



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

EFFECTO DE LA APLICACION DE OZONO EN HUEVOS DE
HELMINTOS PRESENTES EN AGUAS RESIDUALES TRATADAS
DESTINADAS PARA RIEGO

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
QUÍMICA DE ALIMENTOS
P R E S E N T A :
ALEJANDRA CORTES IBAÑEZ



MEXICO, D. F. EXAMENES PROFESIONALES 10 DE JUNIO DEL 2004
FACULTAD DE QUÍMICA





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.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Jurado Asignado

Presidente Maria del Carmen Wachter Rodarte

Vocal Hilda Elizabeth Calderón Villagomez

Secretario Ma. Neftali Rojas Valencia

1er Suplente Alejandro Camacho Cruz

2do. Suplente Martha Giles Gómez

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Alejandra Cortés Ibáñez

FECHA: 33 de junio del 2004

FIRMA: 

Instituto de Ingeniería, UNAM



Asesor: M. en C. Maria Neftali Rojas Valencia



Supervisor técnico: Dra. Maria Teresa Orta Ledesma



Sustentante: Alejandra Cortés Ibáñez

ÍNDICE

RESUMEN

1.0	INTRODUCCIÓN	1
2.0	OBJETIVO	3
2.1	Objetivos específicos	3
3.0	HIPÓTESIS	3
4.0	MARCO TEÓRICO	4
4.1	Helmintos	6
4.2	Agentes empleados en la desinfección de aguas residuales	8
4.2.1	<i>Cloración</i>	8
4.2.2	<i>Radiación UV</i>	9
4.2.3	<i>Ozono</i>	12
4.2.3.1	<i>Generación de ozono</i>	13
4.2.3.2	<i>Uso del ozono en el tratamiento de aguas</i>	13
4.2.3.3	<i>Ozono como desinfectante</i>	14
5.0	ANTECEDENTES	15
6.0	METODOLOGÍA	17
6.1	Pruebas experimentales	17
6.1.1	<i>Primera fase</i>	17
6.1.2	<i>Segunda fase</i>	19
6.1.3	<i>Tercera fase</i>	20
6.1.3.1	<i>Medición de parámetros fisicoquímicos</i>	20
6.2	Ozonador	22
6.3	Cuantificación de ozono	23

6.3.1	<i>Método Yodométrico</i>	23
6.3.2	<i>Método de Índigo</i>	23
7.0	RESULTADOS	24
7.1	Primera fase	24
7.1.1	<i>Pruebas experimentales a pH 5</i>	26
7.1.2	<i>Pruebas experimentales a pH 9</i>	29
7.1.3	<i>Análisis estadístico</i>	32
7.2	Segunda fase	33
7.2.1	<i>Comparación pH 3 y pH 5</i>	33
7.2.2	<i>Análisis estadístico</i>	34
7.2.3	<i>Ozonación de otras especies</i>	34
7.3	Tercera fase	37
7.3.1	<i>Reconocimiento de la planta de tratamiento</i>	37
7.3.2	<i>Pruebas Experimentales</i>	38
7.3.2.1	<i>Efecto en huevos de helmintos</i>	39
7.3.2.2	<i>Parámetros fisicoquímicos</i>	41
7.3.2.3	<i>Microorganismos indicadores</i>	44
8.0	CONCLUSIONES	47
9.0	BIBLIOGRAFÍA	49
	ANEXO I	52
	ANEXO II	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Principales microorganismos patógenos que pueden encontrarse en el agua residual doméstica y enfermedades que producen.	5
Tabla 2	Frecuencia de los géneros más comúnmente encontrados en aguas residuales en México.	7
Tabla 3	Ventajas y limitaciones de los derivados del cloro como desinfectante.	8
Tabla 4	Inactivación de microorganismos en aguas con radiación UV.	11
Tabla 5	Análisis de varianza (primera fase).	32
Tabla 6	Análisis de varianza (segunda fase).	34
Tabla 7	Valores promedio de los parámetros fisicoquímicos y conteo de huevos de helmintos de los puntos de muestreo en la planta de tratamiento.	37
Tabla 8	Monitoreo de parámetros fisicoquímicos durante el proceso de ozonación.	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Región UV-C en el espectro de radiación electromagnética.	10
Figura 2	Sistema de tratamiento con ozono	22
Figura 3	Efecto de la dosis de ozono aplicado en fase gas en la oxidación de huevos de helmintos pH 5; 9.2 mg O ₃ /min	26
Figura 4	Efecto de la dosis de ozono aplicado en fase gas en la oxidación de huevos de helmintos pH 5; 18.4 mg O ₃ /min	27
Figura 5	Efecto de la dosis de ozono aplicado en fase gas en la oxidación de huevos de helmintos. (a) 9.2 mg O ₃ /min; 18.4 mg O ₃ /min pH 5	28
Figura 6	Efecto de la dosis de ozono aplicado en fase gas en la oxidación de huevos de helmintos pH 9; 9.2 mg O ₃ /min	29
Figura 7	Efecto de la dosis de ozono aplicado en fase gas en la oxidación de huevos de helmintos pH 9; 18.4 mg O ₃ /min	30
Figura 8	Efecto de la dosis de ozono aplicado en fase gas en la oxidación de huevos de helmintos (a) 9.2 mg O ₃ /min; 18.4 mg O ₃ /min pH inicial de reacción 9	31
Figura 9	Ozonación de la especie <i>Ascaris suum</i> a pH 5 y 3, con dosis de ozono de 18.4 mg O ₃ /min.	33
Figura 10	Ozonación de huevos de helmintos de distintas especies. pH 3 y 18.4 mg O ₃ /min .	35
Figura 11	Resultados de la eficiencia de remoción de cinco especies de huevos de helmintos a pH ácido y 18.4 mg O ₃ /min.	36
Figura 12	Evolución de la eliminación de huevos de helmintos, empleando como desinfectante ozono. Condiciones de ozonación 18.4 mg O ₃ /min y pH 5.	39
Figura 13	Evolución de la eliminación de huevos de helmintos, empleando como desinfectante ozono. Condiciones de ozonación 18.4 mg O ₃ /min y pH 3.	40
Figura 14	Variación de los parámetros fisicoquímicos en el tratamiento de agua residual empleando como desinfectante ozono. Condiciones de ozonación pH 3 y pH 5; 18.4 mg O ₃ /min.	42

- Figura 15 Variación de los parámetros fisicoquímicos en el tratamiento de agua residual empleando como desinfectante ozono Condiciones de ozonación pH 3 y pH 5; 18.4 mg O₃/min. 43
- Figura 16 Seguimiento de indicadores microbiológicos (coliformes totales y coliformes fecales) durante la ozonación a pH 5 y 18.4 mg O₃/min. 45
- Figura 17 Seguimiento de indicadores microbiológicos (coliformes totales y coliformes fecales) durante la ozonación a pH 3 y 18.4 mg O₃/min. 46

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1	Huevo de <i>Ascaris suum</i> sin tratamiento	24
Fotografía 2	Huevo de <i>Ascaris suum</i> después de una hora de ozonación	25
Fotografía 3	Huevo de <i>Ascaris suum</i> en proceso de desintegración	25

RESUMEN

Estudios experimentales han demostrado que el ozono aplicado en el tratamiento de aguas, como desinfectante, es una alternativa viable para eliminar microorganismos patógenos como virus, bacterias y protozoarios. Sin embargo aún no se había demostrado su eficiencia en la remoción de helmintos, por lo cual la presente investigación tuvo como objetivo demostrar que el ozono es un agente oxidante útil en la eliminación de las especies de huevos de helmintos presentes en las aguas residuales tratadas. El ozono se aplicó en dosis de 9.2 y 18.4 mg O₃/min en muestras de 0.5 L estandarizadas a 40 huevos de helmintos/40µL, ajustándoles previamente el pH a 5 ó 9 según fuera el caso, con un tiempo de contacto de hasta 4 horas. La mayor eliminación (95%) de huevos de helmintos se dio en condiciones ácidas (pH 5) y dosis de 18.4 mg O₃/min, en un tiempo de 2 horas. En la segunda fase, se emplearon otras especies, como fueron *Parascaris equorum*, *Dipylidium caninum*, *Strongyloides sp*, *Taenia sp* y *Toxocara canis*, además de la especie *Ascaris suum*, las pruebas experimentales se realizaron en condiciones ácidas (pH 5 y 3), dosis de 18.4 mg O₃/min y tiempo de contacto de 2 horas. En todos los casos se observó una disminución, dándose la mayor eliminación en un tiempo máximo de una hora. Por último se realizaron pruebas experimentales en muestras de agua residual a pH 3 y pH 5, dosis de 18.4 mg O₃/min y tiempo de contacto de una hora, la cuantificación de huevos de helmintos se realizó al inicio y al término de la ozonación, así mismo se evaluaron parámetros fisicoquímicos y microbiológicos. En ambos tratamientos se obtuvo una disminución considerable de huevos alcanzándose valores de 1 HH/L para el tratamiento realizado a pH 5 y de 2 HH/L para el realizado a pH 3. Tanto la DBO₅, DQO y la turbiedad disminuyeron después de la ozonación. El valor de los sólidos disueltos totales aumentó en ambos tratamientos, dado por el ajuste de pH, que se realizó en las muestras, caso contrario la alcalinidad disminuyó considerablemente en ambos tratamientos. El pH no se vio afectado manteniéndose constante, durante la ozonación en ambos casos. Los microorganismos indicadores evaluados (coliformes totales y fecales) después de 15 minutos de iniciada la prueba de ozonación ya no fueron detectados. El tratamiento que proporcionó un efluente de acuerdo a como lo establece la normativa mexicana (NOM-ECOL-001-1996) fue el realizado a pH 5 y 18.4 mg O₃/min.

1.0 INTRODUCCIÓN

Entre los retos que enfrentan las ciudades actuales, está la escasez de agua para el uso doméstico e industrial y el volumen de riego agrícola que se requiere para cubrir las necesidades alimentarias, lo que ha contribuido que a nivel internacional aumente el interés en el reuso del agua en actividades como el riego agrícola (Cifuentes, 1993).

La discusión sobre el uso del agua residual tiene aspectos sociales, económicos, políticos y ambientales de gran relevancia. Algunos de sus beneficios son: permite que se obtengan grandes cosechas en extensiones considerables de tierras semiáridas e improductivas; sus cualidades de fertilizante agrícola hacen posible altos rendimientos por unidad de superficie cultivable; la liberación de grandes volúmenes de agua de primer uso para fines de abastecimiento y una depuración del agua residual por efectos de su infiltración en el suelo (Cifuentes, 1994).

No obstante su empleo representa riesgos en la salud pública en la mayor parte de los países en desarrollo como el nuestro, ya que la calidad microbiológica del agua tratada, si no es la adecuada, es un factor de transmisión de los microorganismos causantes de muchas infecciones gastrointestinales, como virus, bacterias, quistes de protozoarios y huevos viables de helmintos, que a su vez se hacen presentes en los productos que son regados con éstas (Rojas, 2002).

Con el fin de asegurar la calidad del agua, desde el punto de vista microbiológico, ésta es sometida a tratamientos de desinfección que tienen por objeto garantizar la ausencia de gérmenes infecciosos y suprimir el riesgo de contaminación del agua o de un sistema de distribución, que haya sufrido los efectos de la contaminación (SEMARNAP, 1997 y Rojas y Orta, 2000).

Los antecedentes de estudios experimentales tanto a escala laboratorio como piloto y plantas de tratamiento, demuestran que la ozonación es una alternativa viable y con perspectivas alentadoras a aplicar en el tratamiento de aguas con diversos propósitos como lo son su uso como desinfectante, en la remoción de compuestos persistentes y residuos peligrosos, en la oxidación de metales, en la eliminación de color, olor y como ayuda en los procesos de coagulación-floculación (Rojas, 2002)

No obstante aún no se había demostrado su eficiencia en la remoción de huevos de helmintos, parásitos intestinales que ocupan el primer lugar de incidencia en México, debido a su difícil control ya que no son eliminados por los métodos de desinfección tradicionales, por lo cual los objetivos planteados en el presente trabajo fueron:

2.0 OBJETIVO

- Demostrar que el ozono es un agente oxidante útil en la eliminación de las especies de huevos de helmintos presentes en las aguas residuales tratadas.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer en condiciones de laboratorio las condiciones óptimas de ozonación: pH, dosis y tiempo de contacto, requeridas para destruir a los huevos de helmintos presentes en las aguas residuales, en condiciones experimentales.
- Evaluar en campo la ozonación de muestras de agua residual tratada con las condiciones óptimas determinadas.
- Estudiar el comportamiento de parámetros fisicoquímicos en las muestras de agua residual antes y durante el proceso de ozonación.
- Evaluar la calidad microbiológica del agua residual ozonada, mediante la cuantificación de microorganismos indicadores.
- Determinar si el agua ozonada cumple con las características microbiológicas y fisicoquímicas requeridas para riego agrícola de acuerdo a lo que establece la normativa mexicana.

3.0 HIPÓTESIS

El ozono es un agente oxidante poderoso que disminuirá considerablemente la concentración de huevos de helmintos presentes en una muestra de agua residual tratada.

4.0 MARCO TEÓRICO

El reúso de las aguas residuales en agricultura es una práctica milenaria y común en varias regiones del planeta, proporcionando beneficios al suelo y al rendimiento agrícola (Cifuentes, 1994). Sin embargo aún cuando se tienen aspectos benéficos la reutilización del agua residual tratada conlleva un riesgo sanitario, tanto para el público como para los trabajadores del sistema, ya que la exposición a microorganismos patógenos y a sustancias tóxicas es muy elevada en estos casos (Stein y Schwartzbrod, 1990).

Por este motivo, es primordial reducir al mínimo la exposición a estos agentes, manteniendo los posibles peligros sanitarios dentro de un nivel aceptable. En general, la preocupación sanitaria que estas actividades suscitan está relacionada con el grado de contacto del agua residual tratada con las personas, el tipo y la calidad del agua residual tratada y la eficiencia de los procesos de tratamiento (OMS, 2001).

