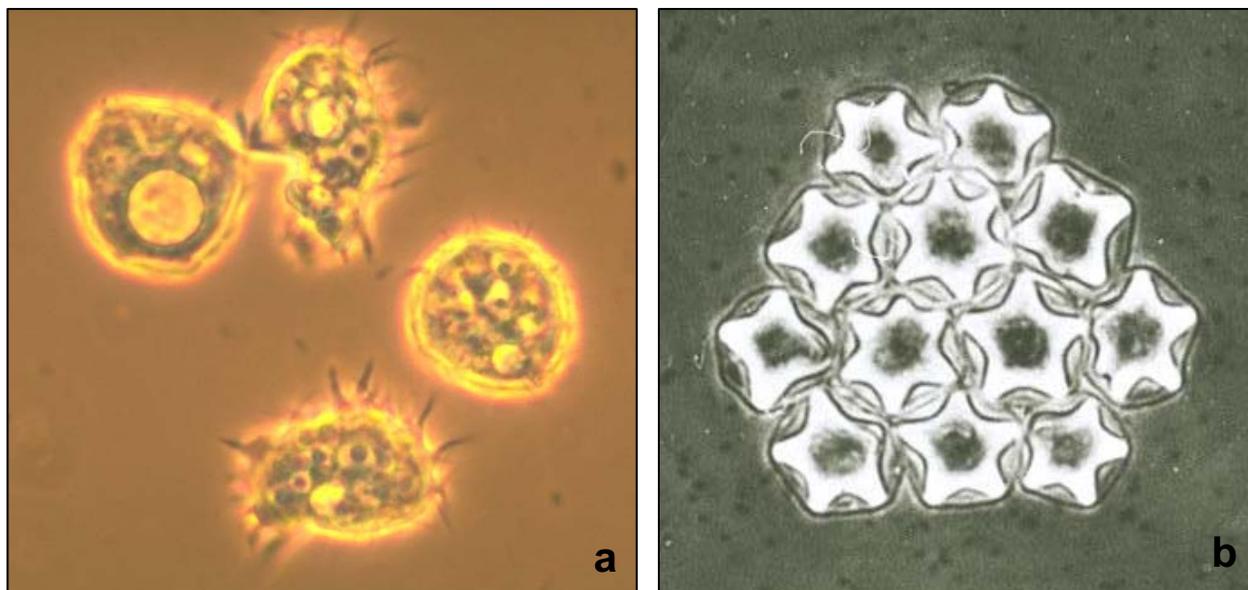


Figura 5. *Acanthamoeba sp* a) trofozoitos, b) quistes

Cabe destacar que en el efluente clorado solo se encontraron quistes del género *Acanthamoeba sp*, siendo estos la fase más peligrosa por su capacidad de resistir. En el influente y en la etapa anterior a la filtración se identificaron los tres géneros: *Vannella sp* en formas flotantes y locomotivas, *Mayorella sp* sólo en formas flotantes y *Acanthamoeba sp* en quistes.

En las muestras que se sometieron a la acción desinfectante del ozono, no se encontraron, en las dos veces que se repitió la identificación de amibas de vida libre, ningún tipo de estos protozoarios en las formas de trofozoitos, formas flotantes o quistes, desde la primera muestra que se tomó a los 15 min de acción del ozono. Debido a ello, suponemos que el ozono es mas eficiente en la destrucción de amibas que el cloro. Por lo que sería conveniente realizar un estudio más completo para comprobarlo.

7.3. Huevos de Helmintos

Los huevos de helmintos no son eliminados totalmente en un proceso normal de tratamiento de agua residual utilizando cloro como desinfectante. La cantidad de estas formas se reduce a la mitad de la encontrada en el influente (ver tabla 5). Este hecho evidencia la baja efectividad del proceso de desinfección con cloro contra estos agentes patógenos altamente peligrosos.

Cuando se utiliza ozono en lugar de cloro, como método de desinfección, la disminución de estos agentes patógenos es de casi el 95% con respecto al influente. Esto es, el influente en promedio contiene 19 huevos de helminto/L, y después de la aplicación de ozono a diferentes flujos y condiciones de pH se encuentran entre 0- 3 huevos de helmintos/L promedio después de una hora de ozonización. Esto nos muestra la eficacia del ozono contra estos agentes patógenos que son difíciles de eliminar mediante el uso de otros métodos de desinfección.

Tabla 4. Disminución de huevos de helmintos al aplicar ozono en agua residual

Disminución de huevos de helmintos							
Parámetros	Influente	Antes filtro	Efluente clorado	Aplicación de O ₃			
				Dosis (mg O ₃ /L)	Tiempo (min)		
					60	60	60
				pH 3	pH 5	pH 7	
Huevos de helmintos H/L	19	10	9	9.2	2	3	0
				18.4	1	1	3
				36.8	2	1	1

7.4. Resultados Físicoquímicos.

Se midieron seis parámetros físicoquímicos para determinar la calidad del agua residual al inicio, durante y al final del proceso de tratamiento de agua en donde se usa cloro como desinfectante y alternativamente ozono a nivel laboratorio. Los seis parámetros fueron Sólidos Disueltos Totales (SDT), Turbiedad (T), Demanda Química de

Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), pH y alcalinidad representada como carbonato de calcio. Estos parámetros son indicadores de la calidad del agua tratada. En todos los puntos de muestreo y de la desinfección con ozono a nivel de laboratorio, se determinaron estos seis parámetros, con excepción del efluente clorado de la planta de tratamientos, al cual no se le midió DBO₅ y, las desinfecciones con ozono a pH 3, a las cuales no se les determinó alcalinidad por presentar un pH ácido.

En la tabla 5 se muestran los resultados de estos parámetros y como se comportaron durante la desinfección bajo todas las condiciones de pH y flujos de ozono.

