



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
FACULTAD DE CIENCIAS
MANEJO INTEGRAL DE ECOSISTEMAS

EFFECTO DEL CLORO (Cl_2), ÁCIDO PERACÉTICO (APA) y ÁCIDO PERFÓRMICO (APF) EN LA INACTIVACIÓN DE MICROORGANISMOS EN AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

PRESENTA:

HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ EMILIO

TUTORA PRINCIPAL DE TESIS: DRA. BLANCA E. JIMÉNEZ CISNEROS

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

COMITÉ TUTOR: DRA. MA. ROSARIO SÁNCHEZ RODRÍGUEZ

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA, UNAM

DRA. MA. TERESA ORTA LEDESMA

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

MÉXICO, D.F., OCTUBRE, 2014.



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
FACULTAD DE CIENCIAS
MANEJO INTEGRAL DE ECOSISTEMAS

EFFECTO DEL CLORO (Cl_2), ÁCIDO PERACÉTICO (APA) y ÁCIDO PERFÓRMICO (APF) EN LA INACTIVACIÓN DE MICROORGANISMOS EN AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

PRESENTA:

HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ EMILIO

TUTORA PRINCIPAL DE TESIS: DRA. BLANCA E. JIMÉNEZ CISNEROS

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

COMITÉ TUTOR: DRA. MA. ROSARIO SÁNCHEZ RODRÍGUEZ

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA, UNAM

DRA. MA. TERESA ORTA LEDESMA

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

MÉXICO, D.F., OCTUBRE, 2014.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
FACULTAD DE CIENCIAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

OFICIO FCIE/DEP/413/14

ASUNTO: Oficio de Jurado

Dr. Isidro Ávila Martínez
Director General de Administración Escolar, UNAM
Presente

Me permito informar a usted que en la reunión ordinaria del Comité Académico del Posgrado en Ciencias Biológicas, celebrada el día **17 de junio de 2013** se aprobó el siguiente jurado para el examen de grado de **MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS** en el campo de conocimiento de **ECOLOGÍA** del (la) alumno (a) **HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ EMILIO** con número de cuenta **300316665** con la tesis titulada **"Efecto del Cloro (Cl₂), ácido peracético (APA) y ácido perbórmico (APF) en la inactivación de microorganismos en agua residual doméstica"**, realizada bajo la dirección del (la) **DRA. BLANCA ELENA JIMÉNEZ CISNEROS**:

Presidente: DR. VÍCTOR MANUEL LUNA PABELLO
Vocal: DRA. PATRICIA BONILLA LEMUS
Secretario: DRA. MARÍA DEL ROSARIO SÁNCHEZ RODRÍGUEZ
Suplente: M. EN C. CATALINA MAYA RENDÓN
Suplente: DRA. MARÍA TERESA ORTA LEDESMA

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria, D.F., a 19 de agosto de 2014

Dra. María del Coro Arizmendi Arriaga
Coordinadora del Programa



MCAA/MJFM/ASR/grf*

Agradecimientos

Al Posgrado en Ciencias Biológicas, UNAM.

Al CONACYT por la beca otorgada durante mis estudios de posgrado.

A Kemira, por el apoyo recibido para el desarrollo experimental de este proyecto.

A la directora de esta tesis: Dra. Blanca E. Jiménez Cisneros, mi más sincero agradecimiento por abrirme las puertas de su equipo de trabajo y de facilitarme las condiciones para desarrollar este proyecto.

A las Doctoras: Ma. Del Rosario Sánchez Rodríguez y Ma. Teresa Orta Ledesma, por ser parte de Comité Tutoral, por su confianza y tiempo, por sus correcciones y comentarios para mejorar la calidad de este trabajo.

Agradecimientos a título personal

Al Dr. Víctor Manuel Luna Pabello y a la Dra. Patricia Bonilla Lemus por ser parte del jurado de esta tesis y por sus valiosas aportaciones y sugerencias académicas.

A la M. en C. Catalina Maya Rendón por su comprensión, apoyo y consejos que tuvo durante el trabajo experimental y escrito de esta tesis, además de pertenecer al jurado de esta tesis.

A la Q. Emilia Soledad Lucario por su colaboración y comentarios durante el trabajo experimental de esta tesis.

A todos los integrantes del Grupo de Tratamiento y Reúso del Instituto de Ingeniería, UNAM por brindarme su tiempo y recomendaciones durante los seminarios, por su compañerismo y amistad que hicieron más amena mi estancia.

A mis amados padres y queridos hermanos por su amor, respeto, confianza y compañía incondicional que me han proporcionada en cada instante de mi vida.

ÍNDICE

Agradecimientos	II
Agradecimientos a título personal	III
RESUMEN	1
ABSTRACT	3
1 INTRODUCCIÓN	5
2 ANTECEDENTES	7
2.1 <i>Desinfección</i>	7
2.1.1 Importancia de la desinfección.....	7
2.1.2 Eficacia de la desinfección del agua residual.....	9
2.1.3 Evaluación de la eficiencia de desinfección.....	13
2.2 <i>Procesos de desinfección</i>	17
2.2.1 Historia del cloro.....	17
2.2.1.1 Reacciones químicas del cloro.....	18
2.2.1.2 Mecanismos de desinfección del cloro.....	20
2.2.1.3 Ventajas y desventajas del cloro.....	21
2.2.1.4 Estudios de inactivación de organismos con cloro	22
2.2.2 Historia del ácido peracético (APA).....	23
2.2.2.1 Reacciones químicas del APA	23
2.2.2.2 Mecanismos de desinfección.....	24
2.2.2.3 Ventajas y desventajas del uso del APA.....	24
2.2.2.4 Estudios de inactivación de organismos con APA.....	25
2.2.3 Historia del ácido per fórmico.....	27
2.2.3.1 Reacciones químicas del APF.....	27
2.2.3.2 Mecanismos de acción del APF	28
2.2.3.3 Ventajas y desventajas de la desinfección con APF.....	28
2.2.3.4 Estudios de inactivación de organismos con APF	29
<i>Elvers, et al, 1991; Rutala y Weber, 2001; Wagner ; Gehr et al., 2009; Heinonen y Miettinen 2010</i>	29
3 HIPÓTESIS	31
4 OBJETIVOS	32
4.1 <i>OBJETIVO GENERAL</i>	32
4.2 <i>OBJETIVOS PARTICULARES</i>	32
5 METODOLOGÍA	33
5.1 <i>Sitio de Muestreo</i>	34
5.2 <i>Descripción de las matrices de estudio</i>	35

5.3	<i>Procesos de desinfectantes</i>	36
5.4	<i>Agente neutralizante</i>	38
5.5	<i>Parámetros biológicos</i>	38
5.6	<i>Primera etapa de experimentación, dosis efectiva</i>	39
5.7	<i>Segunda etapa de experimentación, tiempo de contacto efectivo</i>	41
5.8	<i>Tercera etapa de experimentación, pruebas de recrecimiento</i>	41
6	RESULTADOS	44
6.1	<i>PRIMERA ETAPA DE EXPERIMENTACIÓN</i>	44
6.1.1	Caracterización biológica y fisicoquímica inicial de las matrices de estudio	44
6.1.2	Desinfección en la matriz de agua residual (AR).....	46
6.1.2.1	Efecto desinfectante sobre bacteriófagos (BF), coliformes fecales (CF) y quiste de <i>Giardia</i> spp. (QG).....	46
6.1.2.2	Cinética de inactivación para BF, CF y QG	47
6.1.2.3	El efecto desinfectante sobre los huevos de helmineto (HH).....	48
6.1.2.4	Dosis efectiva de inactivación para cada organismo.....	49
6.1.2.5	Análisis estadístico.....	50
6.1.3	Desinfección en la matriz del efluente fisicoquímico (EF).....	51
6.1.3.1	Efecto desinfectante sobre bacteriófagos (BF), coliformes fecales (CF) y quistes de <i>Giardia</i> spp. (QG).....	51
6.1.3.2	Cinética de inactivación para BF, CF y QG	53
6.1.3.3	Efecto desinfectante sobre los HH.....	53
6.1.3.4	Dosis efectivas para cada organismo	54
6.1.3.5	Análisis estadístico.....	55
6.1.4	Desinfección en la matriz del efluente biológico (EB).....	56
6.1.4.1	Efecto desinfectante sobre bacteriófagos (BF), coliformes fecales (CF) y quiste de <i>Giardia</i> spp. (QG).....	56
6.1.4.2	Cinética de inactivación para BF, CF y QG	58
6.1.4.3	Efecto desinfectante sobre los HH.....	58
6.1.4.4	Dosis efectivas de inactivación de cada organismo.....	59
6.1.4.5	Análisis estadístico.....	60
6.2	<i>SEGUNDA ETAPA DE LA FASE EXPERIMENTAL</i>	61
6.2.1	Caracterización biológica y fisicoquímica inicial de las matrices de estudio	61
6.2.2	Efecto desinfectante del APF sobre BF, CF y QG	62
6.2.3	Cinética de inactivación de BF, CF y QG	64
6.2.4	Efecto desinfectante del ácido per fórmico sobre los HH.....	65
6.2.5	Tiempos de contacto efectivos para cada organismo	66
6.2.6	Análisis estadístico	67
6.3	<i>TERCERA ETAPA DE LA FASE EXPERIMENTAL</i>	67
6.3.1	Caracterización biológica y fisicoquímica inicial de las matrices de estudio	68
6.3.2	Recrecimiento de CF en la matriz AR.....	68
6.3.3	Recrecimiento de CF en la matriz EF.....	69
6.3.4	Recrecimiento de CF en la matriz EB	70
6.3.4.1	Efecto del Cl ₂	70
6.3.4.2	Efecto del APA	71
6.3.4.3	Efecto del APF.....	72
7	DISCUSIÓN	73

7.1	<i>PRIMERA ETAPA EXPERIMENTAL</i>	73
7.1.1	Caracterización de matrices	73
7.1.2	Desinfección en Matriz AR.....	73
7.1.3	Desinfección en Matriz EF.....	75
7.1.4	Desinfección en Matriz EB	77
7.2	<i>SEGUNDA ETAPA EXPERIMENTAL</i>	79
7.2.1	Caracterización de matrices	79
7.2.2	Efecto del tiempo de contacto.....	80
7.3	<i>TERCERA ETAPA EXPERIMENTAL</i>	81
7.3.1	Caracterización de matrices	81
7.3.2	Desinfección en Matriz AR.....	82
7.3.3	Desinfección en Matriz EF.....	82
7.3.4	Desinfección en Matriz EB	82
7.4	<i>Análisis de resultados complementarios.</i>	83
7.5	<i>Posibles cambios morfológicos en los organismos.</i>	85
8	CONCLUSIONES	89
9	RECOMENDACIONES	91
10	LITERATURA CITADA	92
11	ANEXO I	101

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Cantidad de agua residual municipal e industrial en México	9
Tabla 2 Modelos cinéticos de inactivación de microorganismos	11
Tabla 3 Principales microorganismos patógenos a asociados al agua residual	12
Tabla 4 Características de diferentes indicadores de contaminación fecal	14
Tabla 5 Descripción general de bacteriófagos, coliformes fecales, protozoos y helmintos	15
Tabla 6 Condiciones de uso de la desinfección con cloro	21
Tabla 7 Condiciones de operación de la desinfección con Cl ₂ para la inactivación de diferentes organismos.....	22
Tabla 8 Condiciones de uso para la desinfección con APA	24
Tabla 9 Condiciones de operación de la desinfección con APA para la inactivación de diferentes microorganismos.....	26
Tabla 10 Condiciones de uso para la desinfección con APF	28
Tabla 11 Condiciones de operación de la desinfección con APF para la inactivación de diferentes microorganismos.....	29
Tabla 12 Condiciones de operación para obtener el efluente del TPA	35
Tabla 13 Características del NaOCl	36
Tabla 14 Características del reactivo APA	37
Tabla 15 Técnicas aplicadas para determinar los parámetros biológicos seleccionados	39
Tabla 16 Dosis aplicadas para la Primera Etapa de experimentación.....	39
Tabla 17 Tiempos de contacto establecidos para la Segunda Etapa de experimentación	41
Tabla 18 Condiciones de operación para la Tercera Etapa de experimentación	42
Tabla 19 Caracterización de parámetros biológicos de las tres matrices de agua	45
Tabla 20 Caracterización de algunos parámetros fisicoquímicos de las tres matrices de agua	45
Tabla 21 Dosis que cumplen las especificaciones para CF (NOM-001-SEMARNAT-1996, matriz AR).....	47
Tabla 22 Constantes de inactivación del modelo cinético en la matriz AR	48
Tabla 23 Dosis efectivas (experimental y calculada) de inactivación en la matriz AR	49
Tabla 24 Dosis que cumplen las especificaciones para CF de la NOM-003-SEMARNAT-1997 en la matriz EF	52
Tabla 25 Constantes de inactivación del modelo cinético en la matriz EF	53
Tabla 26 Dosis efectivas (experimental y calculada) de inactivación en la matriz EF.....	54

Tabla 27 Dosis que cumplen las especificaciones para CF de la NOM-003-SEMARNAT-1997 en la matriz EB	57
Tabla 28 Constantes de inactivación del modelo cinético en la matriz EB.....	58
Tabla 29 Dosis efectivas (experimental y calculada) de inactivación en la matriz EB	59
Tabla 30 Caracterización de parámetros biológicos de las tres matrices de agua.....	61
Tabla 31 Caracterización de algunos parámetros fisicoquímicos de las tres matrices de agua.....	62
Tabla 32 Tiempos de contacto que cumplen las especificaciones para CF de la NOM-003-SEMARNAT-1997.....	64
Tabla 33 Constante de cada modelo cinético de inactivación aplicando APF.....	64
Tabla 34 Tiempos de contacto efectivos de inactivación de cada organismo	66
Tabla 35 Parámetros biológicos y fisicoquímicos de las tres matrices de agua	68
Tabla 36 Análisis de varianza factorial (ANOVA) en la matriz AR.....	101
Tabla 37 Análisis de varianza factorial (ANOVA) en la matriz EF.....	101
Tabla 38 Análisis de varianza factorial (ANOVA) en la matriz EB	101
Tabla 39 Análisis de varianza factorial (ANOVA) de la desinfección con APF	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Estructura de resistencia ambiental que presenta cada organismo seleccionado. .	16
Figura 2 Curva de punto de quiebre del cloro residual *	20
Figura 3 Diagrama de flujo de la metodología experimental	34
Figura 4 El efecto de la desinfección en la inactivación de organismos, matriz AR	46
Figura 5 El efecto de la desinfección en la inactivación de los huevos de helmintos en la matriz AR	49
Figura 6 El efecto de la desinfección en la inactivación de organismos en la matriz EF	52
Figura 7 El efecto de la desinfección en la inactivación de los huevos de helmintos en la matriz EF	54
Figura 8 El efecto de la desinfección en la inactivación de organismos en la matriz EB	57
Figura 9 El efecto de la desinfección en la inactivación de los huevos de helmintos en la matriz EB	58
Figura 10 Efecto del APF en la inactivación de los organismos en las matrices de estudio	63
Figura 11 Efecto del APF en la inactivación de los huevos de helmintos en las tres matrices de estudio	65
Figura 12 Recrecimiento de coliformes fecales en la matriz AR	69
Figura 13 Recrecimiento de coliformes fecales en la matriz EF	70
Figura 14 Recrecimiento de CF tras aplicar Cl_2 en la matriz EB	71
Figura 15 Recrecimiento de CF tras aplicar APA en la matriz EB	71
Figura 16 Recrecimiento de CF tras aplicar APF en la matriz EB	72
Figura 17 Variación del potencial redox en la primera etapa experimental	102
Figura 18 Residuales de cloración en la primera etapa experimental.	102
Figura 19 Residuales de perácidos orgánicos en la segunda etapa experimental	103
Figura 20 Residuales de perácidos orgánicos en la tercera etapa experimental	103

RESUMEN

La desinfección del agua es el último proceso de saneamiento para producir agua segura para su reutilización, siendo su principal objetivo prevenir las enfermedades de transmisión hídrica. A nivel mundial, desde 1910, el cloro ha sido el desinfectante más utilizado debido a su alta eficiencia, bajo costo, conocimiento en el diseño y la experiencia en la operación dentro de los procesos del tratamiento de aguas residuales. Sin embargo, este método genera e incrementa la presencia de subproductos orgánicos clorados, algunos de los cuales son cancerígenos, incluidos los trihalometanos (THM) y ácidos haloacéticos (HAA) y cloramias.

El presente trabajo de tesis se valoró la eficiencia de diferentes procesos de desinfección en diferentes tipos de efluentes de aguas residual y su efecto sobre diferentes microorganismos. Los desinfectantes probados fueron ácido perbórico (APF) y ácido peracético (APA), reportados como posibles alternativas a la desinfección con cloro (Cl_2).

Para ello, la eficiencia de la desinfección se evaluó a través de la inactivación, no sólo de los indicadores bacteriológicos, sino también para virus, protozoos y helmintos, los cuales han sido reportados como más resistentes a los procesos de desinfección química. Los organismos estudiados fueron: bacteriófagos (BF), coliformes fecales (CF), quistes de *Giardia* spp. (QG) y huevos de helmintos (HH). En este contexto, tanto los procesos de desinfección como los microorganismos fueron evaluados en tres diferentes tipos de efluentes de agua residual: agua residual cruda (AR), efluente de un tratamiento de lodos activados (EB) y de un efluente de tratamiento fisicoquímicos, con un Tratamiento Primario Avanzado (EF).

La fase experimental consistió en tres etapas, en cada una de las cuales se llevó a cabo la caracterización biológica de cada uno de los efluentes. En la Primera

Etapa se determinó la (s) dosis efectiva (s) de inactivación para cada uno de los organismos y cada desinfectante a un tiempo de contacto constante; en la Segunda Etapa, y con la finalidad de optimizar la dosis y tiempo de contacto (condiciones de operación) del APF, se estableció el tiempo(s) de contacto efectivo (s) de inactivación, aplicando una dosis constante, para cada organismo y en la Tercera Etapa se simuló las condiciones de almacenamiento del agua desinfectada (tiempo, condiciones en presencia y ausencia de luz), para determinar la capacidad de recrecimiento sólo de coliformes fecales.