La meta del tratamiento de las aguas residuales es reducir el nivel de microorganismos dañinos a niveles seguros de exposición, lo que dará como resultado un efluente que pueda ser reusado ó descargado en el medio ambiente de manera segura. (Reynolds, 2002^b)

Por lo anterior la desinfección es considerada como el mecanismo principal, para asegurar la desactivación o destrucción de los organismos patógenos presentes en las aguas residuales y prevenir la dispersión de enfermedades transmitidas a través del agua, por lo cual es muy importante que las aguas residuales sean tratadas adecuadamente antes de llevar a cabo el proceso de desinfección, para asegurar una acción eficaz del desinfectante (EPA, 1999)

Los principales agentes infecciosos para el hombre y los animales que pueden encontrarse en el agua residual sin tratar pueden clasificarse en tres grandes grupos: las bacterias, los parásitos (protozoos y helmintos) y los virus (Rojas, 2002). En la tabla 1 se mencionan los principales agentes infecciosos que pueden encontrarse en un agua residual doméstica.

TABLA 1 Principales microorganismos patógenos que pueden encontrarse en el agua residual doméstica y enfermedades que producen.

ORGANISMO PATÓGENO	ENFERMEDAD
Protozoos	
<i>Entamoeba histolytica</i> <i>Giardia lamblia</i> <i>Balantidium coli</i>	Disentería amebiana Giardiasis Balantidiosis
Helmintos	
<i>Ascaris lumbricoides</i> <i>Ancylostoma duodenale</i> <i>Necator americanus</i> <i>Ancylostoma spp</i> <i>Strongyloides stercoralis</i> <i>Trichuris trichiura</i> <i>Taenia spp</i> <i>Enterobius vermicularis</i> <i>Echinococcus granulosus</i>	Ascariasis Anquilostomiasis Necatoriasis Larva migrante cutánea Estrongiloidiasis Trichuriasis Teniasis Enterobiasis Hidatidosis
Bacterias	
<i>Shigella</i> (4 especies) <i>Salmonella typhi</i> <i>Salmonella</i> (unas 1700 esp.) <i>Vibrio cholerae</i> <i>Escherichia coli</i> enteropatógena <i>Yersinia enterocolitica</i> <i>Leptospira spp</i>	Shigelosis Fiebre tifoidea Salmonelosis Cólera Gastroenteritis Yersiniosis Leptospirosis
Virus	
Enterovirus (71 tipos)	Gastroenteritis, anomalías cardíacas, meningitis.
Virus de la hepatitis A Adenovirus (31 tipos) Rotavirus Parvovirus (2 tipos)	Hepatitis Enfermedades respiratorias Gastroenteritis Gastroenteritis

Fuente: Rojas, 2002.

4.1 Helmintos

Los helmintos son parásitos intestinales, siendo los nemátodos, tremátodos y cestodos las tres clases de helmintos que son de interés médico y que han sido reconocidas como parásitas para el hombre. El huevo es el estadio de desarrollo mediante el cual se diseminan en el ambiente, y es en esta forma en la que se encuentran en las aguas residuales, siendo las especies más comunes: *Ascaris lumbricoides*, *Trichuris trichiura*, *Taenia sp.*, *Hymenolepis nana*, *Hymenolepis diminuta*, *Enterobius vermicularis*, *Toxocara sp.*, *Strongyloides stercoralis* (Lamothe, 1988 y Rojas, 2002).

Las densidades de huevos de helmintos que han sido reportadas varían conforme a la zona de estudio por sus características en cuanto al aspecto climático y sociocultural, además de las técnicas que se emplean para su análisis y de la sanidad de las comunidades. (Stein y Schwartzbrod, 1990).

En el ámbito mundial por ejemplo para el caso de Aleppo, Siria se calcularon de 1000 a 8000 huevos de *Ascaris*/L, como resultado de una estimación de que el 42% de la población excreta un promedio de 800 000 huevos/persona/día, mientras que para el noreste de Brasil una estimación similar fue de 804 huevos/L de nemátodos (Rojas, 2002).

Para el caso de México, se cuenta con estudios sobre la incidencia de la helmintiasis sólo del tipo local. La concentración más alta de huevos de helmintos encontrada fue de 375 huevos de helmintos por litro (Maya *et al.*, 2000) La frecuencia de los géneros más comúnmente encontrados en aguas residuales en México se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Frecuencia de los géneros más comúnmente encontrados en aguas residuales en México.

ESPECIES	PROMEDIOS
<i>Ascaris lumbricoides</i>	86.7 %
<i>Ascaris suum</i>	
<i>Hymenolepis diminuta</i>	5.9%
<i>Trichuris trichiura</i>	4.8%
<i>Toxocara canis</i>	2.2%
<i>Necator americanus</i>	0.4%
<i>Taenia solium</i>	0.05%
<i>Enterobius vermicularis</i>	0.04%

Fuente Rojas, 2002

Los helmintos por su difícil control ocupan uno de los primeros lugares de los problemas de salud pública y el primer lugar de incidencia en México y el mundo. En particular los huevos de *Ascaris lumbricoides* (parásitos de humanos) y *Ascaris suum* (parásitos de cerdo) son muy resistentes a condiciones adversas de temperatura, humedad, cambio de suelos y fertilizantes empleados. Resisten a la acción de los agentes químicos, pueden embrionar con éxito en formol al 5%, en soluciones de yodo, alcoholes, metales pesados, detergentes sintéticos y compuestos de amonio y pueden soportar la inmersión transitoria en soluciones al 50% de ácido clorhídrico, nítrico, acético, y sulfúrico, entre otras sustancias inhóspitas similares. Se ha visto además que los huevos de helmintos sobreviven meses en aguas negras, lodo y tierras agrícolas que son regadas con aguas residuales (Rojas, 1998).

Por los riesgos mencionados se ha hecho necesario el buscar métodos de desinfección con agentes que proporcionen efluentes con calidad bacteriológica y helmintológica requerida para riego.

4.2 Agentes empleados en la desinfección de aguas residuales

Se han aplicado numerosos tratamientos para disminuir y/o eliminar la acción patógena de los microorganismos presentes en las aguas residuales, entre los más usados están la cloración, la radiación ultravioleta y el ozono.

4.2.1 Cloración

En lo que respecta a la cloración, ésta puede realizarse suministrando cloro gaseoso, hipoclorito de sodio o dióxido de cloro. Es parte integral del tratamiento del agua residual en Estados Unidos y Canadá, especialmente dosificando hipoclorito de sodio. En la tabla 3 se muestran las ventajas y limitaciones del empleo de los derivados del cloro como desinfectantes (Rojas, 2002).

Tabla 3. Ventajas y limitaciones de los derivados del cloro como desinfectante

TECNOLOGÍA DE OXIDACIÓN	VENTAJAS	LIMITACIONES
Cloro (Cl_2)	<ul style="list-style-type: none">- Bajo costo inicial- Amplia Historia de uso en el tratamiento de aguas residuales- Tecnología bien establecida.- El cloro residual puede ser mantenido.	<ul style="list-style-type: none">- La actividad del cloro puede ser eliminada.- El cloro puede convertir compuestos orgánicos en clorados que pueden ser cancerígenos o difíciles de biodegradar
Dióxido de cloro (ClO_2)	<ul style="list-style-type: none">- No reacciona con los compuestos orgánicos para formar organoclorados- Puede ser generado <i>in situ</i>.	<ul style="list-style-type: none">- Es un gas relativamente inestable que no puede ser comprimido y licuado sin el peligro de una explosión.- Genera productos inestables como los cloritos.- Los compuestos alifáticos casi no reaccionan con él en condiciones prácticas de tratamiento
Hipoclorito (ClO^-)	<ul style="list-style-type: none">-Bajo costo y alta disponibilidad.- La solución acuosa es fácilmente transportable, almacenable y medible dentro del sistema de reacción.	<ul style="list-style-type: none">-Forma subproductos clorados

Fuente: Rojas, 2002.

La eficiencia de la desinfección con cloración es dependiente de la temperatura, pH, grado de mezclado, tiempo de contacto, presencia de sustancias que interfieren en el proceso y concentración de microorganismos que quieren ser destruidos (Rojas, 2002).

El proceso de desinfección normal consiste en la inyección de una solución de cloro al inicio de un proceso de cloración. La dosificación de cloro depende de la calidad del agua residual y de otros factores, pero son habituales las dosis de 5-10 mg/l. El proceso está diseñado normalmente para permitir un tiempo de contacto de 15 minutos como mínimo. No obstante, a veces se necesita un tiempo de contacto de hasta 120 minutos cuando se usa el agua para riegos específicos (Christman, 2002).

Uno de los problemas que se presentan a la hora de clorar las aguas residuales ya depuradas es la presencia de partículas en suspensión, que puede dar origen a subproductos, como los trihalometanos (THM), a los cuales se les han asociado riesgos cancerígenos (Reynolds, 2002^a).

En lo que respecta a la resistencia de los organismos a la cloración, los quistes de protozoos son más resistentes que los virus y las bacterias al cloro. Por lo que respecta a su capacidad ovicida sobre los huevos de helmintos los compuestos de cloro no son efectivos para inactivarlos, ni aún 10,000 mg/L de cloro es suficiente concentración para inhibir su desarrollo (Orta *et al.*, 2001).

4.2.2 Radiación UV

La luz ultravioleta constituye una parte del espectro electromagnético, con longitudes de onda entre 100 y 400 nm (Tarrán, 2002). Por más de cien años la ciencia ha reconocido los efectos bactericidas de la región ultravioleta del espectro electromagnético. Las longitudes de onda responsables de esta acción están situadas entre los 240 – 280 nanómetros (nm) con un máximo en la longitud de 265 nm, y son conocidas como UV-C (Figura 1).

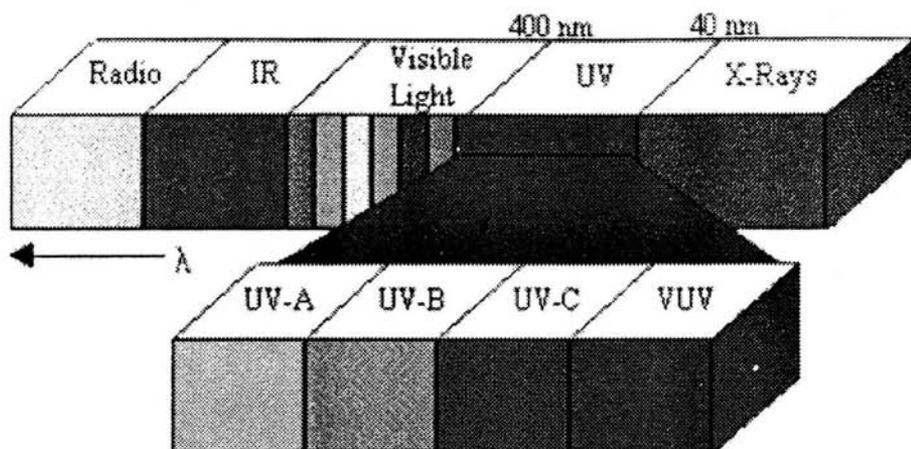


Figura 1 Región UV-C en el espectro de radiación electromagnética.

En México la utilización de la luz UV como desinfectante es relativamente nuevo, aún cuando ha sido usado por muchos años en varias partes del mundo, tanto para uso doméstico como para el uso industrial (Rojas, 2002).

El blanco principal de la desinfección mediante la luz ultravioleta es el material genético. Los microorganismos son destruidos por la radiación ultravioleta cuando la luz penetra a través de la célula y es absorbida por el ácido nucleico, lo que provoca una reordenación de la información genética, que interfiere con la capacidad reproductora de la célula. Por consiguiente, los microorganismos son inactivados por la luz UV como resultado del daño fotoquímico que sostiene el ácido nucleico (Tarrán, 2002).

En la tabla 4 se enlistan algunas bacterias, virus y quistes de protozoarios en los que se ha estudiado la eficiencia de las radiaciones UV en diferentes medios líquidos aplicando diferentes dosis de radiación UV.

Tabla 4. Inactivación de microorganismos en aguas con radiación UV.

ORGANISMOS		AGUA	DOSIS UV MW-s/cm ²	REDUCCIÓN
B	<i>E. coli</i>	Agua destilada	6.5	99.9
	Coliformes totales	Efluente	8.2	99.9
	Heterótrofos	Efluente	14	99.9
A	<i>B. subtilis</i> (esporas)	Agua destilada	60	99.9
	Coliformes totales	Efluente	6.5	99.0
C	Coliformes totales	Efluente	9.6-52	99.97
	Coliformes totales	Efluente filtrado	5.7	99.9
T	Coliformes fecales	Agua residual doméstica	275	99.0
	Enterococos	Agua residual doméstica	275	99.9
R	<i>P. aeruginosa</i>	Agua residual doméstica	280	99.9
	<i>E. coli</i> recA-, uvrA	Medio de cultivo	10.3	99.9
A	<i>E. coli</i> B/r	Medio de cultivo	0.1	99.9
	<i>Legionella</i> sp. (6)	Medio de cultivo	0.8-5.5	99.9
S	<i>L. pneumophila</i>	Agua potable	30	99.9
	<i>L. pneumophila</i>	Agua destilada	1.8	99.9
	<i>Y. enterocolitica</i>	Agua destilada	2.7	99.9
	<i>C. jejuni</i>	Agua destilada	5.0	99.9
V I R U S	Polio 1	Agua salina fosfatada	21	99.9
	Rota SA11	Agua salina fosfatada	25	99.9
	Polio 1	Agua destilada	29	99.9
	Reo 1	Agua destilada	45	99.9
QUISTES DE PROTOZOA- RIOS	<i>Giardia lamblia</i>	Agua destilada	63	70.0
	<i>A. castellani</i>	Agua destilada	100	99.9

Adaptado por Rojas, 2002

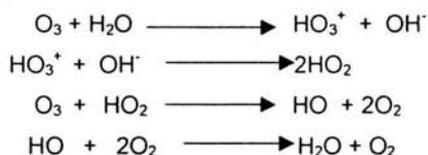
Como se puede ver las bacterias son menos resistentes a las radiaciones UV que los virus y estos a su vez menos resistentes que los quistes de protozoarios, la inactivación se reduce por la presencia de partículas y materia orgánica disuelta en el agua.

Este método es más eficiente que el cloro en inactivar virus, esporas y quistes, puede requerir menos espacio, la única desventaja es que el equipo es relativamente caro. Si bien el empleo de radiaciones UV ha sido efectivo para eliminar bacterias y protozoarios, no lo es para los huevos de helmintos (Rojas, 2002).