Tabla 5. Resultados fisicoquímicos de la desinfección con ozono

Resultados Fisicoquímicos												
Parámetros				Aplicación de O ₃								
	Influyente	Antes del filtro	Efluente clorado	Dosis (mg O ₃ /L)	Tiempo (min)							
					0		60		0		60	
					pH 3		pH 5		pH 7			
SDT (mg/L)	3.8E+02	3.4E+02	3.4E+02	9.2	6.0E+02	6.1E+02	3.9E+02	3.9E+02	3.5E+02	3.5E+02		
				18.4	6.8E+02	6.7E+02	3.5E+02	3.6E+02	3.5E+02	3.5E+02		
				36.8	5.2E+02	5.2E+02	3.8E+02	3.8E+02	3.1E+02	3.2E+02		
Turbiedad (NTU)	1.2E+02	2.9E+00	4.1E+00	9.2	3.7E+00	1.1E+00	2.4E+00	1.5E+00	3.4E+00	1.5E+00		
				18.4	3.5E+00	9.7E-01	8.4E+00	2.7E+00	2.2E+00	1.0E+00		
				36.8	2.6E+00	7.8E-01	3.1E+00	2.1E+00	2.5E+00	1.1E+00		
DQO (mg/L)	4.4E+02	8.1E+01	1.0E+02	9.2	8.3E+01	7.0E+01	6.2E+01	6.6E+01	9.6E+01	5.6E+01		
				18.4	7.8E+01	7.1E+01	1.1E+02	1.2E+02	4.7E+01	2.0E+01		
				36.8	5.8E+01	3.4E+01	5.8E+01	6.5E+01	4.6E+01	3.1E+01		
DBO ₅ (mg O ₂ /L)	4.4E+01	4.0E+00	/	9.2	2.0E+00	6.7E-01	2.8E+00	9.0E-01	4.9E+00	3.3E+00		
				18.4	2.2E+00	5.7E-01	4.1E+00	1.9E+00	4.4E+00	3.2E+00		
				36.8	2.3E+00	1.3E+00	4.2E+00	2.8E+00	5.1E+00	4.0E+00		
pH	7.2E+00	7.2E+00	7.1E+00	9.2	3.0	3.0	5.0	5.0	7.5	7.4		
				18.4	3.0	3.0	5.0	5.0	7.6	7.6		
				36.8	3.0	3.0	5.0	5.0	7.5	7.6		
Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	2.3E+02	1.3E+02	1.3E+02	9.2	nd	nd	8.0E+00	3.5E+00	1.3E+02	1.2E+02		
				18.4	nd	nd	6.5E+00	5.0E+00	1.4E+02	1.4E+02		
				36.8	nd	nd	1.5E+01	5.0E+00	1.3E+02	1.2E+02		
Ozono disuelto (mg/L)				9.2	4.1E-02	3.0E+00	1.6E-02	3.7E+00	2.0E-02	3.2E+00		
				18.4	4.3E-02	2.7E+00	6.7E-02	2.8E+00	5.0E-02	2.1E+00		
				36.8	4.0E-02	2.2E+00	2.4E-02	4.6E+00	3.0E-02	2.0E+00		

En todas las condiciones de ozonización que se manejaron, estos parámetros tuvieron una disminución importante, con excepción de los SDT que se mantuvieron prácticamente constantes y la DQO que también se mantuvo constante pero solo a pH

5 (ver tabla 5). La disminución de estos parámetros también nos deja ver la ventaja del uso del ozono como desinfectante, pues no solo mejora la calidad del agua en términos microbiológicos, sino también mejora la calidad fisicoquímica del agua tratada.

.7.4.1. Sólidos disueltos totales (SDT)

Durante el proceso normal de la planta de tratamientos de agua residual, los SDT presentan una ligera disminución entre el influente y justo antes de la filtración pero se mantienen constantes después de la cloración, la disminución se debe a las etapas primarias del proceso aunque no es una disminución grande, pues solo es cercano al 10% (ver tabla 6) y, en cambio, la adición de cloro no afecta este parámetro, posiblemente debido a la baja solubilidad del mismo, y que los subproductos que podría generar este, no generan diferencias en los SDT (gráfica 4). Para el caso especial de pH 3, los SDT aumentaron cuando se ajustó el pH para el proceso de ozonización debido a la adición de ácido clorhídrico concentrado y al posible aumento en la solubilidad de compuestos a pH ácido y que eran poco solubles al pH normal del proceso (considerando que la medición de SDT es por conductimetría). Durante la desinfección con ozono los SDT se mantuvieron constantes a las tres diferentes concentraciones de ozono que se manejaron, esto indica que el ozono tampoco provocó la formación de subproductos que variarían significativamente el contenido de sólidos disueltos (gráfica 5). Para el caso a pH 5, también se tuvo un ligero aumento de SDT al acidificar, aunque no tan elevado como a pH 3 (aproximadamente 8% contra casi el 100% a pH 3 respecto al punto antes del filtro) y, durante la ozonización también se mantuvieron constantes a los tres diferentes flujos, como en el caso anterior (gráfica 6). Cuando no se ajustó el pH, el contenido de SDT se mantuvo siempre constante tanto al inicio como al final de la ozonización a las tres diferentes concentraciones, por lo que se confirmó que ni la aplicación del cloro ni la del ozono provocan un cambio significativo en el contenido de estos compuestos (gráficas 4 y 7).