En las dos primeras etapas de experimentación, la inactivación de BF, CF y QG mostró una tendencia decreciente. La resistencia de los organismos en cada tipo de agua fue de la siguiente manera: HH > QG > BF > CF. En el caso particular de los huevos de helmintos, éstos se analizaron por separado debido a la alta resistencia observada a lo largo del estudio.

Con respecto a los procesos de desinfección, en la Primera Etapa, el APF se encontró un mayor efecto desinfectante en la inactivación de los cuatro organismos que con respecto al Cl₂ y APA. En la Tercera Etapa, la reactivación de coliformes fue evidente, favorecida por la presencia de luz solar principalmente por el mecanismo de reparación denominado fotoreactivación, en el cuál se repara el ADN dañado de la bacteria.

ABSTRACT

Disinfection is the final treatment step to produce water safe enough for its reuse, in order to prevent hydric transmission diseases. Worldwide, since 1910, chlorine has been the most widely used disinfectant due to its high efficiency, low cost and the widespread knowledge and experience in designing and operating the processes to treat wastewater. However, concerns are growing because of the presence of organic chlorine byproducts, some of which are carcinogens, including trihalomethanes (THMs), haloacetic acids (HAA) and chloramines).

The present paper shows a research performed of different disinfectants using different wastewater effluents and its stress effect over different microorganisms. The disinfectants tested were hydrogen performic acid (PFA) and peracetic acid (PAA), which have been reported in literature as potential alternative substances to the traditional chlorine disinfection.

The microorganisms chosen to determine the disinfection efficiency were determined not only for bacteriological indicators, but also for viruses, protozoa and helminths, which have been reported as being more resistant to chemical disinfection. The tests were performed in bacteriophages (BF), fecal coliforms (FC), *Giardia* spp cysts (GC) and helminth eggs (HH). In this context both, disinfectants and microorganisms were evaluated using three different kinds of domestic wastewater effluents: raw wastewater (RW) activated sludge treatment effluent (BE) and advanced primary treatment effluent (PE).

The experimental phase was divided into three stages and in each one was performed the biological characterization of each one of the effluent. In the First Stage it was determined the inactivation effective dosage of each disinfectant for each one of the organisms tested under constant contact time; in the Second Stage, and in order to optimize the doses and contact time (operating conditions)

for PFA, it was set the time of effective contact of inactivation, using a constant dosage, for each one of organisms, and in the Third Stage there were simulated the storage conditions of the disinfected water (time conditions in presence and absence of light) in order to determine only fecal coliform re-growth capacity.

In the two stages of experimentation, inactivation of BF, FC and GC showed a downward trend. The resistance of each kind of microorganism in each type of water was as follows: HH> GC> BF> FC. In the particular case of helminth eggs they were analyzed separately because of their high resistance observed throughout the study.

Related to the disinfection processes in the First Stage, the PFA was found to have a greater disinfectant inactivation effect over all the four organisms tested than the ones treated with Cl₂ and PAA. In the Third Stage, the recovery of coliforms was improved because of the effect of the sunlight incidence which repairs the bacteria DNA damaged.

1 INTRODUCCIÓN

La desinfección es el proceso físico y/o químico a través del cual se lleva a cabo la reducción, inactivación, eliminación y/o control de gérmenes potencialmente patógenos y constituye la última etapa dentro de un sistema de tratamiento de aguas residuales (Reynolds, 2002a; Metcalf y Eddy, 2003). La desinfección tiene por objetivo: a) prevenir las enfermedades de transmisión hídrica (Mondaca y Campos, 2003; WHO, 2004; Gerardi, 2006), b) promover el reúso del agua residual tratada en lugar del agua de primer uso y de las descargas de aguas domésticas sin tratamiento (Devaux *et al.*, 2001; USEPA, 2004; WC, 2005) y c) evitar la contaminación de las fuentes de abastecimiento y ecosistemas acuáticos (Cotler, 2010; CNA, 2011).

Una desinfección eficaz está en función de la calidad del agua, motivo por el que se recomienda que el agua residual deba contar con un tratamiento biológico y/o fisicoquímico previo, cantidad y variedad de microorganismos a inactivar o destruir, tipo y concentración del desinfectante, junto con el tiempo de exposición (Jiménez, 2001; Metcalf y Eddy, 2003; CNA, 2010).

Respecto a los tipos de procesos de desinfección existen los físicos (el método de mayor uso es la radiación y, de menor uso, radiación gamma, microondas y ultrasonido) y los químicos (ozono, yodo, bromo y compuestos del cloro). Dentro de estos últimos, la cloración utilizada desde hace más de 100 años, constituye uno de los métodos más ampliamente aplicados a nivel mundial (USEPA, 1999; Reynolds, 2002b). Entre sus principales ventajas el cloro es efectivo a dosis bajas, es un oxidante fuerte, su proceso de producción es conocido y de costo bajo. Sin embargo, una de sus principales desventajas es que al interactuar con la materia orgánica induce a la formación de subproductos tóxicos nocivos para la salud humana (WHO, 2004). Razón por la que, desde los años 80's, se ha propuesto el uso de otro tipo de desinfectantes. Ejemplos de ello son: a) el ácido peracético

(APA), el cual presenta un espectro biocida y un potencial oxidante altos (Monarca *et al.*, 2002; Kitis, 2004; Dell' *et al.*, 2007); b) el ácido perfórmico (APF), que en la industria médica y alimentaria muestra una tasa alta biocida (Rutala y Weber, 2001; Gehr *et al.*, 2009; Van *et al.*, 2009), así como un potencial oxidante mayor que los reportados para el Cl₂ y APA (Gehr *et al.*, 2009; Heinonen y Miettinen, 2010; Kemira, 2010).

Aunque la evaluación de la eficiencia de diversos procesos de desinfección es determinada a través de los indicadores tradicionales de contaminación fecal (ICF), entre los que destacan los grupos de coliformes totales y fecales (Díaz *et al.*, 2007), referente del comportamiento de las bacterias patógenas, pero no de otro tipo de organismos como virus, protozoos y helmintos (Romero 2004; Grabow *et al.*, 2001). Por ello, el objetivo del presente estudio fue evaluar la eficiencia de inactivación del cloro, ácido peracético y ácido perfórmico, sobre cuatro diferentes grupos de organismos: bacteriófagos (virus), coliformes fecales (bacterias), quistes de *Giardia* spp. (protozoos) y huevos de helmintos en tres diferentes calidades de agua residual doméstica .

2 ANTECEDENTES

2.1 Desinfección

El afloramiento de las grandes civilizaciones a orillas de los cursos de suministro de agua, ocasionó el deterioro de su calidad y con ello el incremento de enfermedades de transmisión hídrica. Graves desastres como la pandemia (muerte negra) en el siglo XV en Europa, las epidemias de 1664 y 1854 en Londres y 1892 en Alemania, son algunos ejemplos de ello. Para el siglo XIX se descubrieron los beneficios del uso de los desinfectantes en el agua y desde 1900 se han utilizado extensamente para evitar la expansión de enfermedades y mejorar la calidad del agua. Desde hace varias décadas la desinfección es considerada un tratamiento especializado dirigido a la destrucción o inactivación selectiva de organismos perjudiciales a la salud (Blatchley *et. al*, 1997; Metcalf y Eddy, 2003; WHO, 2004) y como la última barrera dentro de cualquier sistema de tratamiento de aguas residuales (Reynolds, 2002b).

2.1.1 Importancia de la desinfección

Los beneficios sociales y ambientales que ofrece el proceso de la desinfección del agua se describen a continuación:

a) Prevenir las enfermedades de transmisión hídrica (ETH) ocasionadas por virus, bacterias, protozoos y helmintos.

El riesgo de contraer una ETH depende de las características patológicas y/o de virulencia del organismo, de las condiciones sanitarias y socioeconómicas de la población (CGER, 1996; Mondaca y Campos, 2003; UNICEF, 2004; WHO, 2004; Gerardi, 2006), siendo con mayor frecuencia en países sub-desarrollados, con

escasos recursos sanitarios, especialmente en zonas tropicales. Por ejemplo, en México, este tipo de enfermedades causan el segundo lugar de morbilidad; las cuales afectan principalmente a niños (1 a 4 años) y adultos (25 a 44 años) con más de 2 millones de casos reportados (SNVE, 2010).

b) Promover el reúso del agua residual tratada, del agua de primer uso y de las descargas de aguas domésticas sin tratamiento.

Con el fin de moderar los efectos colaterales tanto ecológicos (sobreexplotación de los acuíferos), como económicos (altos costos de operación y mantenimiento del servicio) y sociales (la desigualdad en la distribución del caudal) que causa la escasez del agua, se promueve el reúso potencial del agua residual tratada (USEPA, 2004; WC, 2005). Esta alternativa es una medida eficaz para reducir la necesidad de agua primer uso, disminuir el empleo del agua residual sin tratamiento en el sector agrícola y con ello reducir los impactos negativos significativos sobre la salud humana, en lo referente a la disminución de la cobertura y el deterioro de la calidad del agua de primer uso (Devaux *et al.*, 2001; CNA, 2011).

c) Proteger las fuentes de abastecimiento de agua potable y ecosistemas acuáticos.

Las aguas residuales son consideradas un problema ambiental, ya que son vertidas de manera indiscriminada en los cuerpos de aguas naturales, tales como ríos, arroyos, lagunas, lagos, esteros, marisma, pantanos, acuíferos o en el mar (Health Canada, 2010; Cotler, 2010; CNA, 2011). Riesgo alarmante ya que en el país sólo se tratan alrededor del 32.6 y 15.8 % de las aguas residuales municipales e industriales (CNA, 2011), respectivamente (Tabla 1).

Tabla 1 Cantidad de agua residual municipal e industrial en México

Agua residual	Descarga municipal		Descarga industrial	
	Km ³ / año	m ³ / s	Km ³ / año	m ³ / s
No tratada	7.6	243	5.9	187.7
Tratada	2.5	79.3	0.9	29.7

CNA, 2011.

Por tal motivo y para establecer los ciclos de reúso y controlar los peligros potenciales que el desecho de aguas residuales a cuerpos de agua naturales implica, la legislación mexicana ha creado un marco jurídico encargado de regular las descargas de aguas residuales a los cuerpos receptores a través de las siguientes normas:

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 (DOF, 1997).

Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal (DOF, 1998).

Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público (DOFa, 1998).

2.1.2 Eficacia de la desinfección del agua residual

Entre los factores principales que ejercen influencia en la eficacia de la desinfección y, por consiguiente, en el tipo de proceso empleado en el tratamiento del agua residual, pueden citarse los siguientes (WHO, 2004):

a) Naturaleza del agua que se va a desinfectar

A nivel internacional se distinguen dos tipos de procesos de tratamiento de aguas residuales: el biológico y el fisicoquímico. En México, el primero genera el 46.4% (40,919.7 L/s) de caudal tratado, considerado el método más común como en Europa y Estados Unidos; mientras que el segundo genera el 11.4% (9,814 L/s) de caudal tratado, reconocido como un efluente de calidad media, debido al elevado contenido orgánico, principalmente de nitrógeno y fósforo (Jiménez, 2001; CNA, 2010).

Tomando en cuenta que la desinfección es parte final del sistema del tren de tratamiento (Jiménez, 2001; Metcalf y Eddy, 2003; Romero, 2004), la calidad del agua influye en la capacidad y eficiencia del desinfectante, particularmente lo relacionado a:

- El contenido de sólidos suspendidos
- La turbiedad
- La materia orgánica

b) Dosis y tiempo de contacto del desinfectante

La inactivación de microorganismos está determinada por la dosis del desinfectante (d) y el tiempo de contacto de éste con el agua (t). En consecuencia el producto $d \cdot t$ es un parámetro fundamental para evaluar la eficiencia de la desinfección:

$$d \cdot t \text{ (mg/L} \cdot \text{min)} = \text{Desinfectante residual (mg/L)} \cdot t \text{ (min)} \quad [1]$$

En general, se observa que cuanto mayor es la concentración de desinfectante activo, mayor es la inactivación y/o menor es el tiempo que se necesita para la inactivación de los microorganismos. También, puede ser que al aplicar un tiempo mayor de contacto se obtengan mejores y mayores eficiencias de inactivación, por

lo que se requeriría una dosis menor de desinfectante (EPA, 1999; Metcalf y Eddy, 2003). De esta forma y en función de la dependencia con la dosis aplicada del desinfectante y el tiempo de contacto, se puede determinar la velocidad a la cual el desinfectante inactiva los microorganismos mediante modelos matemáticos que usan ecuaciones cinéticas (Tabla 2).

Tabla 2 Modelos cinéticos de inactivación de microorganismos

Ley de Chick 1908	$\ln N/N_0 = -k \cdot C^n \cdot t$
Modelo Chick-Watson, 1908	$\ln N/N_0 = -k \cdot C_0^n \cdot (1 - \exp^{-(k' \cdot n \cdot t)}) / k' \cdot n$
Modelo de Hom, 1972	$\ln N/N_0 = -k \cdot C^n \cdot t^m$
Modelo racional Roy <i>et al.</i> , 1981	$\ln N/N_0 = -\log [1 + (x-1) \cdot k \cdot C^n \cdot t \cdot N_0 / (x-1)]$
Modelo de Collins –Selleck (1978), (específico para cloro)	$N/N_0 = 1 \quad CT \leq b$ $N/N_0 = (CT/b)^{-n} \quad CT \geq b$
Modelo de diseño de EPA (1986) (Específico para cloro) y Haas y Karra. 1984	$\ln N/N_0 = -[2,86 \cdot 10^{-3} \cdot C_0^{1,46} + 14,4 \cdot C_0^{1,25} - 14,5 C_0^{1,25} - 14,5 C_0^{1,25} e^{-0,00375t}]$

Los primeros conceptos de cinética de la desinfección y los más utilizados actualmente, fueron enunciados en la ley de Chick en 1908, quién reconoció la similitud que existía entre las reacciones químicas y la inactivación de microorganismos por medio de desinfectantes químicos (Daniel, 2001). Esta ley expresa la velocidad de inactivación de los microorganismos por una ecuación cinética de primer orden, es decir, que la tasa de mortalidad es proporcional al número de microorganismos presentes en un tiempo específico, en consecuencia obtendremos una línea recta.

Sin embargo, no siempre el proceso de inactivación es una reacción de primer orden, y por tanto se presentan frecuentemente desviaciones a la ley de Chick,

Por lo que se han propuestos modelos cinéticos que puedan explicar tales desviaciones, mediante ecuaciones de pseudo primer orden.

c) Tipo y concentración de los organismos en el agua

Existen gran variedad de microorganismos y parásitos presentes en el agua residual (Tabla 3), los cuales presentan una influencia definitiva en la evaluación de la eficiencia de un proceso de desinfección y cuya resistencia, frente al efecto de un desinfectante, parece estar determinada por el tipo y composición de las membranas celulares que conforman, y, que dependiendo de su relativa afinidad química, funcionan como un tipo de barrera selectiva (Metcalf y Eddy, 2003; Romero, 2004).

Tabla 3 Principales microorganismos patógenos asociados al agua residual

Virus		Protozoarios	
Astrovirus, Calcivirus, Norwalk		<i>Cryptosporidium parvum</i>	
Enterovirus (Poliovirus 1, 2, 3, Coxsackie A y B, Echovirus)		<i>Cyclospora variedad cayetanensis</i>	
Hepatitis A y E		<i>Entamoeba histolytica</i>	
Rotavirus Grupo Ay B		<i>Giardia lamblia</i>	
Bacterias		Helmintos	
<i>Actinomyces israelii</i>	<i>Nocardia</i> spp.	<i>Ascaris lumbricoides</i>	<i>Schistosoma</i> spp *
<i>Campylobacter jejuni</i>	<i>Salmonella</i> spp.	* <i>Ancylostoma duodenale</i>	<i>Strongyloides stercoralis</i>
<i>Clostridium perfringens</i> , <i>C. tetani</i>	<i>Shigella</i> spp.	<i>Necator americanus</i>	<i>Taenia solium</i> y <i>T. saginata</i>
<i>Escherichia coli</i> patógenas	<i>Vibrio cholerae</i>	<i>Enterobius vermicularis</i>	<i>Toxocara canis</i> *
<i>Leptospira interrogans</i>	<i>Yersinia enterocolitica</i>	<i>Hymenolepis nana</i>	<i>Trichuris trichiura</i>
<i>Mycobacterium tuberculosis</i>			

*Asociadas a enfermedades del sistema respiratorio. Fuente: CGER, 1996; Mondaca y Campos, 2003; Gerardi, 2006.

2.1.3 Evaluación de la eficiencia de desinfección

De forma tradicional, la evaluación de la eficiencia de los procesos de desinfección se realiza a través del monitoreo de la inactivación de los indicadores ideales de contaminación fecal (ICF) debido a que presentan un comportamiento similar a los patógenos y se pueden identificar mediante el empleo de métodos sencillos, rápidos y económicos (WHO, 2004; Díaz *et al.*, 2007; Sidhu y Toze, 2008). Una vez evidenciada la presencia de ICF se puede deducir la posible presencia de patógenos y presuponer que su comportamiento frente a diferentes factores como pH, temperatura, presencia de nutrientes, tiempo de retención hidráulica o a diversos procesos de desinfección es similar o mayor a la presencia de patógenos. Para que un indicador de contaminación fecal sea ideal debe reunir las siguientes características (Díaz *et al.*, 2007):

- Ser un constituyente normal de la flora intestinal de individuos
- Estar presente, de forma exclusiva, en las heces de animales homeotermos.
- Estar presentes cuando los microorganismos intestinales lo están.
- Estar presentes en número elevado, facilitando su aislamiento e identificación.
- Ser incapaz de reproducirse fuera de los animales homeotermos.
- Su tiempo de supervivencia debe ser igual o superior al de los patógenos.
- Ser fácil de aislar y cuantificar.
- No ser patógeno.

Debido a que no existe un organismo que cumpla con todos los requisitos de un indicador ideal de contaminación, en la Tabla 4 se muestran algunos de los organismos propuestos para ello, y en el particular, para ser utilizados en la evaluación de la eficiencia de diversos procesos de desinfección.