4.2.3 Ozono

El ozono es una forma alotrópica del oxígeno, es un gas inestable con un característico olor pungente al cual debe su nombre. Se deriva de la palabra griega "ozein" que significa oler. Es un poderoso agente oxidante, su potencial de oxidación es -2.07 V referido al electrodo de hidrógeno a 25°C y actividad del ion H de uno (White, 1978).

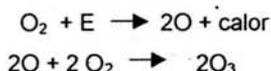
La solubilidad del ozono en agua es un factor limitante que afecta grandemente el proceso de ozonación. A 20°C su solubilidad es de solo 570 mg/L. En solución acuosa se descompone como sigue:



Los radicales libres (HO_2 y HO) que se forman cuando el ozono se descompone en solución acuosa tienen gran poder oxidante, y además de desaparecer rápidamente, pueden reaccionar con las impurezas; por ejemplo: sales metálicas, materia orgánica, iones hidrógeno e hidroxilo presentes en solución. Estos radicales libres formados por la descomposición del ozono en agua son aparentemente las principales especies reactivas (White, 1978).

4.2.3.1 Generación de ozono

El ozono es producido comercialmente por el método de descarga de corona, en éste método se pasa un gas que contenga oxígeno a través del generador de ozono y se le aplica una descarga eléctrica de alto voltaje (4000-30,000 V). La energía aplicada al gas disocia algunas moléculas de oxígeno para formar "átomos" energéticos de oxígeno (Rice, 1999). La combinación de un átomo energético de oxígeno con una molécula de oxígeno produce una molécula de ozono:



La reacción total se muestra como una reacción de equilibrio. Sin embargo, si la temperatura dentro de un generador de ozono excede 35°C, la reacción inversa (descomposición de ozono a oxígeno) domina. Por esta razón, es indispensable enfriar los generadores de ozono para remover el calor liberado durante su uso (Rice, 1999).

4.2.3.2 Uso del ozono en el tratamiento de aguas

En el continente europeo más de mil plantas de tratamiento de agua municipal usan ozono como parte de su tratamiento químico, como desinfectante ha sido utilizado en Francia desde principios de siglo. Su uso se ha extendido a varios países de Europa y tiende a ser aplicado a algunas plantas de Estados Unidos (Rojas, 2002).

Las sustancias húmicas, que son precursoras de trihalometanos (THMs), son oxidadas completamente mediante la ozonación, por lo que una práctica que comienza a tener auge, es aplicar primero ozono y posteriormente cloro, para mantener un efecto residual y evitar la formación de THMs (Montes, 2000). Un beneficio adicional con el uso del ozono es que se eleva la concentración de oxígeno disuelto en el efluente, evitando la necesidad de airear para cumplir las restricciones señaladas en las normas de calidad de agua de descarga (Langlais *et al.*, 1991).

4.2.3.3 Ozono como desinfectante

El ozono, debido a sus propiedades oxidantes es considerado como uno de los agentes microbicidas más rápido y eficaz que se conoce. Su acción abarca un amplio espectro que engloba la eliminación de:

- **Bacterias:** En este tipo de microorganismos se observa un efecto del ozono como bactericida, esto es una completa destrucción del microorganismo, ya que puede romper la membrana celular, imposibilitando la reactivación de las células. Estos efectos se observan a bajas concentraciones de ozono y tiempos de exposición muy cortos (Montes, 2000).
- **Virus:** El ozono actúa sobre estos microorganismos oxidando las proteínas de su envoltura, modificando su estructura tridimensional. Al ocurrir esto, el virus no puede anclarse a ninguna célula huésped, por lo que no se reproduce y muere. La acción viricida es observable a concentraciones de ozono inferiores a la de acción bactericida debido a que la complejidad de la estructura vírica es menor a la de la pared bacteriana (Montes, 2000).
- **Esporas:** Algunas bacterias cuando se encuentran en condiciones adversas, fabrican una gruesa envoltura y paralizan su actividad metabólica, permaneciendo en estado de latencia, a esto se le denomina espora, y es típica su formación por bacterias como las que provocan el tétanos, la gangrena gaseosa, el botulismo y el ántrax. Este mecanismo de resistencia es muy difícil de combatir y tratamientos como altas temperaturas y multitud de antimicrobianos se vuelven ineficaces. El ozono a concentraciones ligeramente superiores a las usadas para eliminar las células vegetativas, es capaz de acabar con la resistencia de las esporas (Montes, 2000).

5.0 ANTECEDENTES

Con el fin de asegurar la reutilización de aguas residuales para riego desde el punto de vista microbiológico, En los años sesenta y setenta, se establecieron directrices muy severas para el uso de aguas residuales en el riego de cultivos comidos crudos. Estas directrices correspondían casi a normas de calidad para aguas potables que tenían su origen en un enfoque de cero riesgo (Strauss, 1998).

En 1989, un Grupo Científico de la OMS formuló nuevas directrices sobre el uso de aguas residuales en agricultura. Estas directrices introdujeron un enfoque nuevo y más severo referente a la necesidad de reducir el número de huevos helmínticos (nematodos: especies de *Ascaris* y *Trichuris* y anquilostoma) en efluentes a un nivel de ≤ 1 huevo / litro, debido al hecho de que en muchos países en desarrollo, los riesgos efectivos más importantes para la salud son asociados con enfermedades helmínticas, y por lo tanto el uso seguro de las aguas residuales en la agricultura necesitaría un alto grado de eliminación de éstos (Strauss, 1998).

El ozono es un agente oxidante muy poderoso que ha sido utilizado como desinfectante en el campo del tratamiento de aguas, de 1965 a 1975 se realizaron un gran número de estudios a nivel laboratorio y planta piloto para evaluar la efectividad del ozono en la desinfección de aguas residuales (White, 1978).

Durante la primera Guerra Mundial el cloro sustituyó al ozono, debido a que el cloro tenía un costo más bajo. Después de la segunda Guerra Mundial el ozono vuelve a tomar un nuevo auge en el tratamiento de aguas; debido a que el uso de éste, además de desinfectar el agua, también eliminaba olores y sabores desagradables (Vázquez, 1996).

Históricamente estaba ubicado en el campo de tratamiento de agua potable. Sin embargo, avances recientes en los sistemas de generación de ozono, han redundado en una importante reducción de los costos, por lo que hoy en día se presenta como un desinfectante competitivo en el tratamiento de agua residual. Sus principales aplicaciones han sido la remoción de color, olor y la desinfección de efluentes secundarios y terciarios principalmente (Rojas, 2002).

Numerosos reportes de dosis de ozono y tiempo de contacto requeridos para la inactivación de microorganismos más comúnmente encontrados en las aguas residuales han sido publicados. Rakness *et al.*, (1993), reportaron que bacterias como: *E. coli*, *Staphylococcus sp.*, *Pseudomonas fluorescens* con dosis de 0.6-10 mg O₃ durante ½ minuto eran inactivadas; Garay y Cohn, (1992), determinaron que a una dosis de 0.4 mg O₃ durante 3 minutos virus como los de la Polio I, II y III se daba una destrucción total de éstos; así mismo, Langlais *et al.*, (1991), determinaron que quistes de protozoarios como *Cryptosporidium parvum*, con dosis de 50-100 mg O₃, durante 10 min eran destruidos por completo.

Con respecto a los helmintos, Gamboa y Dipietro, (1996) emplearon 8.3 mg O₃ /min y observaron una reducción de huevos de helmintos del orden de 81.77, 94.65 y 95.79 % a un tiempo de contacto de 45, 90 y 180 minutos respectivamente, no mencionan si la destrucción se presentaba en huevos viables o no viables.

Rojas y Orta, (2000) aplicaron una concentración de 19 mg O₃ /min en fase gas durante 30 min. Observaron que el desinfectante no ocasionó efecto alguno sobre la estructura y viabilidad de los huevos fértiles de *A. suum* bajo esa dosis y ese tiempo de contacto ya que se encontraron larvas móviles dentro del huevo, al igual que en el testigo, no obstante los huevos no viables fueron destruidos por completo.

6.0 METODOLOGÍA

6.1 Pruebas experimentales

Las pruebas experimentales fueron divididas en tres fases, las cuales se detallan a continuación. El diagrama 1 muestra de una manera general la metodología seguida en todo el trabajo.

6.1.1 Primera fase

La primera fase de experimentos consistió en determinar si la aplicación de ozono causaba una disminución en la concentración de huevos de helmintos en muestras de agua contaminadas con éstos, así mismo establecer las mejores condiciones (dosificación y tiempo de contacto), con las cuales se lograba un óptimo resultado.

Para lo cual, se trabajó con muestras de 500 mL, estandarizadas en 40 huevos de helmintos/40 µL de muestra, a las cuales se les ajustó el pH a 5 ó 9 según fuera el caso. La ozonación se realizó por triplicado empleando dosis de 9.2 mg de O₃/min y 18.4 mg de O₃ /min, durante 4 horas. En esta fase de experimentos solo se trabajó con huevos de la especie *Ascaris suum*, los cuales fueron obtenidos a partir de hembras grávidas conseguidas en un rastro ubicado en el sur de la ciudad de México. La extracción de los mismos se realizó conforme se detalla en el Anexo I.

La cuantificación de huevos se realizó extrayendo 3 mL de las muestras sometidas a ozonación antes y durante las pruebas, cada hora durante las primeras tres horas y posteriormente cada media hora. Se colocaron en porta objetos para hacer un conteo representativo de huevos mediante el microscopio óptico marca Leitz modelo Laborlux-s.

El análisis de resultados se basó en un modelo factorial 2², que permitió evaluar la eficiencia del ozono para eliminar huevos de helmintos de las aguas contaminadas con éstos.

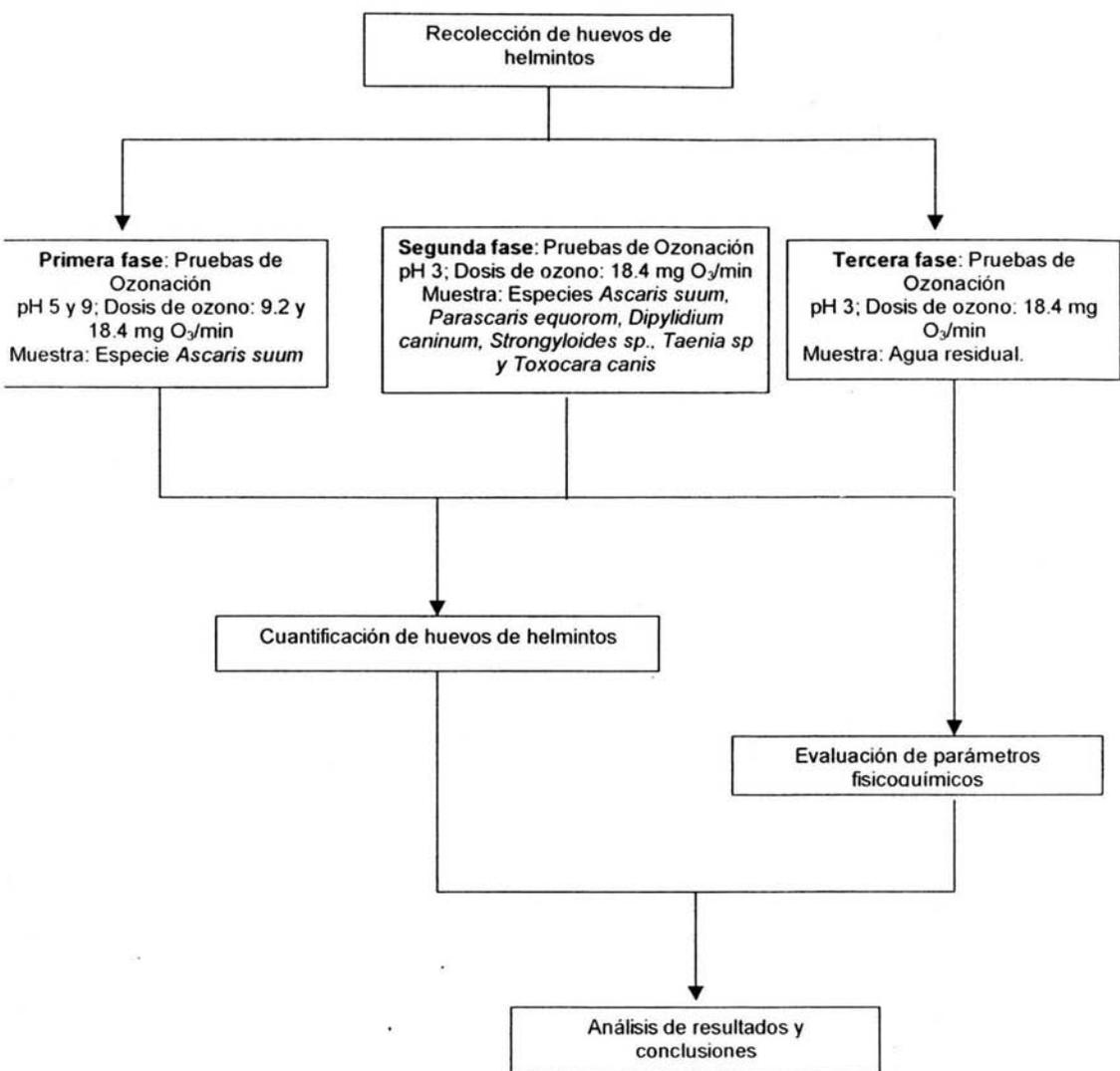


Diagrama 1. Metodología General

6.1.2 Segunda Fase

En esta fase las pruebas experimentales se realizaron a pH 3, con la finalidad de comparar este tratamiento con el llevado a cabo en la primera fase a pH 5 y determinar si un medio más ácido, podría hacer que la eliminación de huevos de helmintos se realizara en un tiempo más corto, que el determinado en la primera fase.

Se realizó, además, la ozonación de huevos de otras especies de helmintos, con el propósito de reforzar los resultados obtenidos en la primera fase en cuanto a la capacidad del ozono para eliminar éstos. Las especies de helmintos ozonadas fueron además de *Ascaris suum*, *Parascaris equorum*, *Dipylidium caninum*, *Strongyloides sp*, *Taenia sp* y *Toxocara canis*. La extracción de los huevos se realizó a partir de hembras grávidas, proporcionadas por el Laboratorio de Parasitología de la Facultad de Veterinaria, UNAM, siguiendo la técnica descrita en el Anexo I.