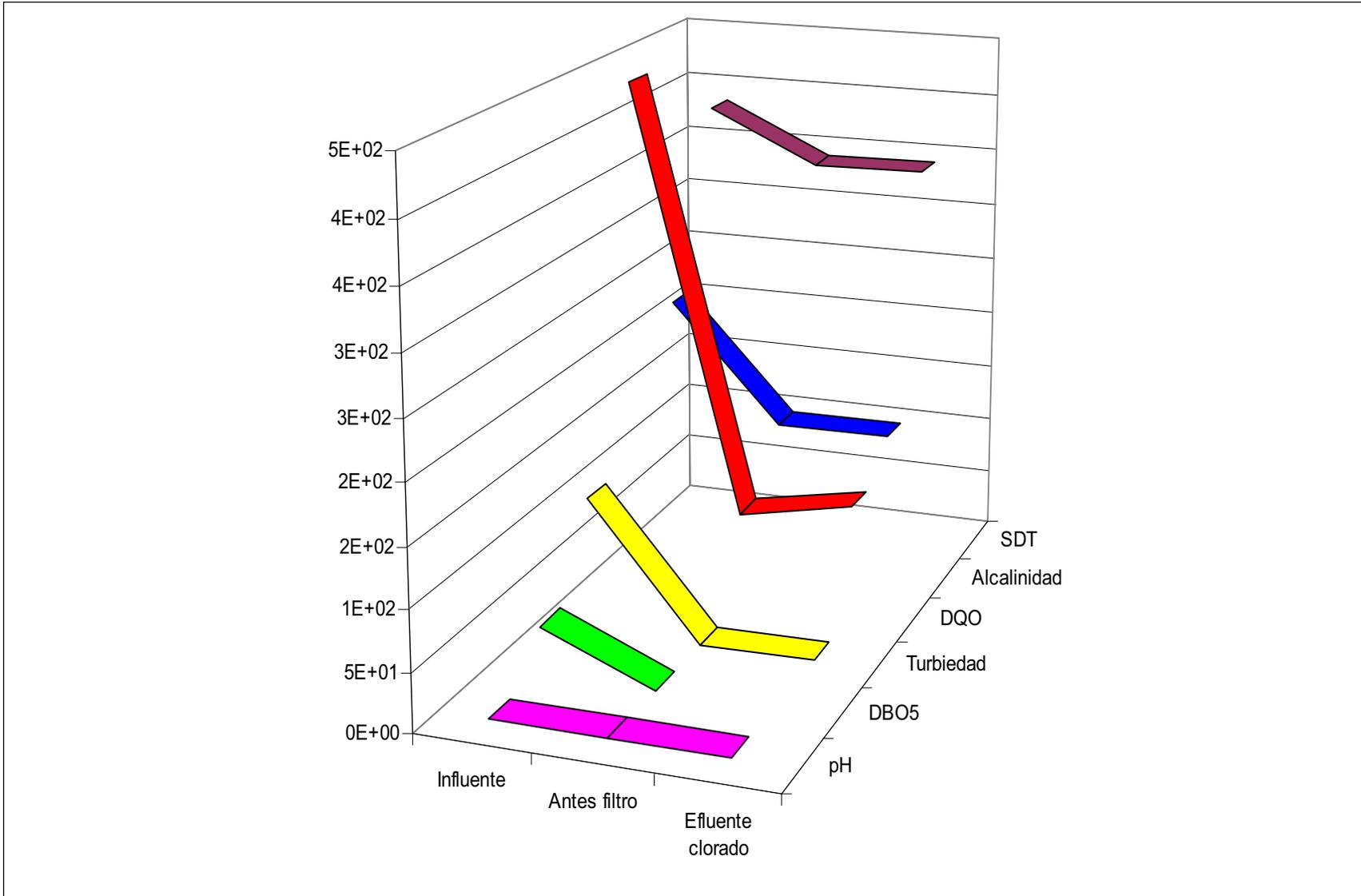
7.4.2. Turbiedad

La turbiedad disminuyó considerablemente durante los procesos primarios (gráfica 4), además también aumento ligeramente al adicionar el ácido para ajustar el

Tabla 6. Cambio de los parámetros fisicoquímicos de una etapa a la siguiente, expresada en porcentaje, donde el signo negativo indica una disminución.

Porcentaje de disminución y aumento de los parámetros fisicoquímicos						
Parámetros	Antes del filtro %	Efluente clorado %	Dosis (mg O ₃ /L)	Aplicación de O ₃		
				%		
				pH 3	pH 5	pH 7
SDT	-10.53	0.00	9.20	1.67	0.00	0.00
			18.40	-1.47	2.9	0.00
			36.80	0.00	0.00	3.23
Turbiedad	-97.58	41.38	9.20	-70.27	-37.50	-55.88
			18.40	-72.29	-67.86	-54.55
			36.80	-70.00	-32.26	-56.00
DQO	-81.59	23.46	9.20	-15.66	6.45	-41.67
			18.40	-8.97	9.09	-57.45
			36.80	-41.38	12.07	-32.61
DBO ₅	-90.91	-	9.20	-66.50	-67.86	-32.65
			18.40	-74.09	-53.66	-27.27
			36.80	-43.48	-33.33	-21.57
pH	0.00	-1.39	9.20	0.00	0.00	-1.33
			18.40	0.00	0.00	0.00
			36.80	0.00	0.00	1.33
Alcalinidad	-43.48	0.00	9.20	-	-56.25	-7.69
			18.40	-	-23.08	0.00
			36.80	-	-66.67	-7.69

pH a 3, posiblemente debido a una precipitación de algunos compuestos a este pH. Pero durante la desinfección con ozono, la turbiedad disminuyó entre un 70-72% con respecto al punto inicial a las tres diferentes concentraciones de ozono (ver tabla 6); para las corridas a pH 5 también se observó una disminución considerable para los tres diferentes flujos de ozono (32-68%) y a pH 7 la disminución fue a la mitad (54-56%) en los tres casos (ver tabla 6). Esta disminución en las tres condiciones de pH nos muestra que el ozono también es efectivo como agente oxidante para la clarificación de aguas tratadas logrando una mejora importante en la turbiedad, incluso al pH al que comúnmente se realiza el proceso de tratamiento de agua residual (gráficas 5, 6 y 7).



Gráfica 4. Comportamiento de los parámetros fisicoquímicos medidos durante el proceso normal de tratamiento de agua residual utilizando cloro como desinfectante.