Tabla 4 Características de diferentes indicadores de contaminación fecal

Grupo: Virus	Indicador: Bacteriófagos ¹
<ul style="list-style-type: none"> • Poseen una composición, estructura y morfología semejante a la de los virus entéricos. • Se encuentran presentes en el agua residual; tienen una alta tasa de permanencia respecto a los enterovirus. • Los métodos de detección son rápidos y de menor costo que los empleados para enterovirus. • Son resistentes a los procesos de desinfección y diversos tipos de tratamiento de agua. 	
Grupo : Bacterias	Indicador: Coliformes fecales ²
<ul style="list-style-type: none"> • Están presentes en el tracto gastrointestinal tanto del hombre como de los animales de sangre caliente. • En el ambiente permanece en concentraciones altas. • Permanecen por más tiempo en el agua que las bacterias patógenas. • Se comportan de forma semejante que otro tipo de bacterias patógenas ante diversos procesos de desinfección. 	
Grupo: Protozoos	Indicador: Quistes de <i>Giardia</i> spp. ³
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Giardia</i> spp. es un protozoo intestinal comúnmente reportado en todo el mundo. • La Organización Mundial de la Salud estima alrededor de 200 millones de casos de Giardiasis al año. • El 40.6% de los 325 brotes de infecciones transmitidas por el agua reportados a nivel mundial, entre 1954 y 2002, fueron ocasionados por <i>Giardia</i> spp. • La supervivencia en el agua puede ser de semanas a meses (o más), dependiendo de la cepa y de factores ambientales del agua como la temperatura, pH, etc. 	
Grupo: Helmintos	Indicador: Huevos de helmintos ⁴
<ul style="list-style-type: none"> • Dosis infectiva mínima (1 huevo) • Persiste en el medio ambiente por meses o incluso años. • El índice de parasitismo a nivel mundial es muy alto. • El riesgo de transmisión es alto debido a la alta concentración y resistencia a diversas condiciones ambientales. 	

¹Wok, 2001; Skrabel *et al.*, 2004; Arraj *et al.*, 2005; Allowood *et al.*, 2005; Helmi *et al.*, 2008; Gerba, 2009. ² Metcalf y Eddy, 2003; Romero, 2004. ³ Farthing, 1989; Karanis *et al.*, 2007; CDW, 2011. ⁴ Tay *et al.*, 2002; WHO, 2004; Sidhu y Toze, 2008.

Aunque como ya se mencionó, tradicionalmente, los indicadores de origen bacteriano han sido utilizados como los ICF, no son el referente adecuado sobre el comportamiento de otro tipo de organismos de otros grupos (Metcalf y Eddy, 2003); particularmente, porque su resistencia es menor a diversos procesos de

desinfección, con respecto a quistes de protozoos y huevos de helmintos (Sidhu y Toze, 2008; CDW, 2011).

A continuación, en la Tabla XX se presenta la descripción general de los grupos de organismos que fueron seleccionados en el presente estudio, se detallan aspectos de su ciclo de vida, habitad y de su principal estructura de resistencia que presentan ante las condiciones adversas del ambiente. La mayoría de los organismos son transmitidos por el agua aunque no crecen en el agua e inician la infección en el aparato digestivo del huésped tras su ingestión, sino que entran en los sistemas de abastecimiento de agua mediante su contaminación con heces humanas o animales.

Tabla 5 Descripción general de bacteriófagos, coliformes fecales, protozoos y helmintos

Generalidades	Ciclo de vida	Habitad	Estructura de resistencia
BACTERIÓFAGOS			Figura 1A
Son parásitos intracelulares obligados que se multiplican al interior de las bacterias. Los fagos están entre un rango de 24-200 nm de longitud.	Llevan cabo el ciclo lítico (rompimiento de la bacteria) y/ o lisogénico (antes de la lisis, permanece un fragmento del material genético viral dentro de la bacteria).	Los fagos están presentes en la naturaleza y ocupan una amplia gama de hábitats ya que solo infectan huéspedes bacterianos que están ampliamente distribuidos.	Cada partícula fágica contiene DNA o RNA dentro de una envuelta proteica o lipoproteica, denominada capsida que actúa como una cubierta protectora para el ácido nucleico.
COLIFORMES FECALES			Figura 1B
Son bacterias entéricas, pueden ser aerobias o anaerobias facultativas. El tamaño promedio de los bacilos gram negativos son de 0.5 µm de ancho por 3 µm de largo.	Se divide en las siguientes fases: adaptación, exponencial, estacionaria y de muerte. Su crecimiento se lleva a cabo por la fisión binaria.	Se encuentran principalmente en el intestino de seres homeotermos y por ende en las aguas residuales. En el ambiente se introducen por la descarga de heces.	Consiste en la membrana plásmica seguida de un espacio periplásmico con oligosacáridos, peptidoglicano y proteínas. Finalmente esta la pared bacteriana compuesta de fosfolípidos y recubierta con lipopolisacáridos.
GIARDIA			Figura 1C

Es un protozoo flagelado no invasivo anaerobio, de simetría bilateral periforme, pertenece al phylum Sarcomastigophora.	Comprende la etapa de trofozoito o forma móvil (se desarrolla como parásito dentro del huésped) y quiste (forma de resistencia expulsada al ambiente).	El trofozoito se encuentra dentro del intestino delgado de varios animales y el hombre. Los quistes son eliminados con las heces al ambiente y transmitidos a otro hospedero.	Los quistes son ovalados, miden de 11-14 μm de longitud, está formada por una capa filamentosa externa y una capa membranosa interna. Contiene 4 núcleos y estructuras
HELMINTOS			Figura 1D
Son animales pluricelulares, de simetría bilateral con envoltura musculocutánea, con estructuras anatómicas modificadas para vivir dentro del huésped	Comprende la producción de huevos, larvas infecciosas y alternancia de generaciones en diferentes huéspedes.	La larva infectiva debe mudar hasta convertirse en adulto y producir huevos dentro del huésped, la transmisión al ambiente es por medio de la expulsión de los huevos con las heces.	El huevo llega a medir entre 20 a 90 μm , las capas que lo conforman son básicamente tres, de composición química diferente: una interna de lípidos, otra intermedia de quitina y una externa de proteínas.

Fuente: Tay *et al.*, 2002; Metcalf y Eddy, 2003; Romero, 2004; Skrabel *et al.*, 2004 WHO, 2004; Allowood *et al.*, 2005; Arraj *et al.*, 2005; Guttman *et al.*, 2005; Karanis *et al.*, 2007; Helmi *et al.*, 2008; Sidhu y Toze, 2008; Gerba, 2009; Van Twes y Kropinski, 2009; Chaparro, 2010.

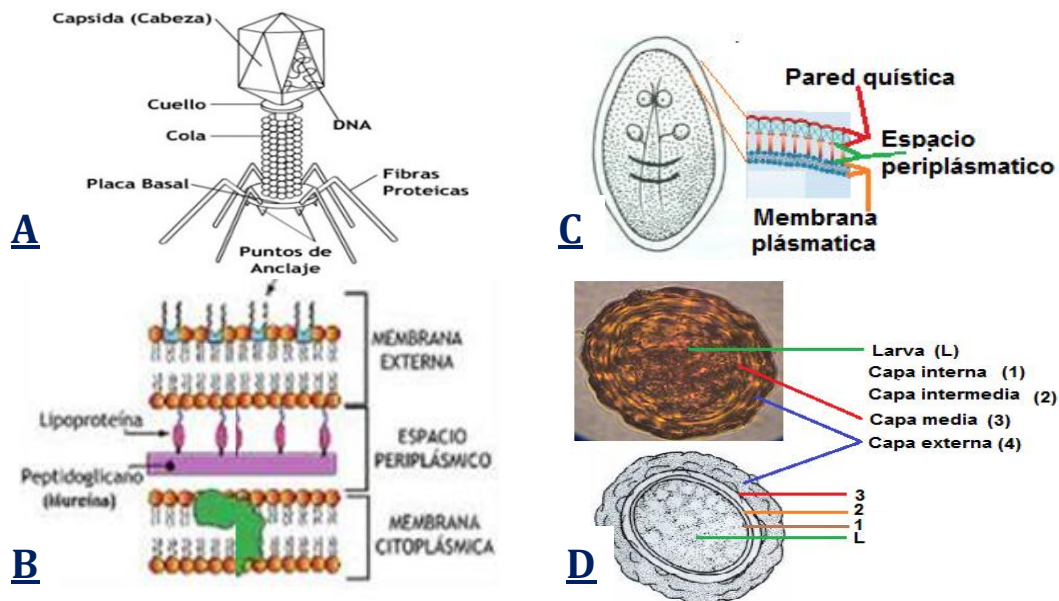


Figura 1 Estructura de resistencia ambiental que presenta cada organismo seleccionado.

2.2 Procesos de desinfección

Los procesos de desinfección, se aplican para agua de consumo y agua residual, se pueden llevar a cabo por métodos físicos y/o químicos. Por la vía de desinfección física, el método de mayor uso es la radiación ultravioleta (UV) y de menor uso la radiación gamma, microondas, ultrasonidos, calor o sistemas de filtración. Para el caso de los químicos, el más empleado es el cloro y sus derivados, aunque de manera minoritaria se usan otros compuestos como el ozono, bromo, yodo o el permanganato de potasio (Gray, 1996; Metcalf y Eddy, 2003). Debido a las limitaciones que el uso del cloro presenta, en particular a la generación de subproductos nocivos a la salud, en años recientes se ha propuesto el uso de desinfectantes químicos orgánicos, los cuales al cumplir, al menos, con las mismas ventajas del Cl₂, pero sin la generación de tales subproductos, representarían una real alternativa de procesos de desinfección. A continuación se hace una descripción de los procesos de desinfección química: cloro, APA y el APF.

2.2.1 Historia del cloro

Las primeras referencias del uso del cloro en la desinfección del agua datan de hace más de un siglo. En 1850 se implementó un sistema de desinfección por cloro (White, 1999); posteriormente en 1897, se empleó cloro líquido para aliviar los estragos de la epidemia de tifoidea en Inglaterra (Leal, 1909). Su primer uso en forma regular se llevó a cabo en Bélgica de 1902 y en 1908, en los Estados Unidos (Christman, 1998; USEPA, 1999). El cloro se ha acreditado como uno de los químicos de desinfección del agua de mayor uso, ya sea directamente o en forma de compuestos que lo contienen (White, 1999; USEPA, 1999; Metcalf y Eddy, 2003; Solsona y Méndez, 2003).

Los atributos más importantes del cloro son su potencia y persistencia germicida (propiedad residual) de amplio espectro en los sistemas de distribución de agua. La importancia de dicha protección residual es prevenir el recrecimiento

microbiano una vez que el agua sale de la planta de tratamiento (Metcalf y Eddy, 2003; WHO, 2004).

2.2.1.1 Reacciones químicas del cloro

En la desinfección por cloración puede emplearse cloro gas (Cl_2), hipoclorito de sodio (NaOCl) o hipoclorito de calcio ($\text{Ca}(\text{OCl})_2$), los cuales son aplicados mediante el burbujeo del cloro gaseoso o mediante dosificadores en forma de disolución. El cloro en cualquiera de sus formas, se hidroliza al entrar en contacto con el agua, y forma ácido hipocloroso (HOCl) de la siguiente forma:

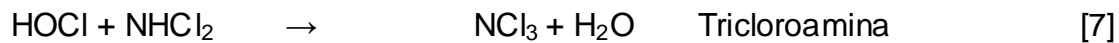
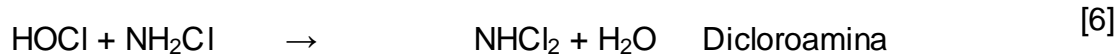
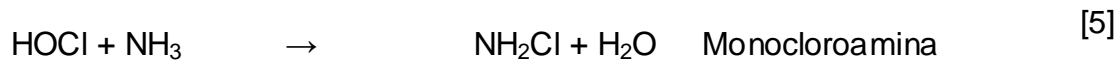


La especie desinfectante es el ácido hipocloroso, el cual se disocia en iones hidronios (H^+) e hipoclorito (OCl^-) y adquiere sus propiedades oxidantes:

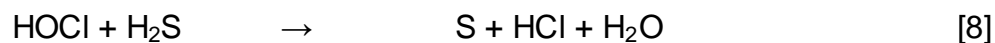


Esta reacción de hidrólisis se produce en fracciones de segundo y es reversible. La reacción [4] es dependiente del pH. A bajos valores de pH la especie predominante es el ácido hipocloroso HOCl . A altos valores de pH la especie que predomina es el ion hipoclorito OCl^- .

Ambas fracciones de la especie, el ácido hipocloroso y el ión hipoclorito, son microbicidas. También pueden producir compuestos tales como monocloramias [5], dicloramias [6] y tricloramias [7] en presencia de amoníaco. Las cloramias sirven igualmente como desinfectante ya que forman el cloro denominado cloro combinado utilizable.



Si en el agua existen iones metálicos como Hierro (II) y Manganeso (II), el cloro es capaz de modificarlos a estados superiores de oxidación como Fe (III) y Mn (VII); con el ácido sulfhídrico (H_2S) produce azufre elemental [8], y al reaccionar con la materia orgánica puede producir compuestos organoclorados [9]. Con cada una de ellas genera distintos compuestos que no tienen ninguna relación con la desinfección. Por esta razón, al cloro gastado en estas reacciones se le conoce como demanda de cloro.



La reacción del cloro libre con el amoníaco complica en gran medida el mantenimiento de una cantidad residual (combinado o libre) para la desinfección de las aguas residuales, dicho comportamiento se muestra en la Figura 2, donde se denotan las siguientes zonas (EPA, 1999; Metcalf y Eddy, 2003; Solsona y Méndez, 2003):

Zona A. Destrucción del cloro residual por compuestos reductores.

Zona B. Formación de compuestos organoclorados y cloraminas.

Zona C. Destrucción de cloraminas y compuestos organoclorados.

Zona D. Formación de cloro libre y presencia de compuestos organoclorados no destruidos.

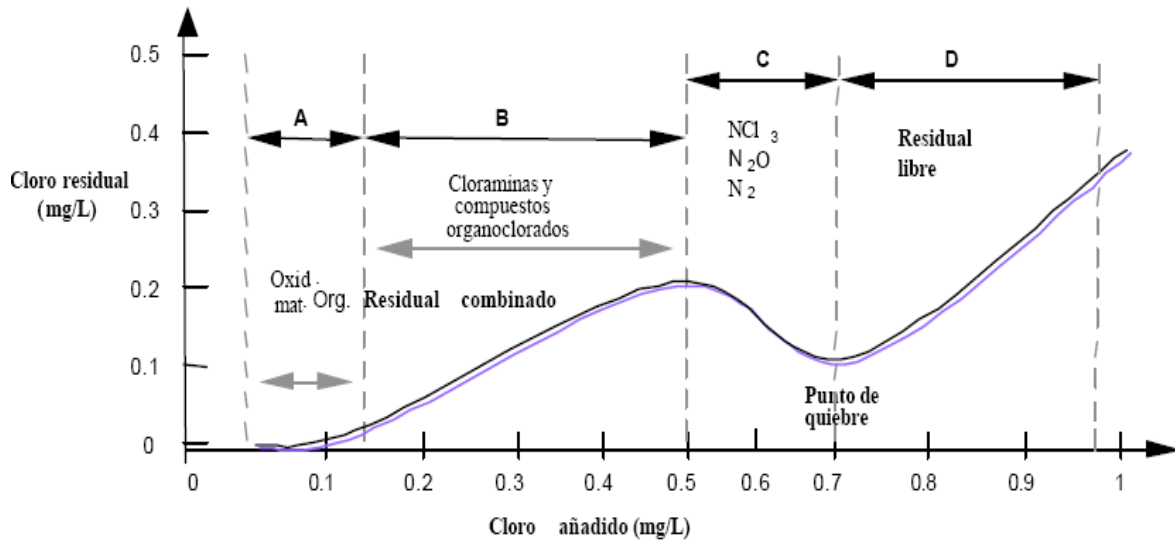


Figura 2 Curva de punto de quiebre del cloro residual *

Fuente: Metcalf y Eddy, 2003; WHO, 2004

2.2.1.2 Mecanismos de desinfección del cloro

El cloro afecta la integridad y permeabilidad de la membrana (perturba las funciones específicas de las proteínas), de manera consecuente altera las funciones celulares (inhibe procesos metabólicos, altera la naturaleza coloidal del protoplasma e inhibe la actividad enzimática (Solsono y Méndez, 2003; Sánchez y Sáenz, 2005).

Por ello, la reacción de los microorganismos ante el cloro está determinada por la resistencia de sus membranas así como por la relativa afinidad química de este compuesto con las sustancias vitales del organismo (Rojas, 2004; WHO, 2004; Gerardi, 2006).

* **Nota:** para mantener una adecuada desinfección en el sistema de distribución de agua potable, la legislación mexicana establece dentro de la NOM-127-SSA-1994 un rango permisible de cloro residual libre de 0.2 a 1.5 mg/L.

2.2.1.3 Ventajas y desventajas del cloro

El cloro tiene un largo historial como un desinfectante efectivo, al igual que ciertas limitantes en términos de salubridad y seguridad (Tabla 6), para esto es necesario entender las ventajas y desventajas que su aplicación conlleva.

Tabla 6 Condiciones de uso de la desinfección con cloro

Cloro elemental: Cl ₂	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Tecnología bien establecida. • Desinfectante efectivo. • El nivel del cloro residual se puede mantener y vigilar con facilidad. • El efecto germicida puede mantenerse en líneas de transmisión de gran longitud. • Útil para usos auxiliares como el control de olores y desinfección de las instalaciones de la planta. • Oxida los sulfuros. • Relativamente barato. • Disponible en otras formas más seguras, como hipoclorito de calcio y de sodio. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sustancia peligrosa y de manejo delicado, se deben de aplicar medidas de seguridad muy estrictas. • El tiempo de contacto requerido es mayor que el de otros desinfectantes. • Genera varios subproductos tóxicos y puede requerir de cloración. • Oxida hierro, manganeso y otros compuestos inorgánicos que pueden dar color o provocar sedimentos. • Hay un consumo del desinfectante por el agua antes de alcanzar el nivel germicida (cloro libre). • Puede provocar pH ácido, si la alcalinidad del agua es baja. • Tiene baja capacidad de controlar microorganismos formadores de quistes y esporas • Los subproductos (trihalometanos y ácidos haloacéticos) son potencialmente tóxicos; además se incrementa su concentración.