La ozonación de las muestras se llevó a cabo empleando un flujo de ozono de 18.4 mg O₃/min durante dos horas. Al igual que en la primera fase se trabajó con un volumen de muestra de 500 ml, estandarizadas en 40 huevos de helmintos/40 µL de muestra.

Los huevos de helmintos se cuantificaron de acuerdo a como se estableció en la primera fase de experimentos, debido a que el tiempo de ozonación disminuyó y con la finalidad de tener un mejor seguimiento de la variación de la concentración de huevos en las muestras, el conteo se realizó cada 15 minutos, durante las dos horas que duraron las pruebas experimentales.

Los resultados fueron analizados estadísticamente empleando un modelo unifactorial de efectos fijos, con el cual se estableció la comparación entre tratamientos.

6.1.3 Tercera fase

La tercera fase consistió en la ozonación de muestras de agua residual, las cuales se obtuvieron a partir de muestreos que se realizaron en la planta de tratamiento de Cerro de la Estrella, ubicada en Av. San Lorenzo 312 Colonia San Juan Xalpa.

Dicha planta trata agua residual con contenido de residuos industriales y de uso doméstico, el agua procedente del tratamiento es destinada principalmente para riego de áreas verdes, en la industria como refrigerante y para verter en los canales de Xochimilco.

La planta opera de acuerdo a un tratamiento de tipo terciario en el cual se llevan a cabo los siguientes pasos: Cribado, Desarenado, Sedimentación primaria, Tratamiento Biológico, sedimentación secundaria, filtración y desinfección.

El agua que se sometió al proceso de ozonación fue tomada del punto correspondiente a antes de la filtración. Las pruebas experimentales se realizaron empleando dos valores de pH 5 y 3 en la muestra y dosis de ozono de 18.4 mg de O₃/min, durante una hora. Además fueron evaluados parámetros microbiológicos de microorganismos indicadores (coliformes fecales y totales) y fisicoquímicos como: pH, alcalinidad, sólidos totales, turbiedad, DBO₅, y DQO, cada 15 minutos durante todo el tiempo que duró la prueba.

6.1.3.1 Medición de parámetros fisicoquímicos

1.- Las pruebas de turbiedad (NTU) se midieron con un turbidímetro (equipo Hach, modelo 2100P turbidimeter).

2.- La prueba de sólidos disueltos totales se determinó por conductimetría (equipo Hach Conductivity/TDS meter, modelo P/N 44600-00).

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

4.- Para las determinaciones de DQO se utilizó el método colorimétrico (equipo digestor para DQO HACH COD reactor y espectrofotómetro HACH DR/2000 Direct reading spectrophotometer).

5.- La medición de alcalinidad se realizó de acuerdo a como está especificado en la Norma Mexicana 036 (NMX-AA-036-SCFI-2001)

6.- La medición de la DBO_5 se realizó empleando la técnica establecida en la Norma mexicana 030 (PROY-NMX-AA-030-1981)

La cuantificación de coliformes fecales y totales se realizó empleando la técnica de filtro de membrana. La cuantificación de huevos de las muestras de agua residual y ozonada se realizó de acuerdo a como lo establece la Norma Mexicana 036. El conteo solo se hizo al inicio y al final de la ozonación.

6.2 Ozonador

Todas las pruebas experimentales de cada fase se realizaron empleando un ozonador con un Generador EMERGY TRAILIGAZ LABO 76 con una concentración de ozono en fase gas a la entrada del reactor de 36 mg O₃/min. Se adaptó al ozonador un medidor de flujo el cual permitió tener un control de la cantidad de ozono que se administró en la muestra, así como de un dispositivo con solución de KI al 2% que permitió atrapar el ozono que no se retenía en la misma (ozono de salida, ver figura 2).

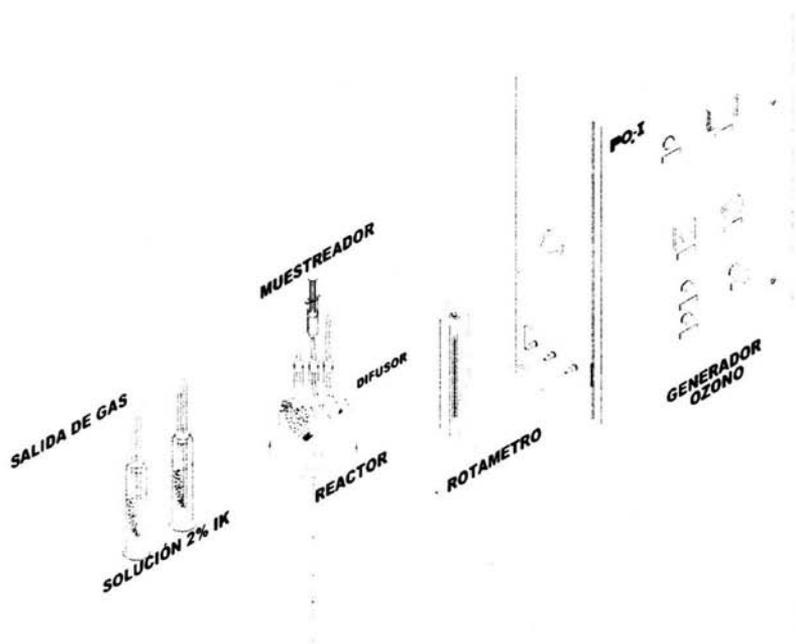


Figura 2. Sistema de tratamiento con ozono.

6.3 Cuantificación de ozono

La determinación de ozono en fase gas y en fase acuosa se realizó de acuerdo a como lo establecen los métodos yodométrico (Birdsall *et al.*, 1952) y de índigo (Bader y Hcigné, 1981), respectivamente.

6.3.1 Método Yodométrico

La determinación de ozono en fase gas se basa en el poder de desplazar al yodo a diferente pH de una solución de yodo alcalina. La reacción involucrada es:



El yodo liberado es titulado con una solución de tiosulfato de sodio, utilizando almidón como indicador para acentuar el punto final. La técnica se describe en el Anexo II.

6.3.2 Método de índigo

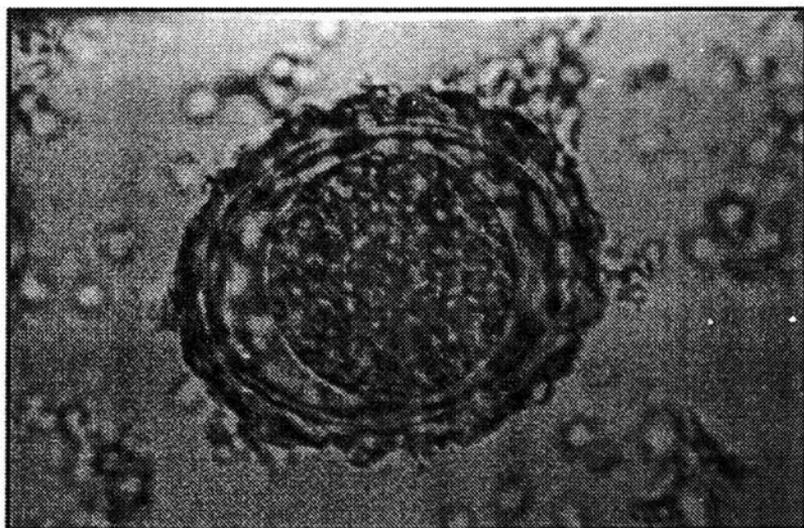
La determinación de ozono en fase acuosa se realizó mediante un método espectrofotométrico, en el cual se monitoreó la decoloración de una solución de reactivo de índigo, solución de un color azul oscuro, causada por el ozono presente en el medio mediante lecturas de absorbancia a 600 nm. La disminución de la absorbancia es lineal con el incremento de la concentración de ozono en el medio. La técnica se describe en el Anexo II.

7.0 RESULTADOS

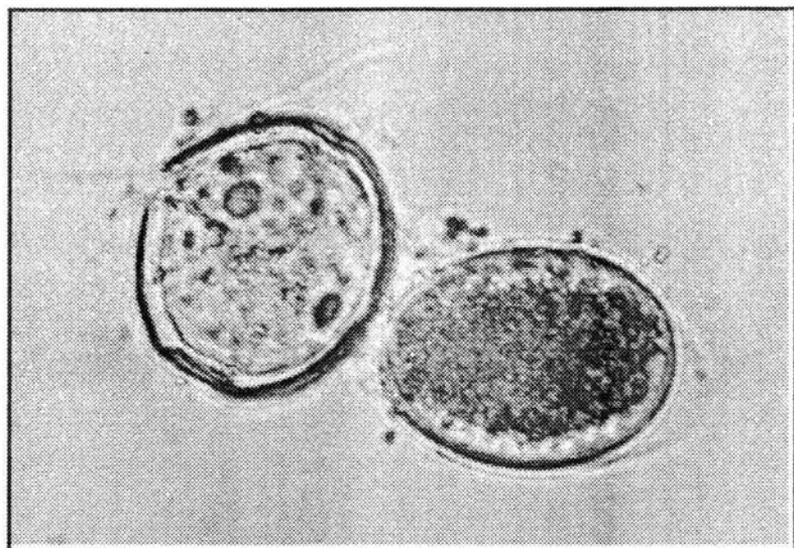
7.1 Primera Fase

En todas las combinaciones de pH y dosis de ozono con las que se realizaron las pruebas experimentales, se pudo observar que a medida que el tiempo de ozonación avanzaba, la cantidad de huevos de helmintos era menor.

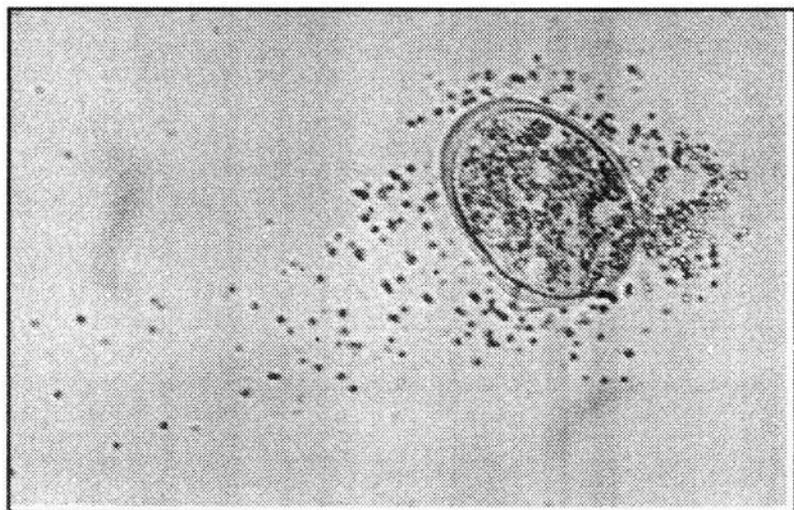
La cuantificación se realizó usando como herramienta el microscopio óptico, por lo que además se pudo observar que los huevos de helmintos eran dañados por el ozono en su estructura, hasta llegar a una lisis total del mismo (fotografías 1-3).



Fotografía 1. Huevo de *Ascaris suum* sin tratamiento



Fotografía 2. Huevo de *Ascaris suum* después de una hora de ozonación



Fotografía 3. Huevo de *Ascaris suum* en proceso de desintegración

Como es reportado por Rojas (1998), el huevo está formado por tres capas: una capa lipídica interna (denominada capa ascarósida), una capa quitinosa intermedia y una capa vitelina externa, mismas que le confieren su alta resistencia a condiciones adversas del medio, por lo que nos sugiere que el ozono ataca directamente estas capas, provocando que el huevo pierda poco a poco su rígida estructura, hasta llegar a su completa destrucción.

7.1.1 Pruebas experimentales pH 5

Las pruebas realizadas a pH 5, mostraron una clara disminución de la cantidad de huevos de helminto original conforme la cantidad de ozono presente en el medio (ozono residual) iba en aumento (Figuras 3 y 4).

En ambos tratamientos (flujo de ozono de 9.2 y 18.4 mg O₃/min), se observó que la primera hora de ozonación fue determinante para la destrucción de los huevos, ya que durante esta hora se da la mayor eliminación, alcanzándose una eliminación completa después de dos horas de ozonación, en ambos casos.