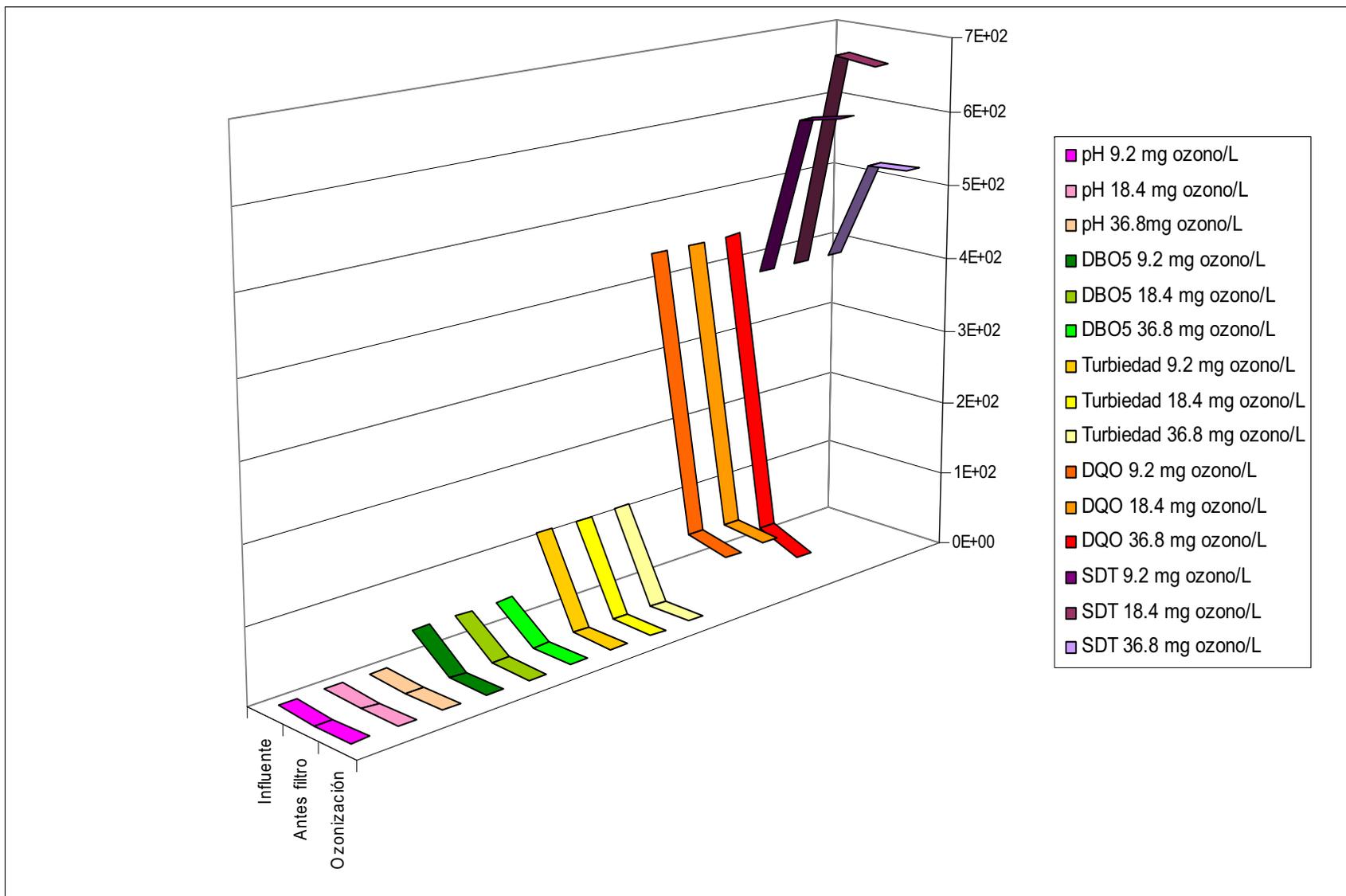
7.4.3. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La DQO disminuye importantemente durante las etapas primarias del proceso de tratamiento de agua residual (cerca del 82%), pero con la cloración aumenta ligeramente, aproximadamente 23% más que en el punto anterior al filtro (ver tabla 6). En la gráfica 4 se observa el gran descenso debido al proceso primario y el ligero aumento por la cloración. El hecho de que el cloro eleve la DQO indica que los compuestos formados por la cloración o el mismo cloro se pueden oxidar más, provocando que se consuma más agente oxidante (dicromato de potasio).

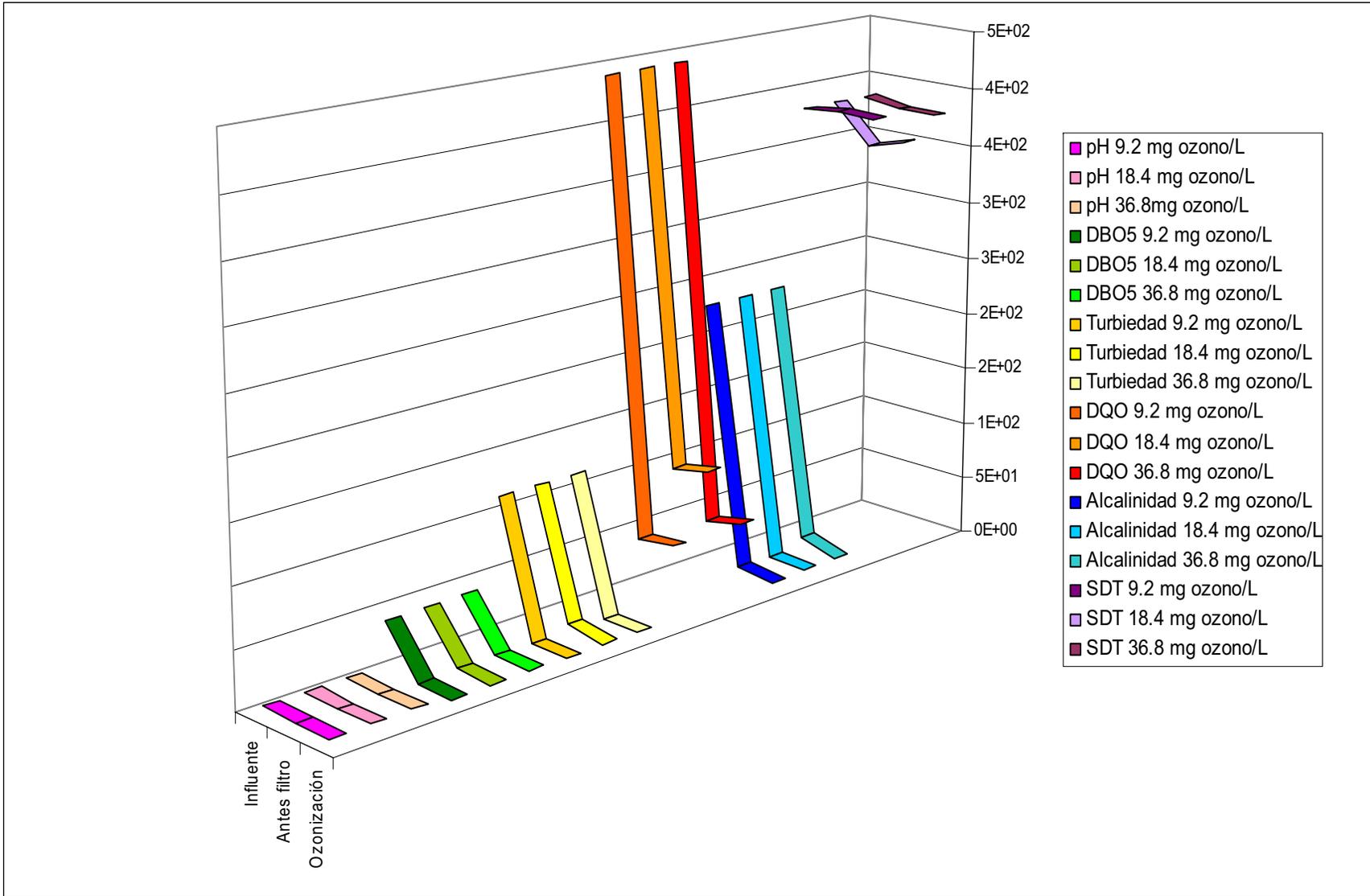
La ozonización a pH 3 provocó que la DQO disminuyera en todos los casos sin importar el flujo empleado, aunque la disminución fue variada, pues fue entre 9 y 41% con respecto al tiempo cero. A pH 5 se observa que los valores se mantienen prácticamente constantes al término de la ozonización según se muestra en la gráfica 6. A pH 7 la disminución debida a la desinfección con ozono es de entre 33 y 57% con respecto al tiempo cero.