Fuente: White, 1999; USEPA, 1999; Metcalf y Eddy, 2003.

Actualmente, el riesgo asociado a los trihalometanos es pequeño, si se compara con las enfermedades de transmisión hídrica, por lo que es importante continuar con el proceso de desinfección del cloro, a menos que éste pueda ser sustituido

por una alternativa efectiva que proporcione un suministro de agua más seguro (Reynolds, 2002b; USEPA, 2004; WHO, 2004; Rodríguez *et al.*, 2007).

2.2.1.4 Estudios de inactivación de organismos con cloro

La Tabla 7 resume diferentes condiciones reportadas en la bibliografía internacional para la inactivación de diferentes grupos de organismos, a través de la desinfección con cloro en diferentes tipos de agua. Se observa que desde los años 90's su mayor aplicación para las pruebas de desinfección, ha sido en efluentes con un tratamiento biológico de lodos activados y en años más recientes para el caso de efluentes con un tratamiento fisicoquímico o primario avanzado. También se muestra la variedad de rangos de dosis y tiempos de contacto aplicados dentro del mismo grupo de organismo; por ejemplo, para un efluente fisicoquímico a partir de una concentración inicial de 4.9 log de coliformes totales y después de un tiempo de contacto de 30 min, Üstün y col. en el año 2011 reporta una inactivación de 3.6 log tras aplicar una dosis de 3 mg/L; mientras que Jardines en el año 2000, con 4.9 log de coliformes totales y una dosis 8 mg/L registró 4 log de inactivación. Los reportes sobre la inactivación de protozoos y helmintos se limitan a pocos estudios experimentales, donde la información, incluso es insuficiente o nula.

Tabla 7 Condiciones de operación de la desinfección con Cl₂ para la inactivación de diferentes organismos

Organismos	Dosis (mg/L)	TC (min)	No (log)	INA (log)	Matriz	Referencia
Colifagos	2, 3, 4, 5	10	5 - 6	2.9	Agua de pozo c/ inóculo	De Souza y Daniel, 2005
	1.5 y 2	18 - 20	4.1	0.5 y 1	EB	De Luca <i>et al.</i> , 2008
	2	15	4.4	0.5	EB	Sherri <i>et al.</i> , 1995
Coliformes totales	5 6	90 60	4.8	4	EF	Jardines, 2000

	8	30				
	1.5 y 2	18 - 20	5.7	0.5 y 1	EB	De Luca <i>et al.</i> , 2008
	1			3.1		Üstün <i>et al.</i> , 2011.
	2	30	4.9	3.6	EF	
	3			3.6		
<i>Escherichia coli</i>	2, 3, 4, 5	20	6 - 7	3	Agua de pozo c/ inocular	De Souza y Daniel, 2005
Coliformes fecales	2	15	4.8	3	EB	Sherri <i>et al.</i> , 1995
Quistes de <i>Giardia</i> spp.	80	120	sd	< 3	EF	Tree <i>et al.</i> , 2005
	122	sd	sd	3	Cloro libre	USEPA, 1999
	50.5	20	sd	0.5	Cloro libre	USEPA, 1999
Huevos de helmintos	10 000	sd	sd	Insuficiente	EF	Orta <i>et al.</i> , 2002

TC, tiempo de contacto; No, concentración inicial del microorganismo; INA, inactivación; sd, sin datos; EB, Efluente Biológico de lodos activados; EF, Efluente físicoquímico con tratamiento primario avanzado.

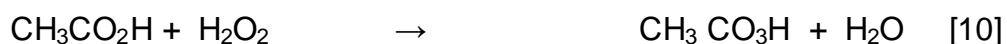
2.2.2 Historia del ácido peracético (APA)

El uso del APA se ha extendido, desde los años 80's, como desinfectante debido a su amplio espectro de actividad (aún en presencia de materia orgánica), aunado a la baja producción de subproductos ambientalmente indeseables (Baldry y French, 1989; Morris, 1993; Sánchez-Ruiz *et al.*, 1995; Liberti *et al.*, 2000; Block, 2001; Salgot, 2002; Metcalf y Eddy, 2003; Kitis, 2004). Sus usos principales son en el sector de sanidad animal, agricultura y horticultura, así como en la desinfección de lodos residuales, al poder usar soluciones diluidas, fáciles y seguras de manejar; además ha demostrado ser un eficiente agente virucida, bactericida, fungicida y esporicida (Liberti y Norticola, 1999; Block, 2001; Kitis, 2004; De Luca *et al.*, 2008).

2.2.2.1 Reacciones químicas del APA

El ácido peracético o ácido peroxiacético ($\text{CH}_3\text{CO}_3\text{H}$) es una mezcla de ácido acético ($\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}$) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2) en solución acuosa. Su

formación está representada por la siguiente reacción (Liberti y Norticola, 1999; Block, 2001; Kitis, 2004; Andrew, 2007):



No existe una solución al 100% pura. Comercialmente para una solución acuosa entre 1 y 15 % de APA se utiliza la siguiente relación de sus componentes (% p/p): $\text{CH}_3\text{CO}_3\text{H}$ – 38, H_2O_2 - 3.3, $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}$ - 49.9 y H_2O - 13.8 (Block, 2001; Murillo, 2004).

2.2.2.2 Mecanismos de desinfección

La actividad desinfectante del APA se basa en la liberación del oxígeno activo y de radicales hidroxilo (OH), los cuales, inhiben varias funciones de la célula, como son: la síntesis de la membrana celular, la síntesis de proteínas, el metabolismo de los ácidos nucleicos, las reacciones enzimáticas y principalmente el transporte de la membrana por la destrucción de los enlaces sulfhidrilo (-SH) y sulfuro (S-S) de las enzimas (Liberti y Norticola, 1999; Block, 2001; Caretti y Lubello, 2003; Kitis, 2004).

2.2.2.3 Ventajas y desventajas del uso del APA

La desinfección con APA tiene ciertas limitantes en términos de salubridad y seguridad que es necesario entender para su óptima aplicación (Tabla 8).

Tabla 8 Condiciones de uso para la desinfección con APA

Otros nombres: Ácido peroxiacético, peróxido acético, hidroperóxido de acetilo.	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Es considerado como un biocida o desinfectante biodegradable. • Los SPD ($\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}$, H_2O_2, CO_2, H_2O, O_2, OH) son no tóxicos y fácilmente solubles en agua. • Inactiva esporas, hongos, levaduras y virus. • Actúa en tiempos de contacto relativamente cortos. • La mayor reducción de organismos ocurre durante los primeros 10 min. • Formación de aldehídos y fenoles bromados, en concentraciones muy bajas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de contenido orgánico del efluente. • Potencial de recrecimiento microbiano debido al ácido acético restante. • Rendimiento más bajo contra algunos virus y parásitos (por ejemplo, los quistes de <i>Giardia lamblia</i>) y huevos de helmintos. • Costo elevado debido a que no se produce a escala industrial por su alta reactividad es difícil de almacenar. • Producto corrosivo causa irritación en la piel, ojos y mucosas ante una exposición excesiva. • Descomposición de APA residual de 5 a 11 h

SPD, Subproductos de la desinfección. Baldry *et al.*, 1995; Lazarova *et al.*, 1998; Liberti y Norticola, 1999; Block, 2001; Monarca *et al.*, 2002; Kitis, 2004; Dell' *et al.*, 2007)

2.2.2.4 Estudios de inactivación de organismos con APA

Las condiciones de aplicación del APA para la inactivación de virus, bacterias, protozoos y helmintos entéricos, dependen de las diferentes condiciones de operación (tipo de agua, dosis y tiempo de contacto del desinfectante). Los estudios de desinfección se establecen, principalmente, sobre el efluente del tratamiento biológico (casi el 70%) y de forma reciente se está empleando el efluente generado del tratamiento fisicoquímico y, muy pocas o ninguna, utilizan el agua residual cruda (Tabla 9).

Algunas condiciones de operación reportadas difieren entre sí, por ejemplo, en un tratamiento biológico con lodos activados con 60 min de tiempo de contacto aplicando una dosis 4, 11 y 500 mg/L de APA se alcanzó inactivar 3, 4 y 5.5 log de coliformes totales, respectivamente (Lefevre *et al.*, 1992; Liberti y Notarnicola, 1999; Gerh, 2002). Los reportes sobre la inactivación de protozoos se limitan a pocos estudios experimentales y para el caso de los huevos de helmintos es nula.

Tabla 9 Condiciones de operación de la desinfección con APA para la inactivación de diferentes microorganismos

Organismos	Dosis (mg/L)	TC (min)	No (Log)	INA (Log)	Matriz	Referencia
Fago M52	500	120	sd	3.5	EB	Lazarova <i>et al.</i> , 1998; Liberti y Notarnicola, 1999.
Colifagos F RNA	2-7	4 -18	3	1	EB	Koivunen y Heinonen, 2005
Coliformes totales	2 -11	30 60	6.8	1.4-3.7 1.8-4	EB	Lefevre, <i>et al.</i> , 1992
	10 - 500	5- 60	sd	2 - 5.5	EB con floculación	Liberti y Notarnicola, 1999.
	2 - 6 0.6 - 4	60	sd	3	EF EB	Gerh, 2002
	2-7	27	5.7	3	EB	Koivunen y Heinonen, 2005
	2-15	12, 18, 36	sd	0.5 - 4	EB con filtración	Antonelli <i>et al.</i> , 2006
	1 -3	30	4.9	2.8 - 3.0	EF	Üstün <i>et al.</i> , 2011.
	10	30	sd	0.6	EB	Liberti <i>et al.</i> , 2000
Quistes de <i>Giardia</i> spp	100	30	16.7 N/L	16 N/L	AR	Liberti y Notarnicola, 1999.
Huevos de helmintos	sd	sd	sd	sd	sd	

TC, tiempo de contacto; No, concentración inicial del microorganismo; INA, inactivación; sd, sin datos; EB, Efluente Biológico de lodos activados; EF, Efluente fisicoquímico con tratamiento primario avanzado; N/L, quiste por cada litro de muestra.

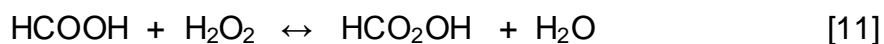
2.2.3 Historia del ácido per fórmico

El uso del ácido per fórmico (APF) como desinfectante se ha reportado desde los años 70's, en la industria alimentaria y médica. Se aplica comúnmente para desinfectar el equipo; es eficaz contra los virus, esporas bacterianas, algas, hongos microscópicos y micobacterias (Vaskhov *et al.*, 1974; Rutala y Weber, 2001; Heinonen y Miettinen, 2010). En años posteriores, las propiedades oxidantes fuertes del APF comenzaron a utilizarse para escindir los enlaces disulfuro en el mapeo de proteínas, así como para la epoxidación, reacciones de hidroxilación, oxidación en la síntesis orgánica (Heinonen y Miettinen, 2010) como agente esterilizante contra las bacterias formadoras de esporas como *Bacillus subtilis* y *Clostridium sporogenes* (Rutala y Weber, 2001).

Es debido a estas propiedades que el APF se ha propuesto para la aplicación como desinfectante de aguas residuales (Bydzovska y Měrka, 1981; Gerh *et al.*, 2009).

2.2.3.1 Reacciones químicas del APF

El APF (HCO_2OH) se produce con la mezcla de ácido fórmico (HCOOH) con peróxido de hidrogeno (H_2O_2). Actualmente no se cuenta con una solución pura a nivel comercial. Para una solución acuosa de hasta un 90% de APF se utiliza la combinación de 70-98 % en peso de ácido fórmico en agua con un 35-50% en peso de peróxido de hidrógeno, mediante la siguiente reacción:



Esta reacción es reversible y puede ser utilizado para la producción industrial a gran escala si se acelera con un catalizador, como por ejemplo, ácido nítrico, ácido fluorhídrico, ácido fosfórico, ácido sulfúrico o sus sales. La temperatura debe mantenerse por debajo de 80-85 °C para evitar una explosión (Gehr *et al.*, 2009).

2.2.3.2 Mecanismos de acción del APF

El APF actúa en la ruptura de los enlaces disulfuro (S-S) de las proteínas que conforman la membrana, posteriormente la oxidación de las proteínas conduce a la formación de residuos de ácido cisteico y de metionin-sulfona, a partir de la cisteína y de metionina, respectivamente, y a la destrucción del triptófano. Con respecto a los grupos sulfhidrilo (-SH) de las proteínas, éstos se oxidan a sulfóxidos (Heinonen y Miettinen, 2010). Cuando el APF penetra la célula, inician las reacciones de hidroxilación y oxidación en la síntesis orgánica de los ácidos grasos poliinsaturados de la membrana celular. Probablemente, los agentes oxidantes producen una reacción irreversible de moléculas esenciales para la célula (Patnaik, 2007). La acción desinfectante del APF es más rápida que la de los compuestos relacionados con ácido peracético y peróxido de hidrógeno (Preuss *et al.*, 2001)

2.2.3.3 Ventajas y desventajas de la desinfección con APF

Para aplicar la desinfección con APF es necesario conocer sus limitantes en términos de salubridad y seguridad que se muestran en la Tabla 10:

Tabla 10 Condiciones de uso para la desinfección con APF

Otros nombres: hidroperoxiformaldeido, ácido formil hidroperóxido, metonoperóxido, ácido permetanoico y ácido peroxifórmico	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• Es considerado como un desinfectante biodegradable.• Los SPD (HCOOH, H₂O₂, CO₂, H₂O, O₂, OH) son no tóxicos y solubles en agua.• Inactiva virus, bacterias y esporas• Actúa en tiempos de contacto	<ul style="list-style-type: none">• Tecnología de reciente desarrollo• Descomposición de APF residual relativamente rápido (1 a 2 h).• Existen pocos estudios de laboratorio• No se ha establecido su rendimiento contra los quistes de <i>Giardia</i> y

cortos. <ul style="list-style-type: none"> No produce malos sabores 	huevos de helmintos. <ul style="list-style-type: none"> Cuando está concentrado (más del 50%) es altamente reactivo, estalla a 80-85 ° C.
--	--

Elvers, *et al*, 1991; Rutala y Weber, 2001; Wagner ; Gehr *et al.*, 2009; Heinonen y Miettinen 2010.

El hecho de que la molécula de ácido perfoómico contenga un sólo átomo de carbono lo convierte en un desinfectante potencial, ya que sus productos de degradación dejan menos residuos orgánicos que el ácido peracético (Heinonen y Miettinen, 2010).

2.2.3.4 Estudios de inactivación de organismos con APF

Las condiciones de operación de la desinfección con APF aun no se han establecido del todo, debido a que es una tecnología de reciente desarrollo. Los estudios reportados son escasos y no presentan la información completa (tipo de agua, dosis y tiempo de contacto del desinfectante), además de que la mayor parte de ellos se han efectuado en efluentes biológicos y se limitan a la inactivación de indicadores de virus y bacterias, mientras que para el caso de protozoos y huevos de helmintos son nulos (Tabla 11).

Tabla 11 Condiciones de operación de la desinfección con APF para la inactivación de diferentes microorganismos

Organismos	Dosis mg/L	Tiempo de contacto (min)	Conteo inicial (log)	Inactivación (log)	Tipo de agua	Referencia
Bacteriófagos	5 - 6	90	sd	1 - 2	EF	Gerh <i>et al.</i> , 2009
Fago 174	0.25	5	8	7	AR	Bydzovská y Mëerka, 1981
Colifagos	sd	sd	sd	1	EB	Kondratjeff, 2007
Coliformes fecales	2 - 4	45	sd	3	EF	Gerh <i>et al.</i> , 2009
	2	10	sd	3.5	EB	Kemira, 2010
	4			6		Van <i>et al.</i> , 2009

<i>Giardia</i> spp.	sd	sd	sd	sd	sd	sd	-
Huevos de helmintos	sd	sd	sd	sd	sd	sd	-

sd, sin datos. AR, Agua Residual. EB, Efluente biológico. EF, Efluente fisicoquímico

El uso de desinfectantes químicos no convencionales como el caso del APA y APF, con respecto al uso convencional con Cl₂, han mostrado ser una solución potencialmente factible para la inactivación de los diversos grupos de organismos presentes en ella; además de poder implementarse como alternativa a la cloración dentro del sistema de tratamiento de las aguas residuales.

Debido a ello, el presente estudio evaluó la eficiencia de inactivación del cloro, ácido peracético y ácido perfórmico, sobre cuatro diferentes grupos de organismos: bacteriófagos (virus), coliformes fecales (bacterias), quistes de *Giardia* spp. (protozoos) y huevos de helmintos, en 3 matrices (agua residual, efluente del tratamiento fisicoquímico y efluente del tratamiento biológico).

3 HIPÓTESIS

Debido a los diferentes factores que se toman en cuenta en el presente trabajo experimental (desinfectantes, dosis, tiempos de contacto, calidades del agua y diversidad de organismos) se planteó la siguiente hipótesis de trabajo:

- H_A : Las condiciones de operación (dosis y tiempos de contacto) de los desinfectantes (Cl_2 , APA y APF) causarán la inactivación de los organismos (bacteriófagos, coliformes fecales, quistes de *Giardia* y huevos de helmintos) en diferentes calidades de agua residual doméstica.
- H_0 : Las condiciones de operación (dosis y tiempos de contacto) de los desinfectantes (Cl_2 , APA y APF) dejarán de ocasionar la inactivación de los organismos (bacteriófagos, coliformes fecales, quistes de *Giardia* y huevos de helmintos) en diferentes calidades de agua residual doméstica.

H_a = Hipótesis alternativa

H_0 = Hipótesis nula

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto desinfectante del cloro, ácido peracético y ácido perbórmico sobre la inactivación de bacteriófagos, coliformes fecales, quistes de *Giardia* spp. y huevos de helmintos presentes en agua residual doméstica cruda, en el efluente fisicoquímico y efluente biológico.