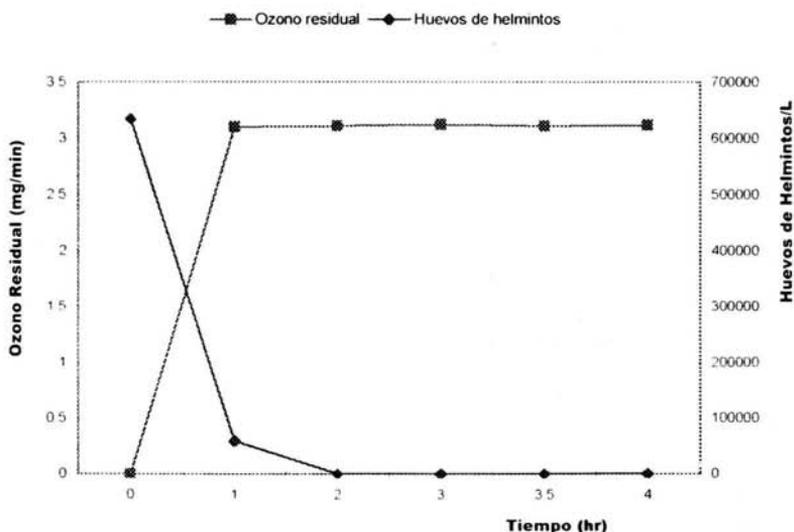


Figura 3. Efecto de la dosis de ozono aplicado en fase gas en la oxidación de huevos de helmintos pH 5 ; 9.2 mg O₃/min

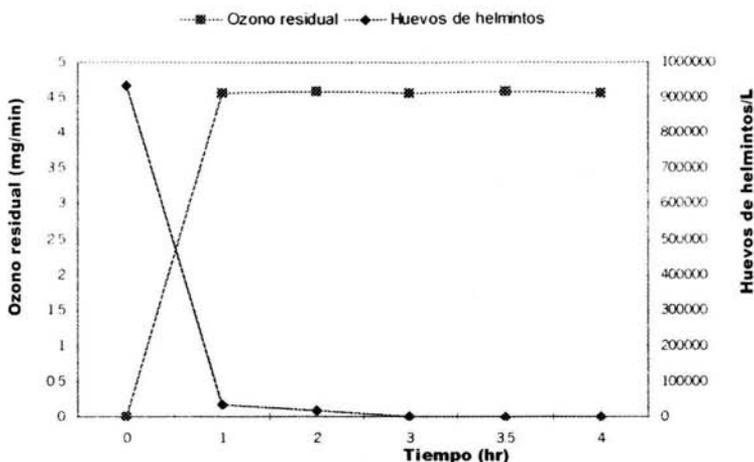


Figura 4. Efecto de la dosis de ozono aplicado en fase gas en la oxidación de huevos de helmintos pH 5 ; 18.4mg O₃/min

El ozono residual alcanzó valores de 4.5 mg O₃/min, después de la primera hora de ozonación en el tratamiento realizado con un flujo de alimentación de 18.4 mg O₃/min, mientras que para el realizado a 9.2 mg O₃/min, fue de 3.1 mg O₃/min, manteniéndose dichos valores constantes durante el resto del tiempo que duró la prueba, este comportamiento probablemente se debió a que durante la primera hora de ozonación se da la mayor eliminación de huevos y por tanto es durante este tiempo que la demanda de oxidante es mayor, pero después de esta hora el ozono comienza a acumularse en el medio ya que la demanda de éste disminuye debido a que la cantidad de huevos presente en la muestra es mucho menor que la inicial, lo que conlleva a tener una cantidad constante de ozono residual en la muestra.

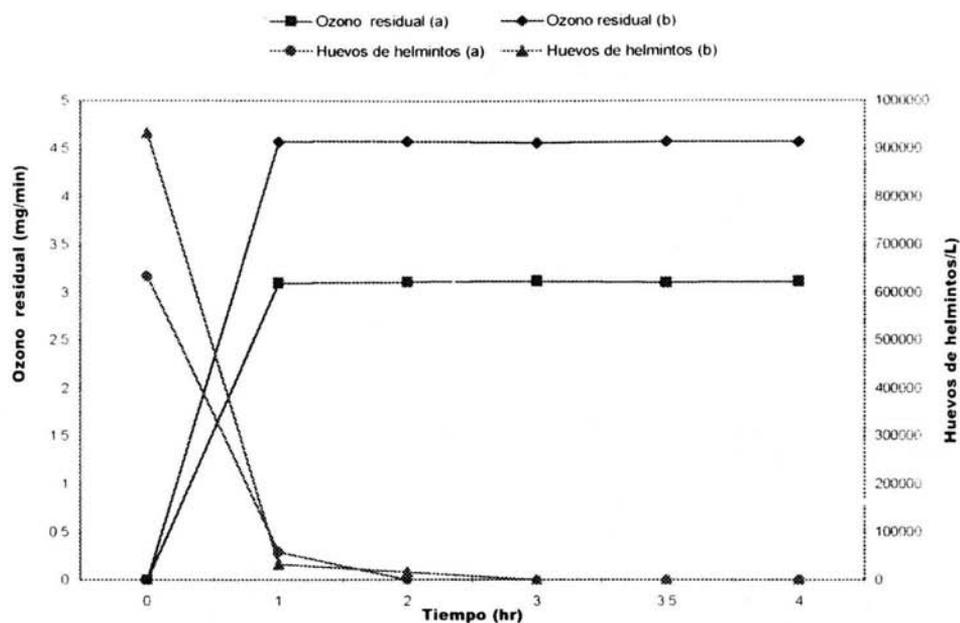


Figura 5. Efecto de la dosis de ozono aplicado en fase gas en la oxidación de huevos de helmintos (a) 9.2 mg O₃/min; (b) 18.4 mg O₃/min. pH inicial de reacción 5.0

La mejor eliminación de huevos, en estos dos tratamientos, se dio en la ozonación realizada con un flujo de ozono de 18.4 mg O₃/min (figura 5), debido a que en la primera hora de ozonación, ya se había eliminado 96% de la concentración inicial.

En las pruebas realizadas con 9.2 mg O₃/min la disminución de la concentración inicial fue de un 90%, aún cuando la concentración de la que se partió fue menor en este último, probablemente esta es la razón por la que cumplidas las dos horas de ozonación, ya no se detectaron huevos en éste último tratamiento, mientras que en el realizado con 18.4 mg O₃/min aún se encontraron huevos.

7.1.2 Pruebas experimentales pH 9

Las muestras ozonadas con pH 9, mostraron, al igual que las realizadas a pH 5, una disminución de la cantidad inicial de huevos de helminto, pero a diferencia de éstas últimas el tiempo requerido fue mayor, ya que como se puede observar en las figuras 6 y 7, la presencia de huevos fue detectada durante las cuatro horas de ozonación y en ninguno de los dos tratamientos se llegó a una eliminación total.

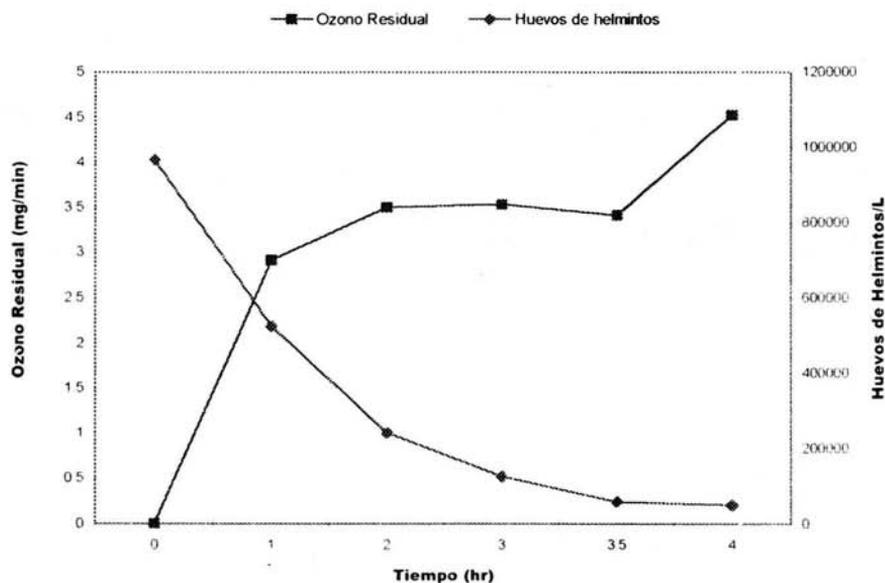


Figura 6. Efecto de la dosis de ozono aplicado en fase gas en la oxidación de huevos de helmintos. pH 9 y 9.2 mg O₃/min.

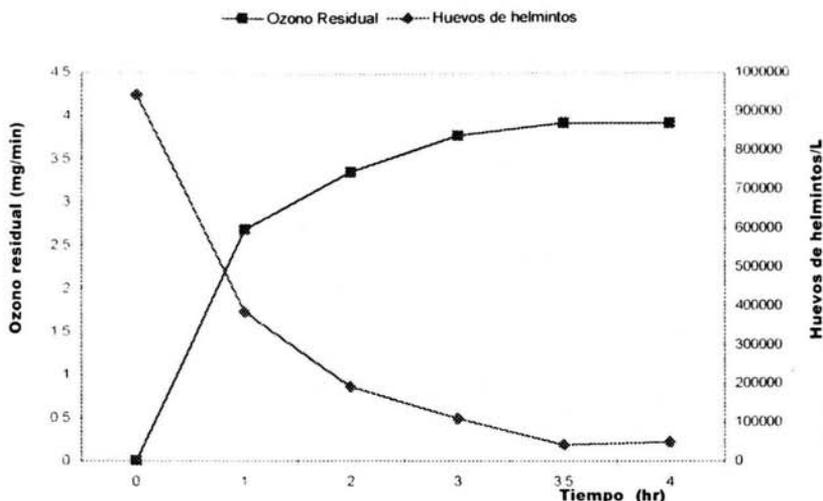


Figura 7. Efecto de la dosis de ozono aplicado en fase gas en la oxidación de huevos de helmintos pH 9 y 18.4mg de O_3 /min.

A diferencia de las pruebas realizadas a pH 5, en estas pruebas el ozono residual no alcanzó un valor constante en el medio, esto probablemente se debió a que la eliminación de huevos de helmintos se realizó en una forma más lenta lo que conllevó a tener una demanda del oxidante durante todo el tiempo que duraron las pruebas. Esto impidió que el ozono se acumulará en el medio. Como se observa en las figuras 6 y 7 el valor de ozono residual comienza a ser mayor a medida que la cantidad de huevos disminuye.

Los valores alcanzados de dicho parámetro fueron de 2.9 mg de O_3 /min después de la primera hora de ozonación y de 4.5 mg de O_3 /min al término de la misma, para el tratamiento llevado a cabo con un flujo de alimentación de 9.2 mg de O_3 /min, para el realizado con 18.4 mg de O_3 /min fueron de 2.6 mg de O_3 /min después de la primera hora de ozonación y de 3.9 mg de O_3 /min al término de la misma.

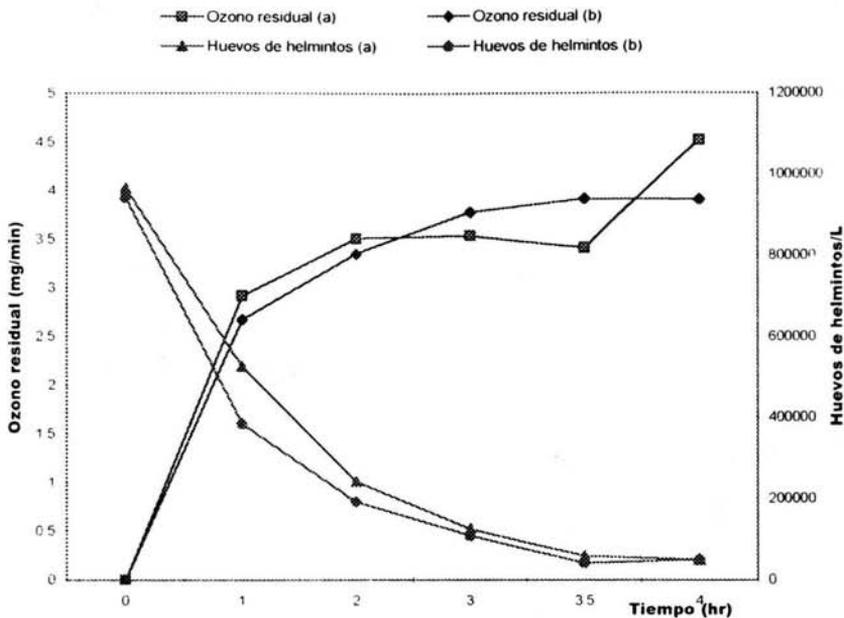


Figura 8. Efecto de la dosis de ozono aplicado en fase gas en la oxidación de huevos de helmintos (a) 9.2 mg O₃/min (b) 18.4 mg O₃/min. pH inicial de reacción 9.0

Basados en los resultados obtenidos y en la información teórica obtenida podemos decir que el pH ácido ayuda a que el ozono pueda actuar en una reacción directa como ozono molecular lo cual conlleva a tener una mayor cantidad de oxidante disponible para realizar la eliminación de los huevos. Esto contribuye a disminuir el tiempo de ozonación, en este caso después de las 2 horas ya no se detectó presencia de huevos, en cambio en las pruebas realizadas a pH 9 (condiciones básicas, ver Figura 8) después de tres horas se seguía observando la presencia de huevos, posiblemente por que en condiciones básicas el ozono se descompone en el agua y forma radicales oxidantes secundarios OH actuando de esta manera el ozono en una forma indirecta, lo cual retrasa la desintegración de los huevos.

7.1.3 Análisis Estadístico

El análisis de varianza (tabla 5) muestra que el pH es el principal factor que influye en la variación de resultados. Esto podría hacer pensar que dicho parámetro es el responsable directo de la destrucción de los huevos de helmintos.

Sin embargo conociendo por la literatura que los huevos son resistentes a condiciones adversas, entre las que se encuentran su inmersión en ácidos concentrados, aunado a que se requieren condiciones ácidas para incubarlos durante 21 días para que se desarrollen hasta su fase larval y demostrar así su viabilidad como lo marca la norma vigente Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996 (SEMARNAP, 1997), nos lleva a descartar lo anterior, por lo tanto lo que podríamos pensar es que la influencia del pH favorece el ataque del ozono en una forma molecular y directa y no tanto por la formación de radicales OH, lo que conlleva a una mayor oxidación de los huevos de helmintos como se mencionó anteriormente.

Tabla 5. Análisis de varianza (primera fase)

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Fo
pH	1	800	800	38.87**
Dosis de ozono	1	33	33	1.60
Interacción	1	16.33	16.33	0.79
Error	8	164.67	20.58	
Total	11	1014		

**altamente significativo

7.2 Segunda fase

7.2.1 Comparación pH 3 y 5

Se hizo una comparación de los tratamientos realizados a pH 5 y pH 3, con los resultados obtenidos en la especie *Ascaris suum*, debido a que la primera fase de experimentos se trabajó únicamente con huevos de esta especie.

La figura 9 muestra las curvas que representan la evolución de la disminución de la concentración de huevos de helmintos con cada uno de los tratamientos. La disminución de huevos durante la primera hora de ozonación es más marcada en el tratamiento realizado a pH 5 ya que se tuvo una eliminación del 96.5% de la concentración inicial de huevos. En cambio en el realizado a pH 3 la eliminación fue solo del 55%, sin embargo al finalizar la ozonación ya no fueron detectados huevos en éste último, no así en el realizado a pH 5, donde los huevos aún fueron detectados al finalizar la prueba.