La disminución de la DQO al término de la ozonización se debe a que el ozono es un agente fuertemente oxidante, por lo tanto, al someter la muestra a ozonización muchos compuestos presentes en esta son oxidados, disminuyendo con esto la cantidad de compuestos oxidables y con ello la DQO.

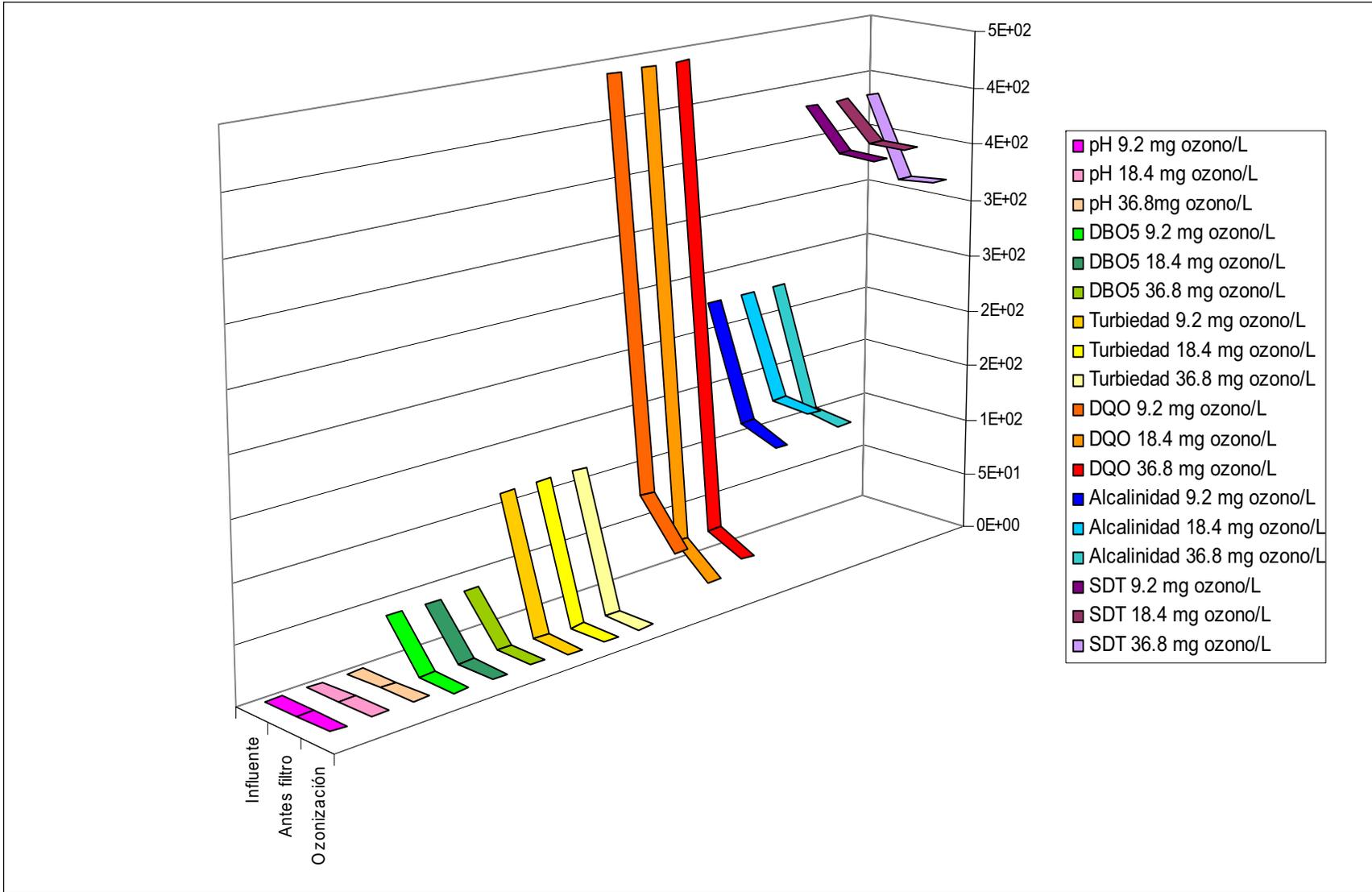
El hecho de que la variación de resultados sea tan grande entre experimentos con el mismo pH puede deberse a la heterogeneidad o variación del contenido de compuestos oxidables en las descargas de agua residual.