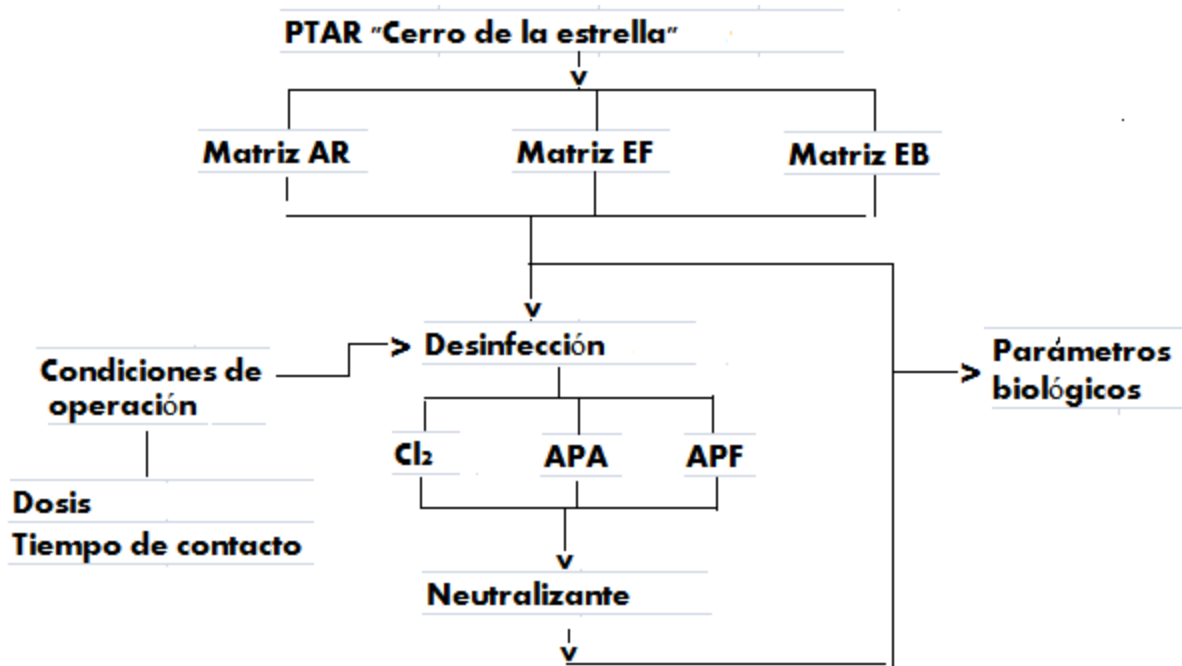
4.2 OBJETIVOS PARTICULARES

- Determinar la dosis de cada desinfectante para la inactivación de bacteriófagos, coliformes fecales, quistes de *Giardia* spp. y huevos de helmintos en agua residual doméstica cruda y tratada (Primera Etapa experimental).
- Determinar el tiempo de contacto del APF para la inactivación de bacteriófagos, coliformes fecales, quistes de *Giardia* spp. y huevos de helmintos, en agua residual doméstica cruda y tratada (Segunda Etapa experimental).
- Establecer el modelo cinético para tres diferentes procesos de desinfección (Cl_2 , APA y APF), en agua residual doméstica cruda y tratada, sobre la inactivación para bacteriófagos, coliformes fecales, quistes de *Giardia* spp. y huevos de helmintos.
- Determinar la dosis y tiempo de contacto que eviten el recrecimiento de coliformes fecales, para los tres diferentes desinfectantes, en agua residual doméstica cruda y tratada, en condiciones de presencia y ausencia de luz (Tercera Etapa experimental).

5 METODOLOGÍA

En el presente capítulo se describen las actividades realizadas para evaluar el efecto desinfectante del Cl_2 , APA y APF sobre la inactivación de bacteriófagos, coliformes fecales, quiste de *Giardia* spp. y huevos de helmintos en tres diferentes calidades de agua.

Cabe mencionar que las diversas calidades de agua se denotaron como matrices de estudio de la siguiente manera: agua residual (AR), efluente fisicoquímico (EF) y efluente biológico (EB); en todas las etapas de experimentación se trabajó con las 3 matrices de estudio. Para ello, la metodología se dividió en 3 etapas: a) en la Primera Etapa se determinó la (s) dosis de inactivación para cada uno de los organismos, aplicando Cl_2 , APA y APF, a un tiempo de contacto constante, b) en la Segunda Etapa y con la finalidad de optimizar las condiciones de operación del APF, se establecieron los tiempos de contacto de inactivación para cada uno de los cuatro organismos y c) en la Tercera Etapa se simuló las condiciones de almacenamiento del agua desinfectada (tiempo, condiciones en presencia y ausencia de luz), para determinar la capacidad de recrecimiento de coliformes fecales después de la desinfección con cada uno de los desinfectantes Cl_2 , APA y APF. Las dosis y tiempos de contacto aplicados se determinaron a partir de los resultados obtenidos en las dos primeras etapas de estudio (Figura 3).



		Dosis	Tiempo
Etapa 1	Dosis efectiva	≠	cte
Etapa 2	Tiempo efectivo	cte	≠
Etapa 3	Recrecimiento	Etapa 1 y 2	Etapa 1 y 2

Figura 3 Diagrama de flujo de la metodología experimental

5.1 Sitio de Muestreo

La planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) "Cerro de la Estrella", ubicada en la Delegación Iztapalapa, al sureste de la Ciudad de México fue el sitio de muestreo seleccionado para el presente estudio. La planta cuenta con una capacidad instalada de 2,000 a 2,500 L/s, y una capacidad nominal de 4 m³/s, y recibe descargas domésticas, principalmente, de las delegaciones Iztacalco, Venustiano Carranza, Xochimilco, Benito Juárez, Tláhuac y Milpa Alta.

Dentro del proceso, el agua residual se deposita en un contenedor, para pasar a un sedimentador primario, donde se mantiene alrededor de 2 h. Posteriormente, es conducida hasta el tanque de aireación, donde se lleva a cabo el tratamiento

secundario (6 a 8 h), para pasar a un sedimentador secundario donde permanece de 2 a 3 h. El agua clarificada pasa a la etapa de filtración (15 a 30 min) para ser recolectada por el falso fondo de filtros y conducida al tanque de cloración, donde se mantiene entre 1.5 a 2 h, para finalmente ser almacenada y conducida a la red de distribución (CNA, 2010).

5.2 Descripción de las matrices de estudio

A continuación se describe el procedimiento llevado a cabo para la generación de cada una de las matrices de agua residual municipal utilizada en la presente investigación:

- a) Matriz AR, corresponde al agua del influente del sistema de tratamiento de la planta de aguas residuales municipales de “Cerro de la Estrella”.
- b) Matriz EF, se refiere al agua del efluente fisicoquímico del tratamiento primario avanzado (TPA), el cual se obtuvo en el laboratorio del Instituto de Ingeniería de la UNAM, a partir del Sistema de Prueba de Jarras con Agitación Múltiple (marca *Phipps and Bird*, modelo 7790.400). La Tabla 12 muestra las condiciones de operación.
- c) Matriz EB, corresponde al agua del efluente biológico del tratamiento secundario con lodos activados de la planta de tratamiento de aguas residuales municipales “Cerro de la Estrella”.

Tabla 12 Condiciones de operación para obtener el efluente del TPA

Etapa	Reactivo	Agitación (rpm)	Tiempo (min)
Coagulación	15 mg/L de $Al_2(SO_4)_3$ *	300	0.5
Floculación	1 mg/L de Prosifloc A-252 ´	50	15

Sedimentación	-	-	15
---------------	---	---	----

* Sulfato de aluminio. Polímero aniónico. rpm revoluciones por minuto. Fuente: Jiménez, 2001.

Para la toma de muestras en la PTAR “Cerro de la Estrella”, tanto para el agua residual cruda, como el efluente biológico, se utilizaron tambos de 100 L de capacidad. Para su llenado se utilizó una bomba eléctrica sumergible de ½ HP. Las muestras fueron transportadas al laboratorio de parasitología y microbiología, de la Coordinación de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería de la UNAM, para su procesamiento inmediato.

5.3 Procesos de desinfectantes

Cloro (Cl₂)

La desinfección con cloro se llevó a cabo con una solución de hipoclorito de sodio (NaOCl), distribuido por el proveedor HYCEL de México, S. A. de C. V. (Tabla 13).

Tabla 13 Características del NaOCl

CAT	570
Presentación	Botella de 3.5 L
Concentración	13 - 15 % diluido
Equipo de Protección Personal	Pantallas faciales, respiradores de cara completa, guantes, gafas.

Ácido peracético (APA)

La desinfección con el ácido peracético se realizó con el reactivo distribuido por el proveedor SIGMA-ALDRICH. En la Tabla 14 se observan las características del reactivo.

Tabla 14 Características del reactivo APA

CAT	79-21-0
Presentación	Botella de 500 mL
Presión de vapor	20 mm Hg (25 °C)
Composición de ácido acético	40-45%
Concentración	35.5 % diluido en ácido acético
Total de impurezas	<6,0% de peróxido de hidrógeno
Índice de refracción	n ₂₀ / D 1,3876
Densidad	1,13 g/mL a 25 °C
Peligro de Códigos	O, C, N
Punto de Fusión	- 44 °C
Punto de inflamación	46 °C
Punto de auto - ignición	107 °C
Equipo de Protección Personal	Pantallas faciales, respiradores de protección cara completa, guantes, gafas.

Ácido perfórmico (APF)

Para el caso del ácido perfórmico la preparación se llevó a cabo de acuerdo con Kemira, 2006 (Code APTY-017E) y Gerh *et al.*, 2009, de la siguiente manera:

Preparación de la solución de peróxido: en un matraz aforado de 50 mL se añadieron 35 mL de peróxido de hidrógeno (J. T. Baker 30%), posteriormente se aforó con agua desionizada.

Preparación de la solución ácido fórmico: en un matraz Erlenmeyer de 100 mL se adicionaron 50 mL ácido fórmico (Merck, 98%) y 4.7 mL ácido sulfúrico concentrado (J. T. Baker 98.6%). Esta mezcla se llevó a cabo en un baño de agua (marca *Cole Parmer Instrument*, modelo 12501) para mantener la temperatura por debajo de 20 °C.

Preparación de la solución de ácido perfórmico (10% y densidad de 1.18 g/cm³): en un matraz Erlenmeyer, previamente, conteniendo 50 mL de la solución de ácido fórmico, se añadieron lentamente 50 mL de la solución de peróxido preparada. La mezcla se mantuvo a 20 °C durante no más de 90 minutos.

Nota: Todos los procesos se realizaron en la campana de extracción (marca Leviton, modelo LR 16807), debido a su inestabilidad, ya que en menos de 6 h tras haber sido sintetizada, la solución de APF se transforma a peróxido de hidrógeno y ácido fórmico, cada 5 h fue reemplazada (Gehr *et al.*, 2009).

5.4 Agente neutralizante

Se utilizó una solución de tiosulfato de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) como agente neutralizante ante el efecto desinfectante de cada proceso de desinfección, el cual se añadió al finalizar el tiempo de contacto establecido. La concentración de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ que se agregó fue de acuerdo a la siguiente ecuación (Warner, 1988; Peterka, 1998 y 2002):

$$\text{TSS} = V_a * D * 3.5 \quad [12]$$

Donde:

TSS: Cantidad de tiosulfato de sodio necesaria (g).

V_a : Volumen de agua (m^3).

D: Dosis de desinfectante (ppm).

3.5: Factor de corrección, añadir 3.5 veces más TSS respecto a la D inicial.

5.5 Parámetros biológicos

Se seleccionaron cuatro diferentes organismos: bacteriófagos, coliformes fecales, quistes de *Giardia* spp. y huevos de helmintos para poder predecir el comportamiento de virus, bacterias, protozoos y helmintos, respectivamente, ante el efecto de los tres procesos de desinfección. La variedad de parámetros biológicos se estableció con la finalidad de ampliar y conocer los rangos biocidas de cada uno de los desinfectantes y no de forma exclusiva a los coliformes fecales, indicadores bacteriológicos de contaminación fecal, como la mayoría de los estudios lo hacen. Las técnicas empleadas para cada uno de los organismos evaluados se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15 Técnicas aplicadas para determinar los parámetros biológicos seleccionados

Organismo determinado	Grupo al que pertenece	Técnica empleada
Bacteriófagos (UFP/L)	Virus	Norma ISO 10705
Coliformes fecales (UFC/100 mL)	Bacterias	NMX-AA-102-SEMARNAT-2006
<i>Giardia</i> spp. (Quistes/L)	Protozoos	Método 9711B APHA <i>et al.</i> , 1995
Huevos de helmintos (HH/L)	Helmintos	NMX-AA-113-SEMARNAT-1999

UFP, Unidades Formadoras por placa; UFC, Unidades Formadoras de Colonia; HH, Huevos de helmintos

5.6 Primera etapa de experimentación, dosis efectiva

En la Primera Etapa se determinaron las dosis de inactivación para los tres desinfectantes aplicados (Cl_2 , APA y APF), sobre cada uno de los cuatro organismos seleccionados, en cada una de las tres matrices. El rango de dosis aplicada se estableció con base en las reportadas en la bibliografía internacional (Tabla 16). El tiempo de contacto, durante la presente etapa de experimentación, se mantuvo constante, siendo de 30 min para el Cl_2 y de 5 min tanto para el APA como para el APF.

Posteriormente a un volumen de 2.5 L de muestra de cada matriz, se le agregó la dosis correspondiente del desinfectante bajo condiciones tipo Batch en el Sistema de Prueba de Jarras (marca *Phipps and Bird*, modelo 7790.400). La velocidad de agitación aplicada fue de 100 rpm.

Tabla 16 Dosis aplicadas para la Primera Etapa de experimentación

Desinfectante	Matriz	Dosis (mg/L)
Cl_2^1	AR	20, 40, 80, 100, 150
	EF	10, 20, 40, 50, 60

	EB	5, 10, 20, 30, 40
APA ²	AR	5, 10, 15, 20,30, 50, 100
	EF	2, 4, 8, 10, 12, 15, 30
	EB	2, 4, 6, 8, 10,
APF ³	AR	5, 10, 15, 20, 30
	EF	2, 4, 8, 10, 12
	EB	2, 4 , 6, 8, 10

¹ USEPA, 1999 Tree *et al.*, 2005; Sherri *et al.*, 1995; Jardines, 2000; Albicker, 2002; De Souza y Daniel, 2005; De Luca *et al.*, 2008; Üstün *et al.*, 2011. ² Lefevre *et al.*, 1992; Lazarova *et al.*, 1998; Liberti *et al.*, 2000 Liberti y Notarnicola, 1999; Gerh, 2002; Koivunen y Heinonen, 2005; Antonelli *et al.*, 2006; Üstün *et al.*, 2011. ³ Kondratjeff, 2007; Gerh *et al.*, 2009; Kemira, 2010.

El análisis estadístico se realizó por cada desinfectante mediante un modelo lineal generalizado de 3 factores (un factor anidado¹):

$$Y_{ijkl} = \mu + D_i + M_{j(i)} + O_k + (MO)_{j(i)k} + (DO)_{ik} + \varepsilon_{ijkl} \quad [13]$$

Y_{ijklm} , es la l -ésima observación del efecto desinfectante de la k -ésima dosis en la j -ésima matriz sobre el k -ésimo organismo.

μ , es la media general.

D_i , es el efecto de la i -ésima dosis del desinfectante; $i = 1, 2, 3$ n.

$M_{j(i)}$, es el efecto de la i -ésima la dosis anidada en la j -ésima matriz; $j = 1, 2, 3$.

O_k , es el efecto del k -ésimo organismo; $k = 1, 2, 3, 4$.

$(MO)_{j(i)k}$, es el efecto de la interacción del k -ésimo organismo, i -ésima dosis anidada en la j -ésima matriz.

$(DO)_{ik}$, es el efecto de la interacción del k -ésimo organismo, i -ésima dosis.

ε_{ijkl} , es el error experimental

Para el análisis se utilizó el paquete estadístico JMP versión 10 (*Statistical Discovery.™ From SAS*).

¹ Factor anidado: se dice que un factor B está anidado en otro factor A (o que sus niveles están anidados en los de A) cuando cada nivel del factor B aparece asociado a un único nivel del factor A. Debido a que no se pueden combinar todos los niveles de un factor con todos los niveles de otro, es decir, no se pueden determinar todos los posibles tratamientos que aparecen al cruzar los factores.

5.7 Segunda etapa de experimentación, tiempo de contacto efectivo

En la Segunda Etapa se determinaron las mejores condiciones de operación del proceso de la desinfección con APF, ello debido a que se trata de un proceso de reciente desarrollo y existe escasa información de su uso como desinfectante de aguas residuales, particularmente en lo referente a su capacidad biocida. Para ello, se evaluaron entre 5 a 7 tiempos de contacto de inactivación, dependiendo del tipo de matriz, para cada uno de los 4 diferentes organismos, seleccionados con base en la revisión bibliográfica efectuada (Tabla 17). La dosis seleccionada se mantuvo constante, y fue la mínima requerida para cumplir con el límite máximo permisible para coliformes fecales (NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997) de la Primera Etapa. Cada una de las prueba se corrieron por triplicado.

Las condiciones del desarrollo experimental y el análisis estadístico aplicado fueron los mismos que en la Primera Etapa.

Tabla 17 Tiempos de contacto establecidos para la Segunda Etapa de experimentación

Matriz	APF ¹ (mg/L)	Tiempo de contacto * (min)
AR	5	5, 10, 15, 30, 60, 120, 240
	10	5, 10, 15, 30, 60, 120
EF	5	5, 10, 15, 30, 60, 120
EB	5	5, 10, 15, 30, 60

¹De acuerdo con las condiciones de operación de la Primera Etapa.

*De acuerdo con Liberti y Notarnicola, 1999; Koivunen y Heinonen, 2005; Kondratjeff, 2007; Gerh *et al.*, 2009; Kemira, 2010.