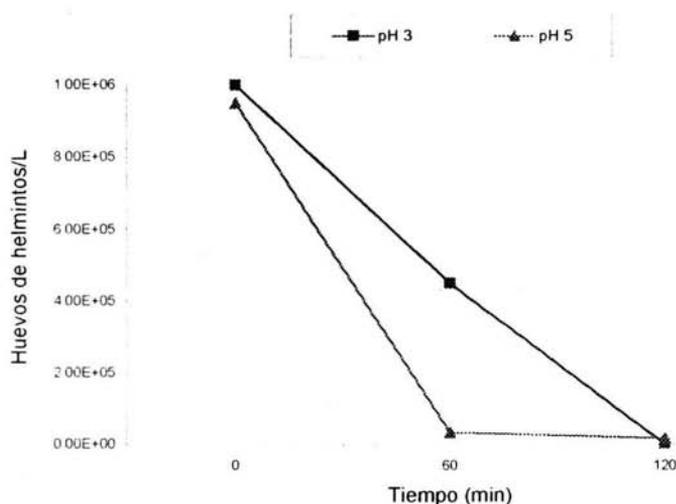


Figura 9. Ozonación de la especie *Ascaris suum* a pH 5 y 3, con dosis de ozono de 18.4 mg O₃/min.

7.2.2 Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó empleando un modelo unifactorial, que nos permitió comparar la eficiencia de la eliminación de huevos de helmintos entre la ozonación realizada a pH 5 y la realizada a pH 3,

La tabla 6 muestra los resultados del análisis de varianza realizado, como se observa, la F_0 obtenida fue altamente no significativa con un nivel de confianza del 99%. Esto quiere decir que ambos tratamientos tuvieron un comportamiento similar, lo que implica que un pH más ácido no favoreció la eliminación de huevos de helmintos en un menor tiempo.

Tabla 6. Análisis de varianza (segunda fase)

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Fo
PH	1	$2.50 \cdot 10^{09}$	$2.50 \cdot 10^{11}$	0.02**
Error	2	$2.45 \cdot 10^{11}$	$1.23 \cdot 10^{11}$	
Total	3	$2.48 \cdot 10^{11}$	$8.25 \cdot 10^{11}$	

** altamente no significativa

7.2.3 Ozonación de otras especies

El resultado de las pruebas experimentales evidenció, al igual que en la primera fase, una clara disminución de la cantidad de huevos de helmintos, en las muestras ozonadas de cada especie, dado por la presencia de ozono en el medio.

La figura 10 muestra el proceso de la eliminación de huevos para cada una de las especies ozonadas, en ésta se puede ver que para el caso de la especie *Ascaris suum*, el tiempo requerido para que la presencia de éstos no se detectara en la muestra fue de dos horas. En el caso de los huevos de las especies *Toxocara canis* y *Taenia sp* se puede observar que en un tiempo de 90 minutos la presencia de éstos ya no fue detectada. Con respecto a los huevos de la especie *Dipylidium caninum* y la especie *Parascaris equorum*, las dos horas de ozonación no fueron suficientes para eliminar totalmente los huevos presentes en la muestra, ya que éstos fueron detectados todo el tiempo que duró la prueba

experimental, no obstante la cantidad inicial de éstos disminuyó considerablemente al cabo del mismo, al sobrante de huevos se le realizó la prueba de viabilidad, dando una respuesta negativa en ambas especies.

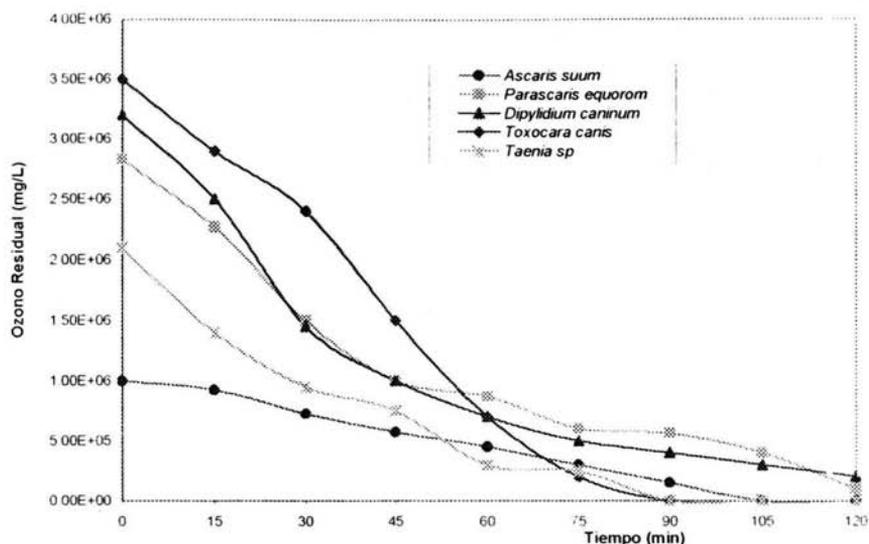


Figura 10. Ozonación de huevos de helmintos de distintas especies a pH 3 y 18.4 mg O_3 /min

En todos los casos se pudo observar que la primera hora de ozonación fue determinante para disminuir considerablemente la concentración de huevos en las muestras ozonadas, siendo los menos resistentes a la acción del ozono los huevos de las especies *Taenia sp* y *Toxocara canis* que mostraron una disminución de la concentración original del 86 y 80%, respectivamente. Los tiempos de inactivación para el 90% de la población inicial (t_{90}) variaron en el intervalo de 1 a 2 horas, dependiendo de la concentración inoculada y de la sensibilidad de los microorganismos

Se graficó el logaritmo de la concentración de huevos contra el tiempo para establecer la tendencia que sigue la disminución de éstos con respecto al tiempo para cada especie, encontrándose un comportamiento lineal para cada especie, con coeficientes de correlación (r) muy significativos siendo para *Ascaris suum* (0.97), *Dipylidium caninum*

(0.99). *Parascaris equorum* (0.90), *Tenia sp.* (0.96), el menos significativo fue el de *Toxocara canis* (0.86) (Figura 11). En todos los casos se presentó una cinética de primer orden, es decir una disminución de la concentración de huevos, a medida que la cantidad de ozono residual aumentaba en la muestra.

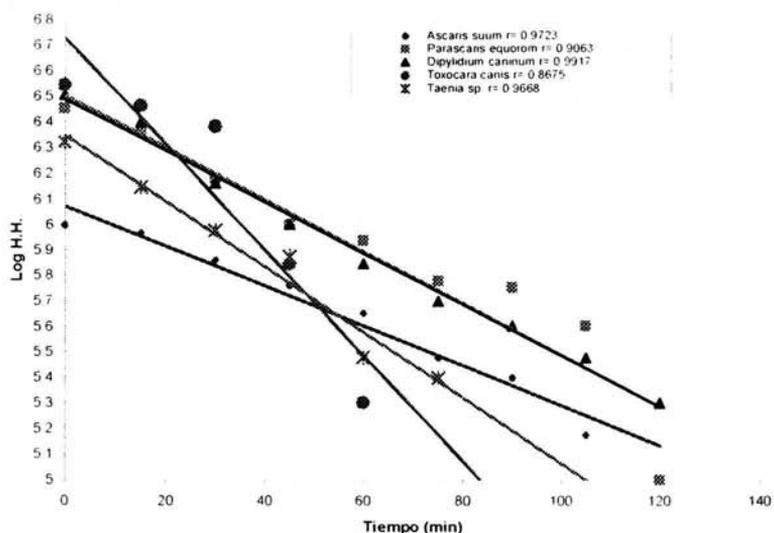


Figura 11. Resultados de la eficiencia de remoción de cinco especies de huevos de helmintos a pH ácido y a 18.4 mg O₃/min.

La representatividad que tienen las especies empleadas en la experimentación de los tres grandes grupos de helmintos de interés médico (tremátodos, nemátodos y céstodos) y la similitud a nivel estructural del huevo que presentan todas las especies de helmintos, podemos decir que es posible la utilización del ozono como una de las mejores alternativas para eliminar cualquier especie de huevos de helminto presente en un agua residual tratada.

7.3 Tercera Fase

La tercera fase de experimentos consistió, como bien se mencionó en la metodología, en ozonar muestras de agua residual, para lo cual se realizaron muestreos en la planta de tratamiento de Cerro de la Estrella. Las muestras fueron tomadas de tres puntos específicos de todo el tratamiento realizado en dicha planta, estos puntos fueron: Influyente, Antes del Filtro y Efluente.

7.3.1 Reconocimiento de la planta de tratamiento

A todas las muestras se les realizaron análisis fisicoquímicos y conteo de helmintos. Las pruebas realizadas y los resultados obtenidos se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Valores promedios de los parámetros fisicoquímicos y conteo de huevos de helmintos de los puntos de muestreo en la planta de tratamiento.

Parámetros	Influente	Antes del filtro	Efluente
Sólidos disueltos totales (mg/L)	310.00	289.00	292.56
Turbiedad (NTU)	68.57	7.22	7.78
DQO (Demanda Química de Oxígeno)	286.67	116.67	90.00
DBO ₅ (Demanda Bioquímica de Oxígeno)	31.85	4.07	-
pH	7.19	7.05	7.05
Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	151.67	115.33	118.33
Huevos de helminto (HH/L)	20	9	11

Como se puede observar el valor de las pruebas referentes a la DQO (demanda química de oxígeno), DBO (demanda bioquímica de oxígeno) y turbiedad, va disminuyendo a medida que el tratamiento en el agua residual se va dando. Estas pruebas están directamente relacionadas con la cantidad de materia orgánica presente en el agua

residual, por lo que a valores más altos de estos parámetros mayor cantidad de materia orgánica presente en el agua.

La DBO₅ se define como la cantidad de oxígeno empleado por los microorganismos a lo largo de un periodo de cinco días para descomponer la materia orgánica de las aguas residuales a una temperatura de 20 °C. De modo similar, la DQO es la cantidad de oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica por medio de dicromato en una solución ácida y convertirla en dióxido de carbono y agua, aún cuando ambas pruebas miden cantidad de oxígeno consumido. Se puede ver en la tabla 7 valores más altos en la DQO que en la DBO, esto debido a que no toda la materia orgánica presente en el agua va a poder ser asimilada por los microorganismos, por lo que siempre se esperan valores más altos de DQO que de DBO₅.

En cuanto a la alcalinidad, los sólidos disueltos totales y el pH, se mantienen constantes durante todo el tratamiento.

La cantidad de huevos de helmintos disminuye considerablemente a lo largo de todo el tratamiento, sin embargo entre las muestras tomadas antes del filtro y el efluente la diferencia no es mucha, en algunos casos fue mayor en ésta última. Esto debido a que durante la realización de los muestreos el filtro no estaba funcionando debido a una falla, como se reporta en la bibliografía, un buen funcionamiento del filtro puede llegar a retener hasta un 90% de los huevos de helmintos presentes en una determinada muestra, pero al no funcionar, pasaron íntegros al efluente, detectándose su presencia.

7.3.2 Pruebas experimentales

Las pruebas experimentales, como bien se mencionó en la metodología, se realizaron ozonando muestras de agua residual correspondientes a antes de la filtración. Las condiciones de ozonación fueron 18.4 mg O₃/min, durante una hora, empleando dos valores de pH 5 y 3, esto porque aún cuando las pruebas experimentales realizadas en la segunda fase determinaron que un pH 5 era el más adecuado para la eliminación de helmintos, otras especies diferentes a *Ascaris suum* fueron ozonadas a pH 3, por lo tanto lo que se buscó fue corroborar que efectivamente no hubiera diferencia entre ambos tratamientos en cuanto a la eliminación de helmintos se refiere.

7.3.2.1 Efecto en huevos de helmintos

La cuantificación de huevos de helmintos se realizó de acuerdo a como está establecido en la Norma Mexicana 036, y solo se hizo al inicio y al final de la ozonación, esto porque la cantidad de muestra que se requiere para cuantificarlos, no permitió realizarlo cada 15 minutos.

Las figuras 12 y 13 muestra la variación de la cantidad de huevos de helmintos encontrados en el Influyente, la muestra antes de la ozonación y después de la misma. Como se observa en la gráfica, es clara la disminución que se tiene de los huevos de helmintos conforme el agua va pasando por los diferentes sistemas de tratamiento.

Con respecto a las pruebas de ozonación realizadas se observa en la gráfica que con ambas pruebas se tiene una disminución considerable de la cantidad de huevos inicial, alcanzando valores similares en ambas pruebas. La eliminación de huevos que se tiene para el tratamiento realizado a pH 5 es del 93.7 % de la cantidad inicial, mientras que para el tratamiento realizado a pH 3 la eliminación que se tuvo fue del 90% de la inicial.

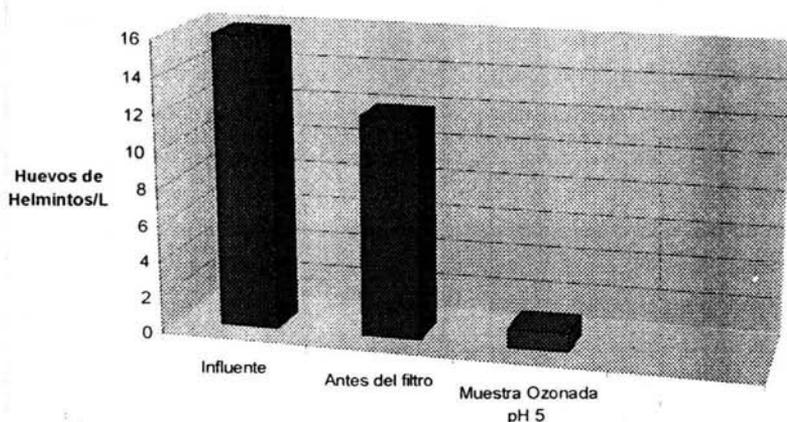


Figura 12. Evolución de la eliminación de huevos de helmintos, empleando como desinfectante ozono. Condiciones de ozonación 18.4 mg O₃/min; pH 5.