Gráfica 5. Comportamiento de los parámetros fisicoquímicos medidos durante el proceso de tratamiento de agua residual utilizando ozono como desinfectante a nivel laboratorio y aplicándolo por una hora y ajuste a pH 3.



Gráfica 6. Comportamiento de los parámetros fisicoquímicos medidos durante el proceso de tratamiento de agua residual utilizando ozono como desinfectante a nivel laboratorio y aplicándolo por una hora y ajuste a pH 5.



Gráfica 7. Comportamiento de los parámetros fisicoquímicos medidos durante el proceso de tratamiento de agua residual utilizando ozono como desinfectante a nivel laboratorio y aplicándolo por una hora sin ajuste de pH.

7.4.4. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)

La DBO₅ también disminuye considerablemente durante las etapas primarias del proceso de tratamiento de agua residual, reduciéndose en un 91% (ver tabla 6).

El ajuste de pH a un valor de 3 provocó una disminución de la DBO₅ al tiempo cero debido a que el decremento brusco de pH provoca una disminución en la viabilidad de muchos microorganismos. Posteriormente la ozonización provocó una disminución de la DBO₅ de entre 40-74% (ver tablas 5 y 6).

La disminución de este parámetro al aplicar la ozonización a las muestras se debe a que, como ya se explicó en el apartado de resultados bacteriológicos, el ozono es un agente oxidante fuerte capaz de destruir una gran cantidad de microorganismos como *Salmonella typhi*, coliformes fecales y *Vibrio cholerae* entre otros.

La DBO₅ a tiempo cero cuando el pH se ajustó a 5, presentó una disminución menos drástica que la observada a pH 3 (ver tabla 5). Cuando las muestras se ozonizaron la disminución de la DBO₅ se ubicó en un intervalo de 33-68%.

La disminución de la DBO₅ debida al cambio del pH se sustenta en la justificación mencionada anteriormente de la baja resistencia de los microorganismos a pH bajos.

A pesar de que los porcentajes de disminución de la DBO₅ posteriores a la ozonización a pH 5 (gráfica 6) con respecto a los obtenidos a pH 3 son ligeramente menores, los valores finales no son muy diferentes entre sí.

Para el caso de pH 7 (sin ajuste de pH) la DBO₅ a tiempo cero, al contrario de los casos anteriores, aumentó entre un 5-20% con respecto a punto antes del filtro (ver tabla 5). Esto debido a que la ozonización se realizaba entre uno y dos días después de la recolección y medición de todos los parámetros de los tres puntos de muestreo. Esta diferencia de tiempo y el hecho de mantener las condiciones de pH en un valor de 7 favorecen el desarrollo de los microorganismos presentes en la muestra.

La disminución de la DBO₅ debida a la ozonización a pH 7 presentó valores en un intervalo de 20-33% (ver tabla 6 y gráfico 7), menores a los observados a pH 3 y 5. A pesar de que los valores de la DBO₅ obtenidos después de la ozonización a pH 7 resultan convenientes y aceptados según la norma, este resultado muestra que el pH es un factor importante en el proceso de ozonización, debido a que se ha comprobado que a pH bajo el ozono es más efectivo por ser un mejor oxidante.

Cabe resaltar que las disminuciones menos eficientes en este parámetro fueron las obtenidas al usar la mayor concentración de ozono (36.8 mg O₃/L) en los 3 valores de pH probados (tabla 5). Esto se explica por la acción del ozono sobre la materia orgánica recalcitrante que la transforma en materia orgánica biodegradable provocando un efecto disminuido en el valor de la DBO₅ al esperado, lo cual no es necesariamente malo, pues existen estudios donde se busca aumentar el valor de la materia orgánica biodegradable (Ghaheri, 2005; Bijan, 2004; Suh, 2004; Cline, 1996).

7.4.5. pH

Durante el proceso normal del tratamiento de agua residual, el pH es un parámetro que permanece inalterado. La aplicación de cloro y ozono a la muestra tampoco afectó el pH significativamente, incluso en los casos en que el pH se ajustó a valores de 3 y 5 (ver grafica 4 y tabla 5).

7.4.6. Alcalinidad

Las etapas primarias del proceso normal de tratamiento de agua residual disminuyen casi en un 50% la alcalinidad, sin embargo la cloración no tiene efecto alguno sobre este parámetro.

El ajuste de pH previo a la aplicación del ozono obviamente provocó una disminución de la alcalinidad, por lo que a pH 3 no se determinó este parámetro al tiempo cero ni después de la ozonización. A pH 5 el valor obtenido fue muy bajo al tiempo cero, y después de la ozonización la disminución de este parámetro fue de entre 1.5-10 mg expresados como carbonato de calcio por litro (CaCO_3/L) consumido en la medición (ver tabla 3 y gráfica 6). A pH 7 el valor inicial de alcalinidad es muy grande en comparación con el obtenido a pH 5. La disminución de la alcalinidad fue aproximadamente 10 mg expresados como carbonato de calcio por litro (CaCO_3/L) consumido en la medición. Estos resultados muestran que al término de la ozonización, la disminución de la alcalinidad es parecida sin importar el valor inicial.

7.4.7. Ozono disuelto

Se determinó la cantidad de ozono disuelto en las muestras a tiempo cero para comprobar que no existía en las muestras ningún compuesto o materia capaz de interferir con la medición de ozono. Como se observa en la tabla 5, los valores de ozono disuelto a este tiempo fueron prácticamente cero.

La cantidad de ozono disuelto posterior al proceso de ozonización fue muy similar al dato de solubilidad del ozono en agua a 20° C de 3 ppm para todos los casos. Este resultado indica que la concentración de ozono residual fue siempre la máxima posible.

8. Conclusiones

La utilización de ozono como desinfectante alternativo al cloro en una planta de tratamiento de aguas residuales, tiene ventajas importantes a nivel microbiológico y fisicoquímico.