5.8 Tercera etapa de experimentación, pruebas de reecimiento

En la tercera y última etapa de experimentación se evaluó el efecto del desinfectante residual para cada uno de los tres tipos de desinfectantes aplicados y en cada una de las 3 matrices. El estudio incluyó exclusivamente el recrecimiento de los coliformes fecales, simulando así las condiciones de almacenamiento del agua desinfectada: en un tanque de almacenamiento dentro de la planta (24 h), en la red de distribución (48 h) y lo que tarda en llegar a las zonas de cultivo (72 h), y tanto en presencia como en ausencia de luz.

Como actividades adicionales, se determinaron las condiciones de operación que mejoran la eficiencia de los 3 procesos de desinfección, respecto a las dosis y tiempos de contacto establecidos en las Primera y Segunda Etapa de experimentación (Tabla 18). Las condiciones del desarrollo experimental fueron las mismas que las especificadas en la Primera Etapa.

Tabla 18 Condiciones de operación para la Tercera Etapa de experimentación

Matriz	Desinfectante	Dosis (mg/L)	Tiempo de contacto (min)
AR	Cl ₂ ¹	50, 60, 70	15
	APA ¹	15, 30	15
	APF*	10	15
EF	Cl ₂ ¹	10, 15	15
	APA ¹	10, 15	15
	APF*	3	15
EB	Cl ₂ ¹	8, 10, 15	10, 15, 30
	APA ¹	1, 2, 3	10, 15, 30
	APF*	0.5, 1, 1.5, 2	10, 15, 30

¹De acuerdo con las condiciones de operación de la Primera Etapa etapa 1.

*De acuerdo con las condiciones de operación de las Primera y Segunda Etapas.

El análisis estadístico se realizó mediante un modelo lineal generalizado con medidas repetidas, de 2 factores (un factor anidado) para el caso de la matriz AR y EF; y de 3 factores (un factor anidado) para la matriz EB.

$$Y_{ijklm} = \mu + D_i + M_{j(i)} + T_k + \beta_l + (M\beta)_{j(i)l} + (T\beta)_{kl} + \varepsilon_{ijklm} \quad [14]$$

Y_{ijklm} , es la m -ésima observación en la matriz por el efecto de la l -ésima medida repedida de la i -ésima dosis aplicada por cada j -ésimo desinfectante en cada k -ésimo tiempo de contacto.

μ , es la media general.

D_i , es el efecto de la i -ésima dosis del desinfectante; $i = 1, 2, 3 \dots n$.

$M_{j(i)}$, es el efecto de la i -ésima dosis anidada en el j -ésimo desinfectante; $j = 1, 2, 3$.

T_k , es el efecto del k -ésimo tiempo de contacto; $k = 1, 2, 3$.

β_l , es el efecto de la l -ésima medida repedida; $l = 1, 2, 3$.

$(M\beta)_{j(i)l}$, es el efecto de la l -ésima medida repedida en la i -ésima dosis anidada en el j -ésimo desinfectante.

$(T\beta)_{kl}$, es el efecto de la l -ésima medida repedida en el k -ésimo tiempo de contacto.

ε_{ijklm} , es el error experimental.

El análisis se realizó con el paquete estadístico JMP versión 10 (Statistical Discovery. TM From SAS).

6 RESULTADOS

6.1 PRIMERA ETAPA DE EXPERIMENTACIÓN

En la presente sección se detallan los resultados obtenidos para la primera etapa de estudio. De forma inicial se muestran los parámetros biológicos y fisicoquímicos iniciales del experimento (caracterización) y posteriormente, se presentan para cada una de las tres matrices involucradas (AR, EF y EB) el efecto de cada uno de los procesos de desinfección (Cl_2 , APA y APF), sobre la inactivación de cada uno de los cuatro organismos evaluados (bacteriófagos, coliformes fecales, quistes de *Giardia* spp. y huevos de helmintos). Es importante indicar que los datos de huevos de helmintos se analizaron por separado debido a la resistencia observada a lo largo del estudio, y en comparación al resto de los organismos evaluados. También se muestra la cinética de inactivación de cada microorganismo.

6.1.1 Caracterización biológica y fisicoquímica inicial de las matrices de estudio

La caracterización inicial de los parámetros biológicos en cada una de las tres matrices de estudio se muestra en la Tabla 19. Como se puede observar la concentración de los cuatro organismos es menor para los efluentes fisicoquímico y biológico, que con respecto al agua residual sin tratamiento.

La matriz EF registró reducciones de 0.5 a 1.2 log de bacteriófagos, coliformes fecales y quiste de *Giardia* spp., mientras que para la matriz EB las reducciones fueron de 0.7 a 2.4 log para los tres grupos. Con respecto a los huevos de helmintos, los valores observados fueron de 2.2, 1.1 y 0.75 HH/L para AR, EF y EB.

Tabla 19 Caracterización de parámetros biológicos de las tres matrices de agua

Organismo	Matriz	Concentración		Prom ± ds (log)
		mínima	máximo	
Bacteriófagos (UFP/ L)	AR	8.3 x10 ⁵	8.6 x10 ⁵	5.9 ± 0.1
	EF	4.0 x10 ⁴	5.7 x10 ⁴	4.7 ± 0.1
	EB	3.4 x10 ³	6.5 x10 ³	3.6 ± 0.1
Coliformes Fecales (UFC/100mL)	AR	2.0 x 10 ⁷	3.2 x 10 ⁷	7.4 ± 0.1
	EF	2.7 x 10 ⁶	3.5 x 10 ⁶	6.5 ± 0.1
	EB	7.2 x10 ⁴	1.2 x10 ⁵	5.0 ± 0.1
Quistes de <i>Giardia</i> spp. (Q/L)	AR	883	1000	3.0 ± 0.0
	EF	286	390	2.5 ± 0.1
	EB	160	200	2.3 ± 0.1
Huevos de helmintos (HH/L)	AR	2.0	1.8	*2.2 ± 0.1
	EF	0.8	0.6	*1.1 ± 0.1
	EB	0.2	0.4	*0.75 ± 0.1

UFP/L; unidades formadoras por placa por litro. UFC/100 mL; unidades formadoras de colonia por cada 100 mL. Q/L; quistes de *Giardia* por litro. HH/L; huevos de helmintos por litro. * Cantidad de huevos de helmintos por litro. Prom; media aritmética. log, unidades logarítmicas.

Los parámetros fisicoquímicos de las 3 matrices de estudio se muestran en la Tabla 20, donde se aprecia que las mediciones de pH, temperatura y conductividad son equivalentes para las 3 matrices. No así para los valores correspondientes de turbiedad, SST y COD los cuales disminuyen en su concentración, siendo los mayores para AR y los menores para EB.

Tabla 20 Caracterización de algunos parámetros fisicoquímicos de las tres matrices de agua

Parámetro	AR	EF	EB
	Prom ± ds	Prom ± ds	Prom ± ds
Turbiedad (NTU)	136 ± 22	46 ± 6.3	2.0 ± 0.6
pH	7.4 ± 0.2	7.3 ± 0.1	7.1 ± 0.0

Temperatura (°C)	18.8 ± 1.1	18.8 ± 1.7	19.2 ± 1.5
Conductividad (µS/cm)	781 ± 14.5	786 ± 5.6	620 ± 89
COD total (mg/L)	339 ± 45	174 ± 16	74 ± 45
SST (mg/L)	79 ± 29	37 ± 15	3 ± 0.6

Prom: media aritmética. ds: desviación estándar. SST: sólidos suspendidos totales. COD t: carbón orgánico total disuelto.

6.1.2 Desinfección en la matriz de agua residual (AR)

6.1.2.1 Efecto desinfectante sobre bacteriófagos (BF), coliformes fecales (CF) y quiste de *Giardia* spp. (QG)

En la Figura 4 se observa que con las dosis máximas aplicadas 150 mg/L de Cl₂ y 100 mg/L de APA, se obtuvieron inactivaciones de 4.1, 6.8 y 1.8 log para BF, CF y QG respectivamente, semejantes a las obtenidas al aplicar una dosis de 30 mg/L de APF (4.1, 7.1 y 1.7 log para BF, CF y QG, respectivamente). Al comparar la inactivación obtenida para BF, CF y QG, tras aplicar una dosis de 20 mg/L tanto para el Cl₂ (1.7, 1.5 y 0.6 log, respectivamente) como para el APA (2.0, 2.1 y 1.0 log, respectivamente) es mayor con el APA.

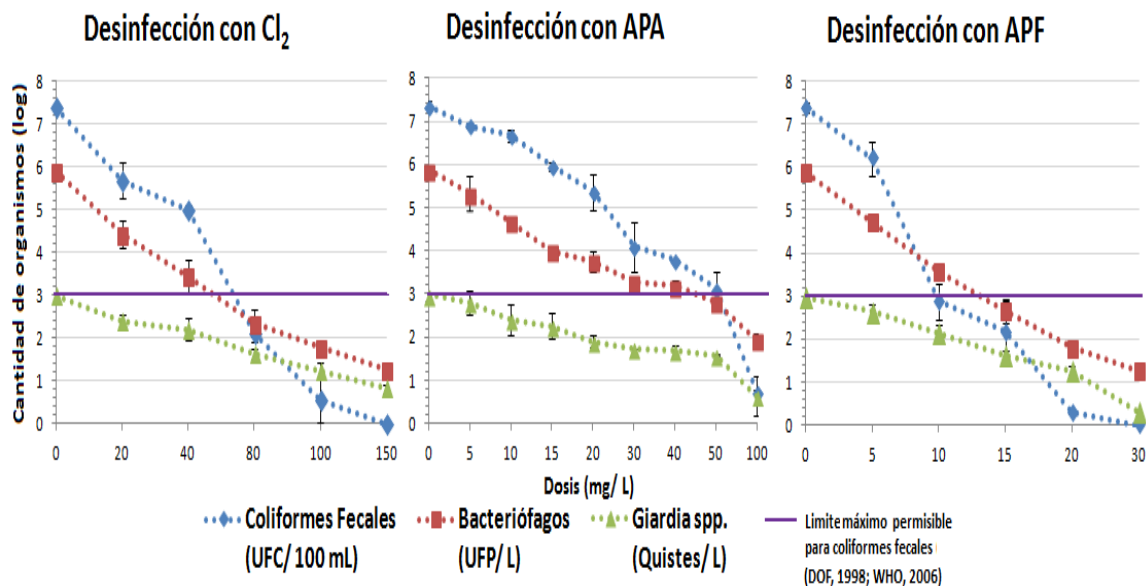


Figura 4 El efecto de la desinfección en la inactivación de organismos, matriz AR

En la Tabla 21 se muestran aquellas dosis que cumplen las especificaciones en cuanto a los límites máximos permisibles de CF de la NOM-001-SEMARNAT-1996. Es importante indicar que BF y QG no se encuentran regulados por la legislación mexicana.

Tabla 21 Dosis que cumplen las especificaciones para CF (NOM-001-SEMARNAT-1996, matriz AR)

Desinfectante	Dosis (mg/L)	Reducción (log)	Cantidad final (log)
Cl ₂ (TC: 30 min)	80	5.3	2.1
	100	6.8	0.6
	150	7.4	0
APA (TC: 5 min)	50	4.2	3.0
	100	5.7	1.7
APF (TC: 5 min)	10	4.5	2.9
	15	5.2	2.2
	20	7.0	0.4
	30	7.4	0

TC, tiempo de contacto

6.1.2.2 Cinética de inactivación para BF, CF y QG

Para determinar la eficiencia de inactivación para cada uno de los procesos de desinfección sobre cada organismo, se determinaron las constantes de inactivación del siguiente modelo cinético:

$$\text{Modelo de Selleck} \quad \log N/N_0 = -n \cdot \log Ct / b \quad [20]$$

Donde:

No: Concentración inicial de microorganismos.

N: Concentración de microorganismos sobrevivientes en el tiempo "t"

C: Dosis del desinfectante (mg/L).

b: Coeficiente lag

n: Coeficiente de Chick-Watson (modelo de Selleck)

t: Tiempo de contacto.

El coeficiente *lag* (b) denota la resistencia de los organismos, es decir, a mayor valor de *lag*, el organismo es menos resistente a la inactivación y cuando el valor

de lag es menor, su resistencia es mayor. Mientras que n expresa la eficiencia del desinfectante, es decir, entre mayor sea el valor de n , las dosis aplicadas del desinfectante interaccionan con mayor velocidad con el organismo.

Tabla 22 Constantes de inactivación del modelo cinético en la matriz AR

Desinfectante		Cl ₂			APA			APF		
Organismo		CF	BF	QG	CF	BF	QG	CF	BF	QG
Constante	b	17.67	8.86	4.59	4.83	3.38	1.89	9.93	5.43	3.89
	n	6.78	3.70	1.80	3.50	2.77	1.46	8.20	4.64	2.88
	r^2	0.95	1.00	0.93	0.86	0.99	0.98	0.96	0.99	0.94

Los valores de la Tabla 22 indican que la eficiencia de inactivación del organismo de menor a mayor fue de la siguiente forma: APA < Cl₂ < APF y con respecto a la resistencia de los organismos comparados fue: CF < BF < QG. El valor de r^2 confirma la dependencia entre la acción de las dosis aplicadas de cada desinfectante y la tendencia decreciente de cada organismo.

6.1.2.3 El efecto desinfectante sobre los huevos de helminto (HH)

Para evaluar el efecto desinfectante en los HH se utilizó el porcentaje de eficiencia de inactivación (% E) en cada uno de los procesos de desinfección mediante la siguiente ecuación:

$$\% E = [(N / No) * (100)] - 100 \quad [21]$$

Donde:

N: Número de HH después de aplicar la dosis x .

No: Número de HH inicialmente.

En la Figura 5 se observa que las eficiencias de inactivación fueron de 3.4 a 12.6 % para el Cl₂, de 3.4 a 58.6 % para el APA y de 3.4 a 21.8 % para APF.

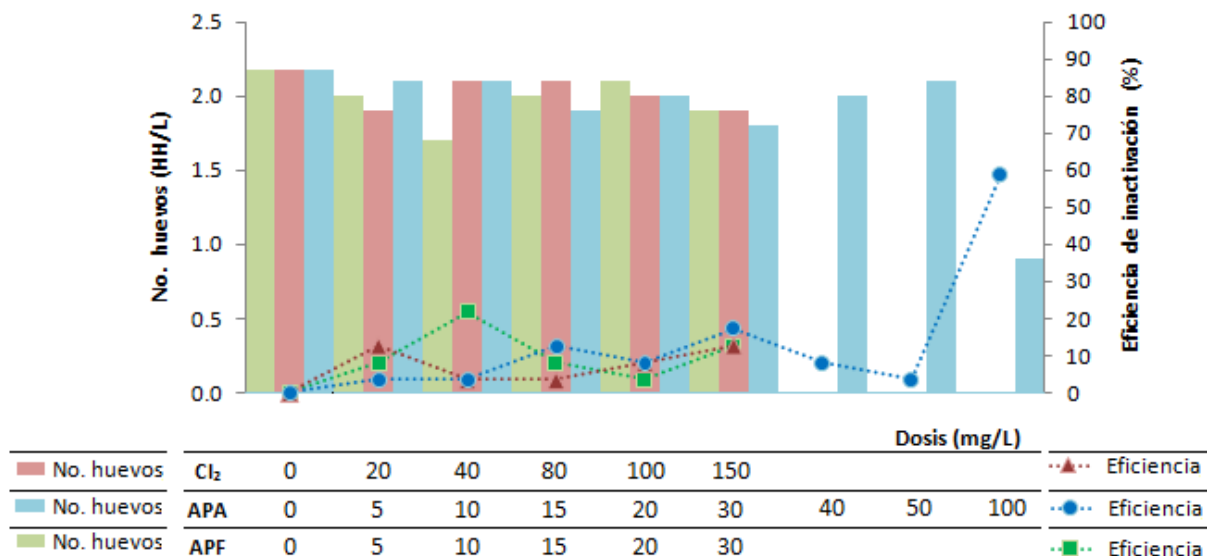


Figura 5 El efecto de la desinfección en la inactivación de los huevos de helmintos en la matriz AR

6.1.2.4 Dosis efectiva de inactivación para cada organismo

En la Tabla 23 se muestran las dosis efectivas de inactivación requeridas para cada organismo, tomando en cuenta la concentración inicial de la matriz AR, la dosis efectiva para CF fue de 150 mg/L de Cl₂ y 30 mg/L para APF. Para el caso de BF y QG se requiere una dosis por arriba de 150 mg/L para Cl₂, 100 mg/L para APA y 30 mg/L para APF.

Tabla 23 Dosis efectivas (experimental y calculada) de inactivación en la matriz AR

Desinfectante	Indicador	Experimental		Extrapolación	
		Dosis (mg/L)	Reducción (log)	Dosis (mg/L)	Reducción (log)
Cl ₂ (TC: 30 min)	Bacteriófagos	> 150	4.6	192	5.9
	CF	150	7.4	-	-
	<i>Giardia</i> spp.	> 150	2.2	205	3.0
	Helmintos	> 150	13*	1154	100*(2.2 HH)
APA (TC: 5 min)	Bacteriófagos	> 100	3.7	159	5.9
	CF	> 100	5.7	130	7.4
	<i>Giardia</i> spp.	> 100	2	149	3.0
	Helmintos	> 100	59*	170	100*(2.2 HH)
APF	Bacteriófagos	> 30	4.6	38	5.9

(TC: 5 min)	CF	30	7.4	-	-
	<i>Giardia</i> spp.	> 30	2.7	34	3.0
	Helmintos	> 30	13*	231	100*(2.2 HH)

CF, coliformes fecales; *, % de eficiencia de inactivación; >, denota que es preciso aumentar la dosis por arriba del valor propuesto para obtener la inactivación total del organismo; TC, tiempo de contacto; HH, huevos de helminto.

Para aquellos organismos que no se inactivaron totalmente en la fase experimental, con base en los resultados obtenidos, se llevó a cabo la extrapolación de la posible dosis efectiva de inactivación. Para la inactivación total de BF se requerirían 192, 159 y 38 mg/L de Cl₂, APA y APF, respectivamente; para el caso de la inactivación total de QG se necesitarían 205, 149 y 34 mg/L de Cl₂, APA y APF, respectivamente. En el caso de HH las dosis requeridas son extremas, tanto para Cl₂ y APF.