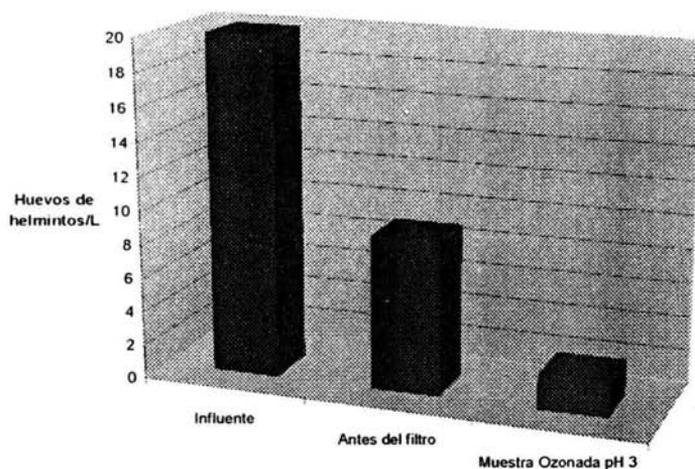


Figura 13. Evolución de la eliminación de huevos de helmintos, empleando como desinfectante ozono. Condiciones de ozonación 18.4 mg O₃/min; pH 3.

La normativa mexicana (NOM-001-ECOL-1996), establece valores límite de huevos de helmintos que deben contener las aguas residuales tratadas destinadas para riego, siendo de 1 HH/L para riego restringido y 5 HH/L para riego no restringido. En el tratamiento realizado a pH 5 se alcanzaron valores de huevos de helmintos de 1 HH/L, mientras que para el realizado a pH 3 el valor alcanzado fue de 2 HH/L, esto indica que la desinfección de aguas residuales con ozono permitirá tener un buen control de estos microorganismos, que conllevará a una reducción de los riesgos a la salud implicado por su presencia en las aguas residuales tratadas.

7.3.2.2 Parámetros fisicoquímicos

Los parámetros fisicoquímicos evaluados durante el proceso de ozonación y los valores promedios obtenidos de cada uno de ellos se muestran en la tabla 8.

Tabla 8. Monitoreo de parámetros fisicoquímicos durante el proceso de ozonación.

Parámetros	Aplicación de ozono									
	Tiempo (min)									
	pH 5					pH 3				
	0	15	30	45	60	0	15	30	45	60
SDT (mg/L)	351.22	544.00	545.11	544.11	541.11	677.50	669.00	672.50	672.50	671.00
Turbiedad (NTU)	8.42	3.30	2.74	2.62	2.66	3.46	1.43	1.67	1.04	0.97
DQO	113.33	113.33	93.33	126.67	90.00	78.00	79.00	73.50	70.50	71.00
DBO ₅	4.07	2.13	1.98	1.73	1.93	2.24	0.53	0.57	0.37	0.57
pH	5	5	5	5	5	3	3	3	3	3
Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	6.50	5.50	5.50	5.00	5.00	nd	nd	nd	nd	nd

* la cuantificación de los parámetros fisicoquímicos se realizó cada 15 minutos durante el tiempo que duraron las pruebas

En particular se puede apreciar en la gráfica (Figura 14), que la DBO₅ disminuye considerablemente su valor inicial después de la ozonación, en ambos tratamientos, la DQO disminuye también pero en menor proporción que la DBO₅. El valor de estos parámetros disminuye debido a que el ozono es un agente oxidante muy fuerte, y por lo tanto la materia orgánica presente en el agua es oxidada muy fácilmente, lo que conlleva a que haya una menor cantidad de ésta a medida que la ozonación se va dando.

La norma mexicana NOM-001-ECOL-1996, establece que las aguas residuales destinadas para riego agrícola exhiban un valor máximo permisible de 150 de DBO₅, no mencionando nada al respecto de la DQO. En las pruebas realizadas, los valores determinados de DBO₅ fueron de 1.93, para la realizada a pH 5 y de 0.57 para la realizada a pH 3, ambos valores se encuentran por debajo del límite máximo permisible para este parámetro, lo que indica

que la cantidad de materia orgánica oxidable por microorganismos que queda después de un proceso de ozonación es muy poca.

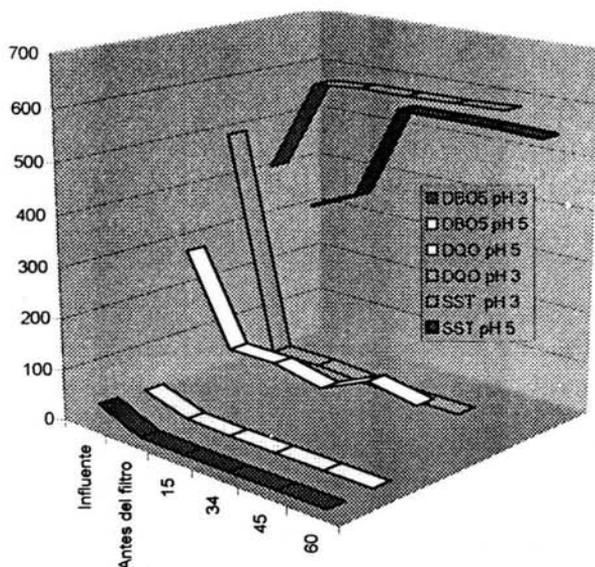


Figura 14. Variación de los parámetros fisicoquímicos en el tratamiento de agua residual empleando como desinfectante ozono. Condiciones de ozonación pH 3 y pH 5; 18.4 mg O₃/min.

Los sólidos disueltos totales, se midieron antes de ajustar el pH y después de ajustarlo, tomando éste último valor como el tiempo 0 en el proceso de ozonación. De acuerdo a lo mostrado en la gráfica (Figura 14) y los valores reportados en la tabla 8, observamos un aumento en el valor de los sólidos suspendidos totales al término de ajustar el pH. Esto se debe al hecho de que este parámetro fisicoquímico se mide indirectamente con la conductividad de la muestra, ya que se basa en el supuesto de que la materia disuelta se encuentra en su mayoría en forma de iones, los cuales al tener carga conducirán la corriente eléctrica, por lo que a valores más altos de conductividad se espera una mayor cantidad de materia disuelta en la muestra. Con lo mencionado es lógico que las muestras a las cuales se le ajustó el pH den valores más altos en este parámetro debido a que hay

un aumento en la cantidad de iones original dado por los iones H^+ en solución, provenientes del ácido.

En cuanto al comportamiento de éste parámetro durante el proceso de ozonación se observó, de acuerdo a lo mostrado en la figura 14, un aumento del valor inicial en el tratamiento realizado a pH 5 durante los primeros quince minutos, para después mantener un valor constante, el tiempo restante de la prueba. El tratamiento llevado a cabo a pH 3, no mostró una variación considerable manteniendo un valor constante durante la hora de ozonación.

El valor inicial de la turbiedad disminuyó considerablemente durante el proceso de ozonación en ambos tratamientos, en total disminuyó un 68.4% del valor inicial, para la ozonación realizada a pH 5 y 72% para la realizada a pH 3, esto debido a que la muestra de agua inicial aún contiene un poco de color y sólidos suspendidos en solución, lo cuales desaparecen después de la ozonación, esto conlleva a tener un agua más transparente y de mejor aspecto que la inicial (Figura 15).

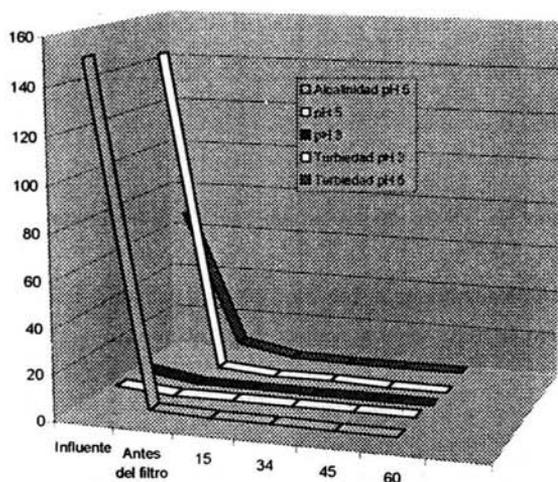


Figura 15. Variación de los parámetros fisicoquímicos en el tratamiento de agua residual empleando como desinfectante ozono. Condiciones de ozonación pH 3 y pH 5; 18.4 mg O_3 /min.

La norma mexicana NOM-001-ECOL-1996, establece un límite en el valor de pH para aquellas aguas destinadas para riego agrícola, estableciendo valores que se encuentren en el intervalo entre cinco y diez, como óptimos para un agua tratada que tenga dicho fin. El valor de este parámetro se mantuvo constante durante todo el tiempo que duró la prueba, en ambos tratamientos, pero de éstos el único que cumple con lo especificado en la norma es el que se llevó a cabo a pH 5, por lo tanto este parámetro puede ser el decisivo para concluir cual de los dos tratamientos es el mas viable de establecer en una planta de tratamiento de aguas residuales, para obtener un efluente de acuerdo a como lo establece la normativa mexicana (NOM-001-ECOL-1996).

Otro parámetro importante de monitorear es la alcalinidad, definida como la presencia de sustancias hidrolizables en agua y que como producto de hidrólisis generan el ión hidroxilo (OH), como son las bases fuertes y los hidróxidos de los metales alcalinotérreos. Estos contribuyen también de forma importante a la alcalinidad los carbonatos y los fosfatos (NMX-AA-036-SCFI-2001). Aún cuando este parámetro no está regulado por la normativa mexicana (NOM-001-ECOL-1996), ya que no mencionan un límite máximo permisible en aguas destinadas para riego agrícola.

Catalán (1969), hace mención que aguas cuyo residual de carbonatos sea mayor a 108.7 ppm, no son buenas para riego, cuando esté comprendido entre 108.7 ppm y 66.25 ppm son dudosas y son buenas si el contenido es inferior a 66.25 ppm. El valor de este parámetro disminuyó considerablemente (pH 5), hasta ser no detectable por la técnica empleada (pH 3) una vez que se ajustó el pH, manteniéndose constante durante el tiempo que duró la prueba de ozonación, en ambos casos (Figura 11).

7.3.2.3 Microorganismos indicadores

En las especificaciones dadas por la normativa mexicana (NOM-001-ECOL-1996), se establece a los coliformes fecales como microorganismos indicadores del nivel de microorganismos patógenos presentes en un agua residual determinada. El número máximo permisible, de estos microorganismos para descargas destinadas para riego es de 1000 a 2000 UFC de coliformes fecales/ 100 ml de muestra.

Las figuras 16 y 17 muestran los resultados del monitoreo de los coliformes fecales y totales en las muestras de agua residual antes y durante la ozonación en ambos tratamientos (pH 3 y pH 5). En ambas gráficas se puede observar que para los dos tratamientos que se realizaron, después de 15 minutos de ozonación la presencia de los microorganismos indicadores ya no fue detectada. Esto indica que el agua residual tratada desinfectada con ozono poseerá una calidad microbiológica aceptable dentro de los límites que marca la normativa mexicana, y que por tanto el destino de esta agua para riego agrícola no presentará ningún tipo de riesgo para la salud, en los productos regados con esta agua.

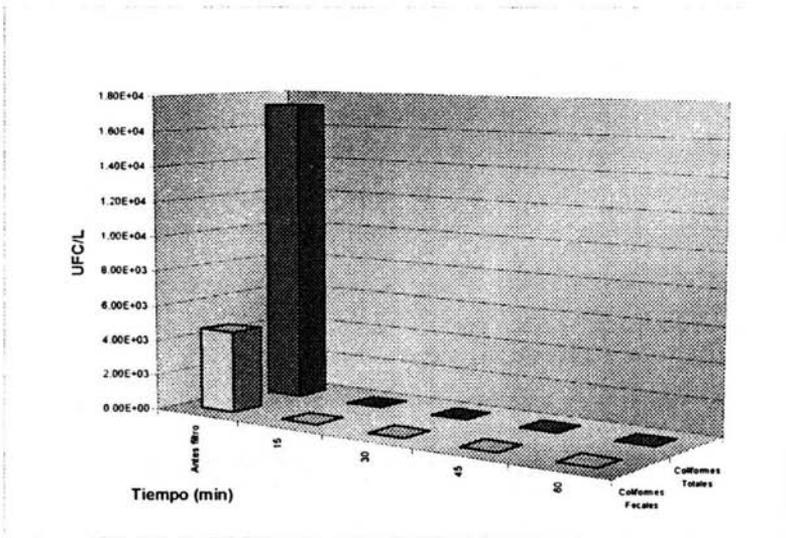


Figura 16. Seguimiento de indicadores microbiológicos (coliformes totales y coliformes fecales) durante la ozonación a pH 5 y 18.4 mg O₃/min.

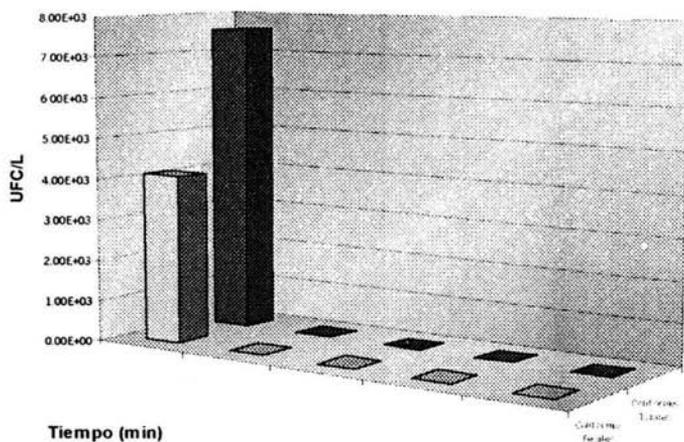


Figura 17. Seguimiento de indicadores microbiológicos (coliformes totales y coliformes fecales) durante la ozonación a pH 3 y 18.4 mg O₃/min.