- El ozono es capaz de inhibir el crecimiento de microorganismos como son coliformes totales y fecales, *Vibrio cholerae*, *Salmonella typhi* y amibas de los géneros *Vannella sp*, *Mayorella sp* y *Acanthamoeba sp*.
- El ozono ayuda a disminuir parámetros fisicoquímicos importantes en el tratamiento de aguas como turbiedad, demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno y alcalinidad, dando lugar a aguas tratadas de mayor calidad para su reuso.
- Entre las diferentes condiciones que se utilizaron, las de pH 3 y concentración en el flujo de gas de 9.2 mg O₃/L con 15 minutos de contacto son las mejores pues disminuye la cantidad de microorganismos y los parámetros fisicoquímicos y se obtiene agua tratada de mejor calidad; además, no se requiere una alta producción de ozono para obtener la calidad de agua de reuso y es en condiciones ácidas, cuando se favorece la actividad oxidante del ozono. Sin embargo, la norma oficial mexicana NOM-001-ECOL-1996 establece que el pH del agua tratada sea entre 5 y 10.
- Para implementar en una planta de tratamiento de agua residual un equipo para desinfección con ozono, las mejores condiciones para tratar el agua residual en su último punto, serían a pH 7 y una concentración en la fase gas de 9.2 mg O₃/L durante 15 minutos, pues habría un menor gasto de re-

cursos económicos por no utilizar sustancias ni equipo más sofisticado para controlar el pH del agua. La calidad final del agua tratada es similar a la obtenida a pH 3.

- La inhibición del crecimiento de los microorganismos indicadores como los coliformes totales y fecales, así como patógenos como *Vibrio cholerae* y *Salmonella typhi* y de amibas de vida libre, por ozono, puede ayudar a disminuir los riesgos de contraer enfermedades gastrointestinales en el país, al ser el agua tratada utilizada comúnmente para riego agrícola.
- La desinfección con ozono no sólo es eficaz para eliminar los microorganismos antes mencionados sino también para huevos de helmintos, reduciéndolos hasta en un 95% con respecto al influente.
- La desinfección con ozono sería una etapa secundaria en el proceso de tratamiento de aguas residuales para obtener aguas tratadas de mayor calidad y que cumplan con la norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996.

9. Bibliografía

- ⇒ Bader, H., Hoigné, J. Determination of Ozone in Water by the Indigo Method. *Wat. Res.* 1981; 15: 449-456.
- ⇒ Bijan, L; Mohseni, M. Department of Chemical and Biological Engineering, University of British Columbia, Vancouver, BC, Can. *Water Science and Technology* (2004), 50(3, Forest Industry Wastewaters VII), 173-182
- ⇒ Birdsall C., Jenkins A. C., Spandinger, E. Iodometric Determination of Ozone. *Anal Chem.* Vol. 24, No. 4 (1952).
- ⇒ Bove, F., "TTHMs, TCE & PCE: Drinking Water Contaminants & Adverse Pregnancy Outcomes," Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), CDC, Atlanta, EE.UU., WC&P, pp. 42-47, Mayo 2002
- ⇒ Cline, Jennings E.; Sullivan, Paul F.; Fowler, Richard; Lovejoy, Matthew A.; Collier, John; Adams, Craig D. Ozone/UV treatment to enhance biodegradation of surfactants in industrial wastewaters: a pilot-scale study. Lockheed Martin Energy Systems, Inc., Oak Ridge, TN, USA. Proceedings, Annual Meeting - Air & Waste Management Association (1996), 89th ra11507/1-ra11507/17. Publisher: Air & Waste Management Association
- ⇒ Colaboradores de Wikipedia. Ozono [en línea]. Wikipedia, La enciclopedia libre, 2006 [fecha de consulta: 29 de octubre del 2006]. Disponible en <<http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Ozono&oldid=6539961>>.

- ⇒ Cortés Ibáñez Alejandra. Efecto de la aplicación de ozono en huevos de helmintos presentes en aguas residuales tratadas destinadas para riego. Tesis Licenciatura Facultad de Química. 10 de junio de 2004.
- ⇒ Cuenca-Adame E., Riestra-Díaz D., Pérez-Mangas J., Echegaray-Alemán A. Uso de aguas residuales y control de organismos patógenos en la producción de cebolla. *Agrociencia*, mayo-junio 2001, 35(3):255-265.
- ⇒ Doré, M. "Chimiedes Oxydants et Traitment des Eaux". Lavoisier TEC and DOC. Technique et Documentation-Lavoisier, París. 1989 : 1-505.
- ⇒ Garay, P. N., Cohn, F. M. "High – Quality Industrial Water Magnament". Manual: The Fairmont Press, Georgia. 1992:305-324.
- ⇒ Geering, F. "Optimization of Ozono Plants for Water Works in Switzerland". *Ozone:Sci. Eng. Feb. 1995; Vol. 17 No. 1:17-21.*
- ⇒ Geering, F. "Ozone Applications: The State-of-the-Art in Switzerland". *Ozone:Sci. Eng.* Lewis Publishers. 1999; Vol. 21 No. 2:187-200.
- ⇒ Ghaheri, M. Enhancing biodegradability of the industrial wastewaters in Iran. UK. World Congress of Chemical Engineering, 7th, Glasgow, United Kingdom, July 10-14,2005 (2005), "8320071-83200/7
- ⇒ Giono, C. S., Escobar, G., Valdespino, G. "Diagnóstico de laboratorio de infecciones gastrointestinales" Secretaría de Salud: Instituto Nacional de Diagnóstico y Referencia Epidemiológicos. México. 1994: 1-637.