6.1.2.5 Análisis estadístico

El análisis de ANOVA factorial del modelo de tres factores con un factor anidado (Anexo I), muestra que hay efecto significativo ($\alpha=0.05$) de las diferentes dosis aplicadas de cada desinfectante en la inactivación de los bacteriófagos, coliformes fecales y quistes de *Giardia* spp. Es decir, la inactivación descendiente de cada organismo es consecuencia de la interacción que tiene el efecto de las dosis de cada desinfectante y el efecto de la resistencia inherente a cada organismo.

Para establecer cuál de las condiciones fueron estadísticamente iguales o diferentes se realizó la prueba de comparaciones múltiples de Bonferroni, por lo que se fijó el factor desinfectante [dosis]. Esta prueba interpreta la comparación del comportamiento de cada organismo ante el efecto desinfectante de cada dosis asignada, es decir, la cantidad de inactivación de cada organismo es igual o diferente ($\alpha=0.05$) después de aplicar cada dosis establecida del desinfectante.

a) Factor fijo: Cl₂

Al comparar la cantidad de inactivación entre BF, CF y QG con cada dosis de Cl₂ (20 a 150 mg/L), el análisis mostró, que la cantidad de inactivación del organismo fue estadísticamente igual en los siguientes casos: 1) al cotejar la inactivación de CF y BF empleando 80 mg/L, 2) al contrastar la inactivación de CF y QG utilizando 30 y 80 mg/L y 3) al comparar la inactivación de BF y QG usando 100 y 150 mg/L.

b) Factor fijo: APA

Al relacionar la cantidad de inactivación obtenida para cada organismo aplicando cada dosis de APA (5 a 100 mg/L), la prueba indicó que la mayoría de las comparaciones fueron estadísticamente diferentes, excepto al contrastar la inactivación de CF y BF empleando 30 mg/L.

c) Factor fijo: APF

Al comparar la cantidad de inactivación de cada organismo con cada dosis de APF (5 a 30 mg/L), la prueba mostró que la mayoría de los casos fueron estadísticamente diferentes; excepto en las siguientes condiciones: 1) al cotejar la inactivación de CF y BF empleando 15 mg/L, 2) al contrastar la inactivación de CF y QG utilizando 15 y 30 mg/L y 3) al comparar la inactivación de BF y QG usando 20 mg/L.

6.1.3 Desinfección en la matriz del efluente fisicoquímico (EF)

6.1.3.1 Efecto desinfectante sobre bacteriófagos (BF), coliformes fecales (CF) y quistes de *Giardia* spp. (QG)

En la Figura 6 se muestra la tendencia descendiente que presenta la inactivación de BF, CF y QG después de aplicar las diferentes dosis de Cl₂, APA y APF en el efluente fisicoquímico. Por ejemplo, con una dosis de 50 mg/L de Cl₂ se registraron valores de 4.0, 6.0 y 1.5 log de inactivación para BF, CF y QG, respectivamente; mientras que con una dosis de 30 mg/L de APA las

inactivaciones alcanzadas fueron de 2.5, 6.2 y 2.5 log, respectivamente. Valores similares se obtienen al aplicar una dosis de 10 mg/L de APF.

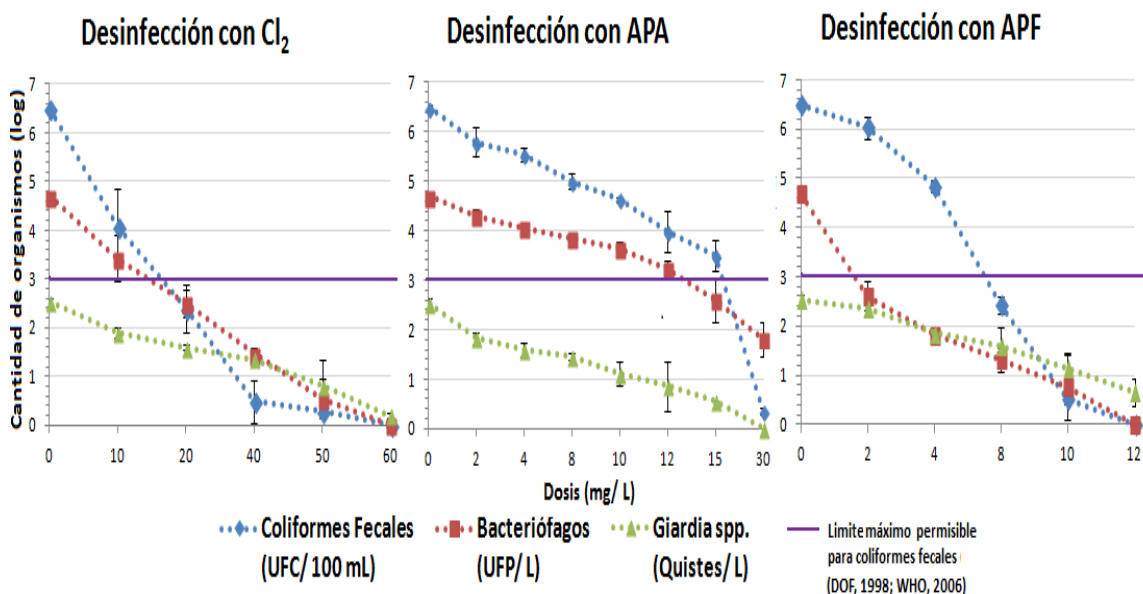


Figura 6 El efecto de la desinfección en la inactivación de organismos en la matriz EF

En la Tabla 24 se muestran aquellas dosis que cumplen las especificaciones en cuanto a los límites máximos permisibles para coliformes fecales de la NOM-003-SEMARNAT-1997, el efluente generado después de la desinfección Cl₂ podría ser reutilizado para servicios al público con contacto indirecto, mientras que la desinfección con APA y APF genera un efluente con uso potencial para servicios al público con contacto directo.

Tabla 24 Dosis que cumplen las especificaciones para CF de la NOM-003-SEMARNAT-1997 en la matriz EF

Cl ₂ (TC: 30 min)		APA (TC: 5 min)		APF (TC: 5 min)	
Dosis (mg/L)	Reducción (log)	Dosis (mg/L)	Reducción (log)	Dosis (mg/L)	Reducción (log)
20	4.1	15	3.0	8	4.0
40	6.0				
50	6.2				
60	6.5				

TC: tiempo de contacto; LMP: Límite Máximo Permisible

6.1.3.2 Cinética de inactivación para BF, CF y QG

El modelo cinético de Selleck (Tabla 25) indica que la eficiencia del desinfectante, de menor a mayor, fue de la siguiente forma: APA < Cl₂< APF y con respecto a la resistencia de los organismos comparados fue: CF < BF < QG. Aunque se registraron valores de r² entre 0.77 – 0.89, dicho modelo, confirma la dependencia entre decrecimiento de cada organismo y la acción de las dosis aplicadas de cada desinfectante.

Tabla 25 Constantes de inactivación del modelo cinético en la matriz EF

Desinfectante		Cl ₂			APA			APF		
Organismo		CF	BF	QG	CF	BF	QG	CF	BF	QG
Constante	<i>b</i>	11.52	8.43	2.73	4.47	2.08	1.09	7.12	1.36	1.10
	<i>n</i>	5.63	3.87	1.34	4.20	2.10	1.58	7.07	3.07	1.55
	r ²	0.99	0.96	0.86	0.77	0.83	0.89	0.86	0.91	0.95

6.1.3.3 Efecto desinfectante sobre los HH

En la Figura 7 se muestra la cantidad de HH y el porcentaje de eficiencia de inactivaciones obtenidas, después de aplicar las dosis establecidas por cada proceso de desinfección. La concentración inicial es de 1.1 HH/L.

El monitoreo del porcentaje de eficiencia (% E) de los HH en cada proceso de desinfección fue para el caso del Cl₂ de 2.2 a 20 %, para el APA de 11.1 a 55.6 % y para el APF de 2.32 a 28.9 %.

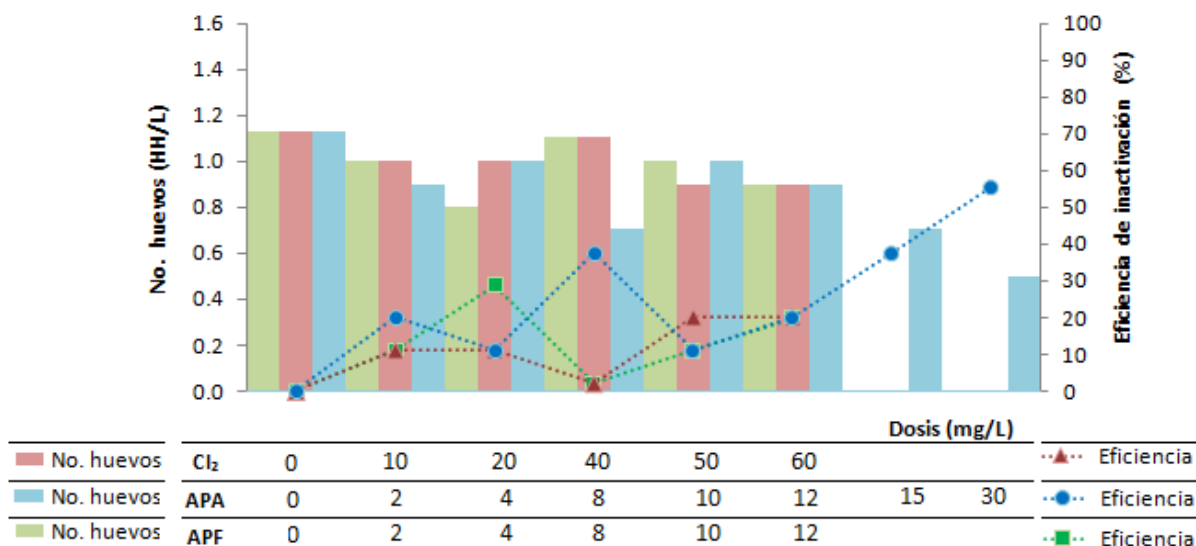


Figura 7 El efecto de la desinfección en la inactivación de los huevos de helmintos en la matriz EF

6.1.3.4 Dosis efectivas para cada organismo

En la Tabla 26 se observan las dosis que lograron la inactivación total de cada uno de los microorganismos y para aquellos organismos que no se inactivaron totalmente en la fase experimental, con base en una extrapolación se establecieron las dosis efectivas. Para el caso del APA y para inactivar BF y CF sería necesario aplicar una dosis efectiva de 49 mg/L. La inactivación de QG requeriría una dosis de efectiva de 65 y 19 mg/L de Cl₂ y APF, respectivamente. Las dosis requeridas para la inactivación de HH, tanto para el caso de Cl₂ como de APF, nuevamente son altas (300 y 60 mg/L de Cl₂ y APF).

Tabla 26 Dosis efectivas (experimental y calculada) de inactivación en la matriz EF

Desinfectante	Indicador	Experimental		Extrapolación	
		Dosis (mg/L)	Reducción (log)	Dosis (mg/L)	Reducción (log)
Cl ₂ (TC: 30 min)	Bacteriófagos	60	4.7	-	-
	CF	60	6.5	-	-
	<i>Giardia</i> spp.	60	2.4	65	2.6
	Helmintos	> 60	20*	300	100*(1.1 HH)

APA (TC: 5 min)	Bacteriófagos	> 30	2.9	49	4.7
	CF	> 30	6.1	32	6.5
	<i>Giardia</i> spp.	30	2.6	-	-
	Helminfos	> 30	56*	54	100*(1.1 HH)
APF (TC: 5 min)	Bacteriófagos	12	4.9	-	-
	CF	12	6.5	-	-
	<i>Giardia</i> spp.	> 12	1.6	19	2.6
	Helminfos	> 12	20*	60	100*(1.1 HH)

CF, coliformes fecales; TC, tiempo de contacto; *, % de eficiencia de inactivación; >, denota que es preciso incrementar la dosis para obtener la inactivación total; HH, huevo de helminto

6.1.3.5 Análisis estadístico

El análisis de ANOVA factorial de la matriz EF, es similar al registrado en la matriz AR y de acuerdo con la prueba de comparaciones múltiples de Bonferroni (Anexo I). Se obtuvieron los siguientes resultados:

Factor fijo: Cl₂

Al comparar la cantidad de inactivación entre BF, CF y QG con cada dosis de Cl₂ (10 a 60 mg/L), el análisis mostró, que la cantidad de inactivación de los organismo fue estadísticamente igual en la mayoría de las dosis aplicadas. Excepto en los siguientes casos: empleando 10 mg/L, 1) al cotejar la inactivación de CF con QG y 2) al contrastar la inactivación de BF con QG.

Factor fijo: APA

Al relacionar la cantidad de inactivación obtenida para cada organismo aplicando cada dosis de APA (2 a 30 mg/L), la prueba indicó, que la gran mayoría de las comparaciones fueron estadísticamente diferentes, excepto al contrastar la inactivación de CF y BF empleando de 8, 10, 12, 15 y 30 mg/L.

Factor fijo: APF

Al comparar la cantidad de inactivación de cada organismo con cada dosis de APF (2 a 12 mg/L), la prueba mostró que en la mayoría de los casos fueron estadísticamente diferentes; excepto en las siguientes condiciones: 1) al cotejar la inactivación de CF, BF y QG empleando 10 mg/L, 2) al contrastar la inactivación de CF y QG utilizando 10 y 12 mg/L y 3) al comparar la inactivación de BF y QG aplicando 12 mg/L.

6.1.4 Desinfección en la matriz del efluente biológico (EB)

6.1.4.1 Efecto desinfectante sobre bacteriófagos (BF), coliformes fecales (CF) y quiste de *Giardia* spp. (QG)

En la Figura 8 se muestra la tendencia decreciente que presenta la inactivación de BF, CF y QG, después de aplicar las diferentes dosis de Cl₂, APA y APF en el efluente biológico. por ejemplo, con una dosis de 5 mg/L de Cl₂ se registraron valores de 2.4, 0.8 y 0.6 log de inactivación para BF, CF y QG, respectivamente, mientras que con una dosis de 4 mg/L APF se observó una inactivación de 3.3 log para BF, 3.7 log de CF y 0.8 log QG. Para el caso del APF con dosis de 6, 8 y 10 mg/L los valores de inactivación fueron mayores para BF, CF y QG, que con respecto a los registrados con el APA.

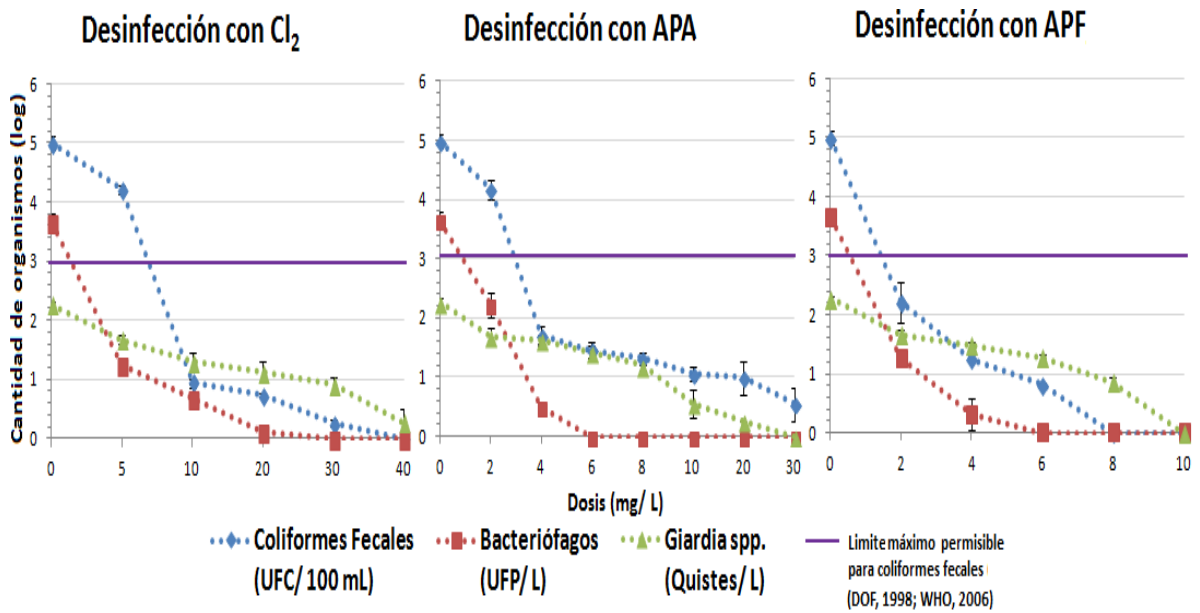


Figura 8 El efecto de la desinfección en la inactivación de organismos en la matriz EB

En la Tabla 27 se muestran aquellas dosis que cumplen las especificaciones en la NOM-003-SEMARNAT-1997 para coliformes fecales, el efluente creado con esta calidad bacteriológica podría ser reutilizado para servicios al público con contacto directo.

Tabla 27 Dosis que cumplen las especificaciones para CF de la NOM-003-SEMARNAT-1997 en la matriz EB

Cl ₂ (TC: 30 min)		APA (TC: 5 min)		APF (TC: 5 min)	
Dosis (mg/L)	Reducción (log)	Dosis (mg/L)	Reducción (log)	Dosis (mg/L)	Reducción (log)
10	4.0	4	3.3	4	3.7
20	6.0	6	3.5	6	4.2
30	6.2	8	3.7	8	5.0
40	6.5	10	3.9	10	5.0
		20	4.0		
		30	4.5		

TC: tiempo de contacto; LMP: Limite Máximo Permisible

6.1.4.2 Cinética de inactivación para BF, CF y QG

En la Tabla 28 se muestran las constantes de inactivación obtenidas aplicando el modelo cinético de Selleck. y de acuerdo con los valores indica que la eficiencia de inactivación del organismo de menor a mayor fue de la siguiente forma: Cl₂ < APA < APF y con respecto a la resistencia de los organismos comparados: BF < CF < QG.