8.0 CONCLUSIONES

- Durante la primera fase de experimentos, la mejor eliminación de huevos se dio en las pruebas experimentales realizadas a un pH 5 y un flujo de ozono de 18.4 mg O₃/min, en un tiempo de dos horas, siendo determinante la primera hora de ozonación, ya que es en esta donde la concentración de huevos disminuye en mayor cantidad.
- De acuerdo con el análisis estadístico empleado, en la primera fase de experimentos, el pH ácido favorece la eliminación de huevos de helmintos, ya que contribuye a un ataque del ozono en forma de molécula, lo que conlleva a una mayor eficiencia en la oxidación de los huevos.
- La comparación estadística que se realizó entre los tratamientos realizados a pH 5 y 3, en la especie *Ascaris suum*, mostró que no había una diferencia significativa entre dichos tratamientos.
- La ozonación de huevos de otras especies de helmintos a pH 3 con una dosis de ozono de 18.4 mg O₃/min se dio en un tiempo máximo de dos horas, dándose la mayor eliminación de huevos durante la primera hora de ozonación.
- De las especies ozonadas la que presentó una menor resistencia a la ozonación fueron los huevos de la especie *Toxocara canis*, en un tiempo máximo de 90 minutos, al igual que los de la especie *Taenia sp*. Las más resistentes fueron la especie *Parascaris equorum* y *Dipylidium caninum*.
- La similitud a nivel estructural del huevo que tienen las especies de helmintos, nos permite generalizar los resultados obtenidos, para afirmar que de acuerdo a éstos es posible el empleo del ozono como desinfectante, para eliminar cualquier especie de huevos de helmintos presente en un agua residual tratada.
- La ozonación de agua residual tratada a pH 5 mostró una eliminación de huevos del 93.7 % de la cantidad inicial, mientras que para el tratamiento realizado a pH 3 la eliminación que se tuvo fue del 90% de la inicial.

- Tanto la DBO_5 como la DQO disminuyen su valor inicial al final de la ozonación, en ambos tratamientos, esto debido a la oxidación de la materia orgánica presente en el agua, dado por el ozono.
- El valor de sólidos disueltos totales aumentó considerablemente su valor como consecuencia del ajuste de pH en las muestras, no mostrando una variación considerable dicho valor durante la ozonación, en ambos tratamientos.
- El valor inicial de la turbiedad disminuyó considerablemente a lo largo de la ozonación.
- El pH y la alcalinidad se mantienen constantes a lo largo de todo el proceso de ozonación.
- En cuanto a la calidad microbiológica del agua ozonada, no se registró presencia de microorganismos indicadores (coliformes fecales y totales) después de los quince minutos de iniciada la prueba de ozonación, en ambos tratamientos.
- La cantidad de huevos de helmintos disminuyó en las muestras ozonadas de agua residual, alcanzando valores de 1HH/L para el tratamiento realizado a pH 5 y de 2 HH/L para el realizado a pH 3, que entran dentro de los límites establecidos por la normativa mexicana (NOM-001-ECOL-1996) como seguros para aguas residuales tratadas destinadas para riego.
- Dado que la normativa mexicana restringe el valor de pH de un agua destinada para riego, el tratamiento que es más adecuado para utilizar es el realizado a pH 5 dado que este valor de pH entra dentro del rango especificado en la normativa mexicana (NOM-001-ECOL-1996).
- Las mejores condiciones de ozonación que permitieron tener un agua residual tratada adecuada para riego agrícola de acuerdo a lo que especifica la normativa mexicana (NOM-001-ECOL-1996) se dió a un pH de 5 con un flujo de ozono de 18.4 mg O_3 /L, durante una hora de ozonación.

9.0 BIBLIOGRAFÍA.

Bader, H., Hoigné, J. (1981). "Determination of ozone in water by the indigo method." *Water Res.* Vol. 15, No 4. Págs. 449-456.

Birdsall, C., Jenkins, A. C., y Spandinger, E. (1952). "Iodometric determination of ozone." *Anal. Chem.* Vol. 24 No 4. Págs 110-112

Catalán, L. Jose G. (1969). "Química del agua" Edit. Blume Barcelona, España Pág 311.

Chirstman, Keith A. (2002). "Calidad del agua: Desinfección efectiva, cloro" *Consejo de Química del Cloro*, Arlington, VA, EUA. Págs 1-16.

Cifuentes, E. (1993). "Problemas de salud asociados al riego agrícola con agua residual en México". *Salud Pública* Vol. 35. Págs 614-619.

Cifuentes, E. (1994). "Escenario epidemiológico del uso agrícola del agua residual: El valle del Mezquital". *Salud Pública* Vol. 36. Págs. 3-9.

Gamboa, R. R. y Dipietro, Joseph A. (1996). "Ozone treatment of *Ascaris suum* eggs" <http://www.life.uiuc.edu/hughes/undergrand-prog/abstractas/spring-96/gamboa.html>

Garay, P.N. y Cohn, F. M. (1992). "High-Quality Industrial Water Magnament" *Manual: The Fairmont Press*, Georgia págs. 305-324.

Folleto informativo de tecnología de aguas residuales (1999). "Desinfección con ozono" *Environmental Protection Agency*, USA. Septiembre.

Lamothe, A. R. y Garcia, P. L. (1998). "Helmintiasis del hombre en México" A.G.T. Editor S.A., México, D.F. pág 1-128.

Langlais, B., Reckhow, D. A. y Brink, D. R. (1991). "Ozone in Water Treatment": *Application an Engineering*, (Chelsea, MI: Lewis Publisher Inc. USA). Págs.1-569

Maya, R. C., Salgado, V. G. y Jiménez C. (2000). "Frecuencia y variación estacional de los géneros de huevos de helmintos más comúnmente encontrados en aguas residuales de México". XII Congreso Nacional Ciencia y Conciencia No. 1. Págs. 704-713.

Montes, R. Raquel T., (2000). Estudio de los procesos avanzados de ozonación y adsorción con carbón activado para la potabilización de agua." Tesis de licenciatura. Facultad de Química, UNAM.

Organización Mundial de la Salud (2001). "Acción Contra las Infecciones: Saneamiento y Diarrea" Vol. 2 (7), noviembre/diciembre.

Orta de Velázquez, T.; Rojas, V. N.; Martínez, J. L. y Monje, R. I. (2001). "Destruction of helminths eggs by ozone" *Internacional Ozone Association*. Proceedings of the 15th World Congress -10th to 15th September. London. Vol. 2. Págs. 352-355.

Rakness, K. L.; Corsaro, K. M; Hale, G. and Blank, B. D. (1993). "Wastewater Desinfection with Ozone Process Control and Operation Results" *Ozone: sci. eng.* Vol.15 No. 6 Págs. 497-514.

Reynolds, Kelly A., (2002^a). "Desinfección con cloro y Riesgos de los productos derivados de la desinfección". *Agua Latinoamericana*. Pág. 46-48.

Reynolds, Kelly A., (2002^b). "Tratamiento de aguas residuales en Latinoamérica". *Agua Latinoamericana*. Septiembre-Octubre Págs. 1-4.

Rice, R. G. (1999). "Ozone in the United States of America – State of the Art" *Ozone Sci. Eng.*, Vol 21 No 2. Págs. 99-118.

Rojas, V. M. N., Galván, G. M. y De Victorica A. J. (1998). "Aplicación de colorantes biológicos para determinar la viabilidad de huevos de *Ascaris suum* (Helmintos)" *Rev. Ingeniería y Ciencias Ambientales*. Año 10. No. 35 Págs. 22-27

Rojas, V. M. N. (1998). "Técnica de tinción rápida para determinar la viabilidad potencial de algunos huevos de helmintos." *Rev. Ingeniería y Ciencias Ambientales*. Año 10. No. 38. Págs. 22-26.

Rojas, V. M. N. (1998). "Evaluación de la factibilidad de utilizar colorantes biológicos para determinar la viabilidad de los huevos de helminto". Tesis de Maestría. Facultad de ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.

Rojas, V. M. N. y Orta, L. T. (2000). "Resistencia de los huevos de helmintos a la desinfección con ozono y luz ultravioleta". *Revista Tláloc AMH*. No. 18. Págs. 23-24.

Rojas, V. M. N. (2002). "Avances en la desinfección de aguas residuales para eliminar huevos de helmintos y otros microorganismos." *Ingeniería Sanitaria y Ambiental. AIDIS Argentina*. Enero / Febrero págs. 67-74.

Secretaría Del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (1997). Norma Oficial Mexicana NOM-001-Ecol-1996. "Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas residuales en aguas y bienes nacionales." Diario Oficial de la Federación.

Stein, J. L. y Schwartzbrod, J. K. (1990). "Experimental contamination of vegetables with helminth eggs." *Wat. Sci. Tech.* Vol. 22 No. 9 pág 51-57.

Strauss, Martín, (1998). "Reúso de aguas servidas- Implicaciones para la salud" *Seminario-Taller. Saneamiento Básico y Sostenibilidad*. Cali, Colombia 4-12 Junio, 1998.

Tarrán, Pietrobon., (2002). "Desinfección por luz ultravioleta " *Agua Latinoamericana* Págs. 28-34.

Vázquez, R. Pedro (1996). " ¿Problemas con el tratamiento de aguas? Pruebe con el ozono. " Tesis de licenciatura. Facultad de Química, UNAM.

White, Clifford (1978). "Disinfection of wastewater and water for reuse " Van Nastrand Reinhold company. Págs. 316-333.

Anexo I

Técnica para la Extracción de huevos de helmintos

1. - Se les realizó a las hembras una disección longitudinal para extraer los órganos internos, los cuales fueron colocados en un mortero con unos mililitros de solución salina isotónica, se molieron con el pistilo hasta obtener una suspensión.
2. - Dicha suspensión se recibió en un tubo de centrifuga de 50 ml, se centrifugó a 2500 rpm durante 5 minutos, posteriormente se removió el sobrenadante con una bomba de succión al vacío, dejando el paquete en el fondo al cual se le agregó solución acuosa de tritón x-100 (0.01%) con el fin de desprender en su mayor parte la materia orgánica que estuviera pegada a los huevos (esto se realizó tres veces).
3. - A la pastilla final se le agregó nuevamente solución salina isotónica, la suspensión obtenida se pasó por un colador, recibiendo en un frasco de vidrio perfectamente limpio, esto constituyó la solución stock a partir de la cual se obtuvieron las muestras.

Anexo II

Determinación de ozono en fase acuosa (Bader, 1981)

Material

- Espectrofotómetro
- Celdas de 10cm
- Matraz aforado de 1 L
- Pipetas de 5 y 10 mL
- Vasos de precipitados de 250 mL
- Balanza analítica
- Espátula
- Vidrio de reloj
- Piseta
- Matraces aforados de 100 ml

Reactivos

- Solución madre de Índigo: En un matraz aforado de 1 L agregar un mL de ácido fosfórico concentrado y añadir con agitación 770 mg de tiosulfonato potásico de índigo, diluir, hasta el aforo. Esta solución es estable por cuatro meses.
- Reactivo de Índigo II: Añadir a un matraz aforado de 1 L, 100 ml de la solución madre, 10 g de fosfato diácido de sodio (NaH_2PO_4) y 7 ml de ácido fosfórico concentrado. Diluir hasta el aforo. Checar la absorbancia inicial, desechar cuando la absorbancia sea menor al 80% de la inicial.

Procedimiento

Se toman 10 mL de reactivo de índigo II, se colocan en un matraz aforado de 100 mL, se agregan 10 mL de muestra y se diluye hasta el aforo. Se lee a una absorbancia de 600 nm inmediatamente ó en las próximas 4 horas.

Cálculos

La concentración de ozono se determina con la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{mg de ozono}}{L} = \frac{100 * \Delta A}{f * b * v}$$

Donde:

ΔA : Diferencia en absorbancia entre muestra y blanco

f = 0.42

b: recorrido de luz en la celda, cm

v: volumen de muestra

Determinación de ozono en fase gaseosa (Birdsall, 1952)

Material

- Medidor de flujo de gas
- Pipetas de 5 y 10 mL
- Mangueras de teflón y PVC
- Matraces aforados de un L
- Espátula
- Balanza Analítica
- Vidrio de reloj
- Piseta
- Lavadores de gases
- Bureta de 25 ml
- Soporte universal con pinzas
- Matraces Erlenmeyer de 250 ml

Reactivos:

- Solución 0.1 N de tiosulfato de sodio: Disolver 25 g de tiosulfato de sodio en un litro de agua destilada, estandarizar la solución de tiosulfato de sodio semanalmente. En un matraz Erlenmeyer añadir 80 ml de agua destilada, agregar con agitación 1 ml de ácido sulfúrico concentrado, 10 ml de

solución de dicromato de potasio y 1 g de yoduro de potasio. Titular inmediatamente con solución 0.1 N de tiosulfato de sodio hasta que el color amarillo del yodo liberado desaparezca. En este momento añadir 1 mL de la solución de almidón y continuar la titulación hasta que el color azul desaparezca. La normalidad de tiosulfato se calcula así: Normalidad de tiosulfato = 1/mL de tiosulfato consumido.

- Solución 1 N de ácido sulfúrico
- Solución 0.1 N de dicromato de potasio para estandarizar la solución de tiosulfato. Disolver 4.904 g de dicromato de potasio y diluir a 1 litro.
- Solución de yoduro de potasio. Disolver 20 g en 1 litro de agua.
- Solución indicadora de almidón.

Procedimiento

Se toman 100 mL de muestra, se colocan en dos matraces Erlenmeyer de 50 mL se agrega a cada uno 5 mL de ácido sulfúrico 1 N y se titula con la solución de tiosulfato de sodio hasta desaparición de color amarillo, se agrega en ese momento solución indicadora de almidón y se prosigue la titulación hasta que color azul desaparezca.

Cálculos:

$$[O_3]_{sgE} = (T \cdot N \cdot 24) / 2$$

$$[O_3]_{sgS} = (T \cdot N \cdot 24) / V_t$$

$$[O_3]_{ET} = (([O_3]_{sgE}) \cdot t \cdot F) V_r$$

$$[O_3]_S = (([O_3]_{sgS}) \cdot t \cdot F) V_r$$

donde:

$[O_3]_{sgE}$: Ozono que sale del generador en fase gas, medido a la entrada del tratamiento (mg/L)

$[O_3]_{sgS}$: Ozono que sale del generador en fase gas, medido a la salida del tratamiento (mg/L)

$[O_3]_{ET}$: Ozono que entra al tratamiento fase acuosa (mg/L)

$[O_3]_S$: Ozono que sale del tratamiento fase acuosa (mg/L)

T: mL de tiosulfato de sodio consumidos.

N: normalidad de tiosulfato de sodio

24: Factor, 1 mL de tiosulfato de sodio corresponde a 245 mg de ozono.

2: Los dos litros que se dejan pasar de gas a través del medidor de flujo.

V_t : Volumen de gas que pasa a través del medidor de flujo en un tiempo

de contacto dado a la salida del reactor.

t: Tiempo de aplicación de ozono.

F: Flujo de gas (L/min).

V_r : Volumen del reactor (L).