- ⇒ Grebenyuk, V. D. "Electrodialysis of Solutions Containing Products of Oxidizing Destruction of Fulvic Acids of Natural Waters". *J. Water Chem. Technol.* 1993; Vol 15 No. 1:61-64.
- ⇒ Hoigné, J. "Chemistry of Aqueous Ozone and Transformation of Pollutants by Ozonation and Advanced Oxidation Processes". *The Handbook of Environmental Chemistry. Quality and Treatment of Drinking Water II, Part C.* Springer Verlag Berlin. 1998:85-141.
- ⇒ Instituto Nacional de Salud Pública. Dirección de Estadística. Estadísticas del Sistema Nacional de Salud. 1998
- ⇒ Jekel, R. "Floculation Effects of Ozone". *Ozone:Sci. Eng.* 1994 ; 16 :55-66.
- ⇒ Jolley, R., Bull, Richard J., Davis, William P., Katz S. *Water chlorination; chemistry, environmental impact and health effect (vol. 6).* Chelsea (US), Lewis Publishers, 1990
- ⇒ Killops, S. D. "Volatile Ozonation Products of Aqueous Humic Material". *Wat. Res.* 1986; Vol. 20 No. 2:153.
- ⇒ Langlais, B., Reckhow, D. A., Brink, D. R. "Ozone in Water Treatment". *Application and Engineering,* (Chelsea, MI: Lewis Publisher Inc. USA). 1991:1-569.
- ⇒ Le Paulouë, J., Langlais, B. "State-of-the-Art of ozonation in France". *Ozone:Sci. Ing.* Lewis Publishers. 1999. Vol.21. No. 2:153-162

- ⇒ Liberti, L. y Notarnicola M. . 1999. Advanced treatment and disinfection for municipal wastewater reuse in agriculture. *Water Sci. Tech.* 40(4-5):235-245.
- ⇒ Martinez, A. “Las Amibas, Enemigos Invisibles”. Fondo de Cultura Económica. 1996
- ⇒ Matuz, M. D. 2001. Amibas de vida libre aisladas de aguas subterráneas del valle del Mezquital, Hidalgo, México. Tesis, Biólogo. FES-Iztacala, UNAM.
- ⇒ Norma Mexicana. NMX-AA-028-2001-SCFI. Análisis de agua.- Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno en aguas naturales y residuales (DBO₅). 1999:1-18.
- ⇒ Norma Mexicana. NMX-AA-036-SCFI-2001. Análisis de agua – Determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba. 1999: 1-12.
- ⇒ Norma Mexicana. NMX-AA-030-1981. Análisis de agua – Determinación de la Demanda Química de Oxígeno. 1981:1-9.
- ⇒ Norma Mexicana. NMX-AA-026-SCFI-2001. Análisis de agua – Determinación de Nitrógeno total Kjeldahl en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba. 2001:1-16.
- ⇒ Norma Mexicana. NMX –AA-102-1987. Calidad del agua – Detección y enumeración de organismos coliformes, organismos coliformes termotolerantes y *Escherichia coli* presuntiva – Método de filtración de membrana. Diario Oficial de la Federación a 6 de noviembre de 1992.

- ⇒ Norma Oficial Mexicana. NOM-001-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación. Enero de 1997. pp. 67-81.

- ⇒ Organización Panamericana de la Salud. *Health Statistics in the Americas*. PAHO Scientific Publication, Washington, D. C. 1990a: Vol. II No. 524.

- ⇒ Organización Panamericana de la Salud. *Health Statistics in the Americas*. PAHO Scientific Publication, Washington, D. C. 1990b: Vol. I No. 524.

- ⇒ Orta, L. M. T., Díaz, P. V., Aparicio, O. G., López, A. “Detección y Tratamiento de *Vibrio cholerae* 01 Variedad Rugosa Presente en Agua”. Memorias del XXVI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental del 1 al 5 de Noviembre. Museo de la Nación, Lima, Perú. 1998:1-5.

- ⇒ Orta, L. M. T., Altamirano, J. M., Monje, I. “Improvement of Wastewater Coagulation Using Ozone”. *Ozone:Sci. Eng.* 1998; Vol. 20 No. 2:151-162.

- ⇒ Page, F.C. “A new key to Freshwater and Soil Gymnamoebae with instructions for culture”. Freshwater Biological Association, 1988

- ⇒ Rakness, K. L., Corsaro, K. M., Hale, G., Blank, B. D. “Wastewater Disinfection with Ozone Process Control and Operation Results”. *Ozone:Sci. Eng.* 1993 ; *Volt 15 No. 6 :497-514.*

- ⇒ Reynolds, Kelly A. Desinfección con cloro y riesgos de los productos derivados de la desinfección. *Agua Latinoamérica*; 2002, Vol. 2, número 4.

- ⇒ Rice, R.G. "Applications of Ozone in Water and Wastewater Treatment". En: "Analytical Aspect of Ozone Treatment of Water and Wastewater". Editores: Rice, R.G.; Bollyky, L.J. y Lacy, W.J. Lewis Publishers, INC. Chelsea, p7-25, 1986.
- ⇒ Rojas Valencia María Neftalí. Tratamiento avanzado de desinfección con ozono para eliminar *Vibrio cholerae*, *Salmonella typhi*, amebas y huevos de helmintos en aguas residuales tratadas para reúso. División de Ciencias Básicas e Ingeniería. Doctorado en Ciencias e Ingeniería Ambiental. Universidad Autónoma Metropolitana. México, 2004: 1-200.
- ⇒ Rose, J. B., Gerba, C. H. P., Jakubowski, W. "Survey of Potable Water supplies for *Cryptosporidium* and *Giardia*". *Environmental Science and Technology*; 1991:256 (6):1303-1310.
- ⇒ Singer, P.C., Chang, S.D. 1989 Correlations between trihalomethanes and total organic halides formed during water treatment. *Journal of American Water Works Association*, 81, 61-65.
- ⇒ Sistema Nacional de Información en Salud. Secretaría de Salubridad y Asistencia. 2000.
- ⇒ Sistema Único de Información para la Vigilancia Epidemiológica / Dirección General de Epidemiología / SSA 2004
- ⇒ Suh, Jung Ho; Mohseni, Madjid. A study on the relationship between biodegradability enhancement and oxidation of 1,4-dioxane using ozone and hydrogen peroxide. Department of Environmental and Industrial Chemistry; Ulsan College, Ulsan, S. Korea. *Water Research* (2004), 38(10), 2596-2604

- ⇒ Tay, J.L, Aguilera, G. Q., Castrejon, V. "Parasitología Médica". Francisco Méndez Cervantes. 1991:6-327.

- ⇒ USEPA, Guidance Manual for Compliance with the Filtration and Disinfections Requirements for Public Water Systems Using Surface Water Sources, 1999.

- ⇒ Wurrman, K., Meyrath, J. "The Bactericidal Action of Ozone Solution". *Schwietz. J. Allgen. Pathol. Bakteriol.* 1955:18:1060