Tabla 28 Constantes de inactivación del modelo cinético en la matriz EB

Desinfectante		Cl ₂			APA			APF		
Organismo		CF	BF	QG	CF	BF	QG	CF	BF	QG
Constante	<i>b</i>	7.54	0.68	1.35	0.73	-0.77	-0.05	0.57	-0.69	0.18
	<i>n</i>	4.19	1.46	0.91	2.56	1.55	0.51	3.32	1.87	0.78
	<i>r</i> ²	0.81	0.94	0.95	0.73	0.57	0.84	0.97	0.86	0.97

6.1.4.3 Efecto desinfectante sobre los HH

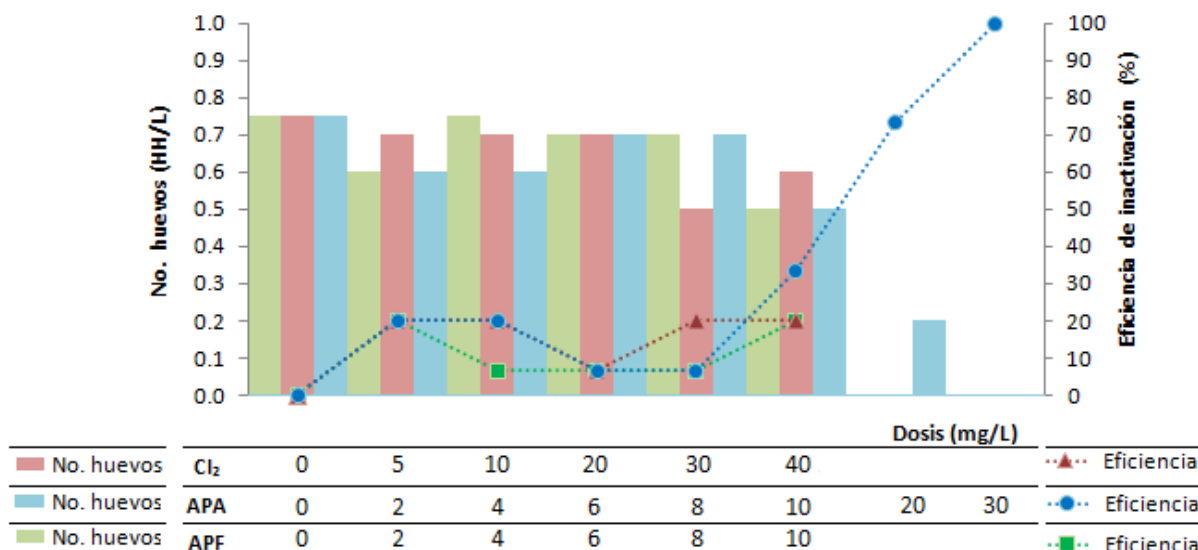


Figura 9 El efecto de la desinfección en la inactivación de los huevos de helmintos en la matriz EB

En la Figura 9 se muestra el porcentaje de eficiencia de inactivación de HH después de cada proceso de desinfección, el cual se expresó de acuerdo a la ecuación [19]. La cantidad máxima de HH que se detectó en el efluente biológico fue de 0.75 ± 0.1 HH/L. Se observan eficiencias de inactivación similares con la desinfección con Cl_2 y APF (6.7 a 20 %), mientras para el APA fue de 6.7 a 100 %.

6.1.4.4 Dosis efectivas de inactivación de cada organismo

En la Tabla 29 se muestran las dosis de inactivación de cada organismo, la mayoría de las dosis aplicadas de cada desinfectante en la fase experimental lograron la inactivación total de los organismos. En el caso de la desinfección con Cl_2 la dosis efectiva para BF y CF fue 30 y 40 mg/L, respectivamente. Para el caso de APA se requirió una dosis de 6 mg/L para inactivar totalmente BF y para el resto de los organismos evaluados fue necesario suministrar 30 mg/L. En la desinfección con APF, la dosis efectiva para BF, CF y QG fueron de 6, 8 y 10 mg/L, respectivamente.

Con respecto a los huevos de helmintos, se logró un 100% de inactivación para el caso del APA, no así para el caso del Cl_2 y APF donde aún con las dosis mayores probadas se obtuvo únicamente un 20% de inactivación.

Tabla 29 Dosis efectivas (experimental y calculada) de inactivación en la matriz EB

Desinfección	Indicador	Experimental		Extrapolación	
		Dosis (mg/L)	Reducción (log)	Dosis (mg/L)	Reducción (log)
Cl_2 (TC: 30 min)	Bacteriófagos	30	3.6	-	-
	CF	40	5.0	-	-
	<i>Giardia</i> spp.	> 40	2.0	46	2.3
	Helmintos	> 40	20*	200	100*(0.8 HH)
APA (TC: 5 min)	Bacteriófagos	6	2.9	-	-
	CF	30	5.0	-	-
	<i>Giardia</i> spp.	30	2.3	-	-
	Helmintos	30	100*	-	-

APF (TC: 5 min)	Bacteriófagos	6	2.9	-	-
	CF	8	5.0	-	-
	<i>Giardia</i> spp.	10	2.3	-	-
	Helmintos	> 12	20*	60	100*(0.8 HH)

CF, coliformes fecales; *, % de eficiencia de inactivación; >, denota que es preciso aumentar la dosis por arriba del valor propuesto para obtener la inactivación total del organismo; TC, tiempo de contacto; HH, huevos de helminto.

6.1.4.5 Análisis estadístico

En el Anexo I se muestra el análisis de ANOVA factorial de la matriz EB y con base en los valores del factor fijo para cada desinfectante se determinó que:

Factor fijo: Cl₂

Al comparar la cantidad de inactivación de cada organismo con cada dosis de Cl₂ (5 a 40 mg/L), la prueba mostró, que la inactivación de cada organismo fue estadísticamente igual en los siguientes casos: 1) al cotejar la inactivación de CF y BF empleando 10, 30 y 40 mg/L, 2) al contrastar la inactivación de CF y QG utilizando 10, 20 y 40 mg/L y 3) al cotejar la inactivación de BF y QG aplicado 5 y 40 mg/L.

Factor fijo: APA

Al cotejar la cantidad de inactivación de BF, CF y QG con cada dosis de APA (2 a 30 mg/L), el análisis mostró, que la inactivación de cada organismo fue estadísticamente igual en los siguientes casos: 1) al comparar la inactivación de CF y QG usando 4, 6, 8 y 10 mg/L, 2) al contrastar la inactivación de BF con QG empleando 2 mg/L de APA.

Factor fijo: APF

Al comparar la cantidad de inactivación de cada organismo con cada dosis de APF (2 a 10 mg/L), la prueba evidenció, que la inactivación de cada organismo fue

estadísticamente igual en los siguientes casos: 1) al contrastar la inactivación de CF con BF aplicando 8 mg/L, 2) al cotejar la inactivación de BF y QG utilizando 2 mg/L y 3) al comparar la inactivación de CF con QG usando 4 y 6 mg/L de APF.

6.2 SEGUNDA ETAPA DE LA FASE EXPERIMENTAL

6.2.1 Caracterización biológica y fisicoquímica inicial de las matrices de estudio

En la Tablas 30 y 31 se observa la caracterización biológica y fisicoquímica para cada una de las tres matrices de estudio. La matriz que presentó los menores valores de concentración para ambos tipos de parámetros fue el efluente biológico (EB), seguido por el efluente fisicoquímico (EF) y por la matriz agua residual (AR). Con respecto a los huevos de helmintos, los valores observados fueron de 2.7, 1.0 y 0.6 HH/L para AR, EF y EB.

Tabla 30 Caracterización de parámetros biológicos de las tres matrices de agua

Organismo	Matriz	Concentración		Prom \pm ds (U log)
		mínima	máximo	
Bacteriófagos (UFP/ L)	AR	1.8×10^5	9.4×10^5	5.8 ± 0.1
	EF	1.5×10^3	1.3×10^4	3.5 ± 0.1
	EB	5.0×10^2	3.7×10^3	2.6 ± 0.1
Coliformes Fecales (UFC/100mL)	AR	6.6×10^6	3.6×10^7	7.3 ± 0.1
	EF	1.1×10^6	3.1×10^6	6.2 ± 0.1
	EB	1.2×10^4	3.6×10^5	4.3 ± 0.1
Quistes de <i>Giardia</i> spp. (Q/L)	AR	650	660	2.8 ± 0.0
	EF	81	90	1.9 ± 0.1
	EB	79	80	1.9 ± 0.1
Huevos de helmintos (HH/L)*	AR	2.4	3.0	$*2.7 \pm 0.1$
	EF	0.8	1.2	$*1.0 \pm 0.1$
	EB	0.6	0.6	$*0.6 \pm 0.1$

* Cantidad de huevos de helmintos por litro. Prom; media aritmética. U log; unidades logarítmicas; UFP/L, unidades formadoras de placa por cada litro; UFC/100 mL, unidades formadoras de colonia por cada 100 mL.

Los parámetros fisicoquímicos de las 3 matrices de estudio se muestran en la Tabla 31. Para el caso de pH y temperatura los valores son equivalentes. No así para la turbiedad, SST y COD los cuales disminuyen en su concentración, siendo los mayores para AR y los menores para EB.

Tabla 31 Caracterización de algunos parámetros fisicoquímicos de las tres matrices de agua

Parámetro	AR	EF	EB
	Prom ± ds	Prom ± ds	Prom ± ds
Turbiedad (NTU)	150 ± 24	47 ± 7	2.0 ± 0.6
pH	7.4 ± 0.0	7.4 ± 0.1	7.2 ± 0.0
Temperatura (°C)	17.7 ± 0.7	18 ± 1.0	17.2 ± 1.0
Conductividad (µS/cm)	812 ± 40	811 ± 41	624 ± 17
COD total (mg/L)	342 ± 63	128 ± 27	24 ± 4
SST (mg/L)	104 ± 16	31 ± 3.0	2 ± 0.5

AR: agua residual. EF: efluente fisicoquímico. EB: efluente biológico. Prom: media aritmética. ds: desviación estándar. SST: sólidos suspendidos totales. COD t: carbón orgánico total disuelto.

6.2.2 Efecto desinfectante del APF sobre BF, CF y QG

Los resultados correspondientes a las pruebas desarrolladas para evaluar el efecto del APF a diferentes tiempos de contacto (Figura 10), sobre la inactivación de los diferentes grupos de organismos se muestran en la Figura 9. Para el caso de la matriz AR se aplicaron dosis de 5 y 10 mg/L y para las matrices EF y EB dosis de 5 mg/L. Las dosis seleccionadas, obtenidas en la primera etapa, fueron las mínimas requeridas y a las cuales los CF cumplieron con el límite máximo permisible por la NOM-001-SEMARNAT-1996 y la NOM-003-SEMARNAT-1997.

Como se puede observar, la inactivación de los organismos en la matriz AR fue mayor aplicando una dosis de 10 mg/L que con 5 mg/L. Esta tendencia se muestra desde el primero hasta el último tiempo de contacto empleado. Asimismo, se observa que la inactivación de BF y CF, con un tiempo de contacto de 120 min en

la matriz EF, que con respecto a la inactivación alcanzada en la matriz AR_10 (e inclusive al compararla con la matriz AR_5), es mayor. Por ejemplo, con 60 min de exposición se inactivaron 3.6 log de BF y 5.8 log de CF; mientras que en la matriz AR_10 se obtuvieron valores de inactivación de 2.9 y 5.0 log, respectivamente.

La inactivación de los organismos en la matriz EB es mayor en tiempos de contacto menores con respecto a los valores registrados en la matriz AR y EF; excepto a la observada para BF y CF con 15 min de contacto, donde y aunque la diferencia es mínima, ésta es mayor en la matriz EF (3.2 y 4.6 log, respectivamente) que en la matriz EB (2.6 y 4.1 log, respectivamente).

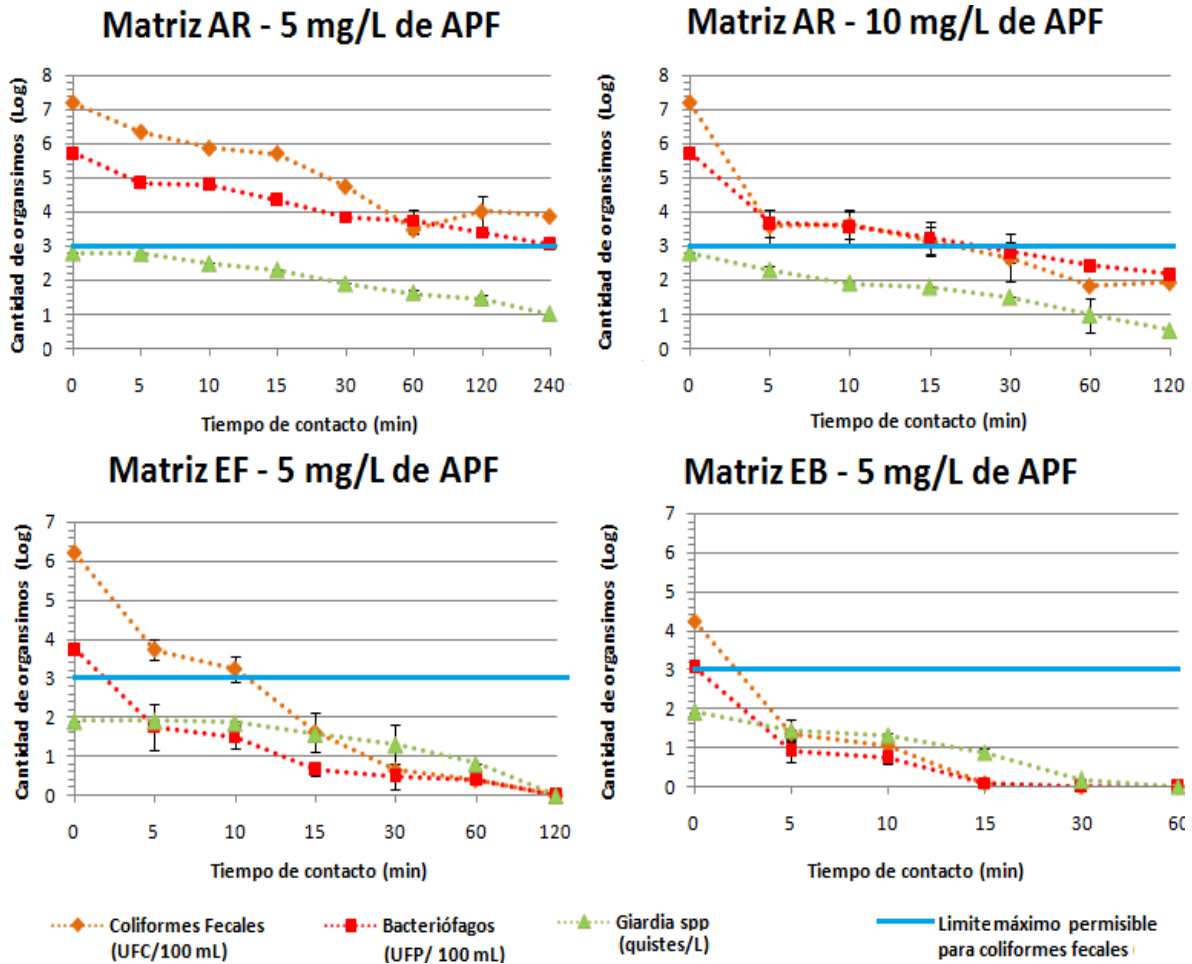


Figura 10 Efecto del APF en la inactivación de los organismos en las matrices de estudio

En la Tabla 32 se muestran los tiempos de contacto que cumplen las especificaciones en cuanto a los límites máximos permisibles para coliformes fecales la NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997, se observa que la matriz AR podría ser reutilizada para servicios al público con contacto indirecto, mientras que el efluente de la matriz EF y EB tienen un uso potencial para servicios al público con contacto directo.

Tabla 32 Tiempos de contacto que cumplen las especificaciones para CF de la NOM-003-SEMARNAT-1997

AR_5		AR_10		EF		EB	
Dosis (mg/L)	Reducción (log)	Dosis (mg/L)	Reducción (log)	Dosis (mg/L)	Reducción (log)	Dosis (mg/L)	Reducción (log)
60	3.2	10	3.6	15	4.6	10	3.2
120	3.3	15	4.0	30	5.5	15	4.1
240	4.0	30	4.5	60	5.8	30	4.2
		60	5.2	120	6.2	60	4.2
		120	5.3				

6.2.3 Cinética de inactivación de BF, CF y QG

En la Tabla 33 se muestran los valores de las constantes de inactivación del modelo cinético de Selleck, se especifica que la eficiencia del APF en las matrices, de menor a mayor, es de la siguiente forma: AR_5 < AR_10 < EF_5 < EB_5 y con respecto a la resistencia de los organismos es: CF < BF < QG.

Tabla 33 Constante de cada modelo cinético de inactivación aplicando APF

Cte.	Matriz AR_5			Matriz AR_10			Matriz EF			Matriz EB		
	BF	CF	QG	BF	CF	QG	BF	CF	QG	BF	CF	QG
<i>b</i>	0.65	2.99	1.42	1.19	0.96	1.70	0.56	1.54	2.13	-0.53	-0.83	1.79
<i>n</i>	1.20	2.37	1.03	1.50	2.10	1.27	1.25	2.95	1.37	1.08	1.50	1.52
<i>r</i> ²	0.97	0.96	0.99	0.99	0.99	0.98	0.86	0.90	0.94	0.93	0.78	0.94

Cte, constante de inactivación; BF, bacteriófagos; CF, coliformes fecales; QG, quistes de *Giardia*

Aunque se registraron valores de r^2 igual a 0.78 y 0.86, el modelo confirma la dependencia (r^2) entre la inactivación del organismo y la acción de las dosis aplicadas del desinfectante para ocasionar la inactivación descendiente que presenta BF, CF y QG.

6.2.4 Efecto desinfectante del ácido per fórmico sobre los HH

En la Figura 11 se observa el porcentaje de eficiencia de inactivación de HH después de cada proceso de desinfección, el cual se expresó, de acuerdo con la ecuación [19]. La cantidad máxima de huevos de helmintos que se detectó fue de 2.7, 1.0 y 0.6 HH/L para las matrices AR, EF y EB, respectivamente. Se muestra que la eficiencia de inactivación en las matrices AR y EB son similares (21 a 89 %), mientras que para la matriz EF fue de 10 al 100 %, dependiendo del tiempo de contacto.

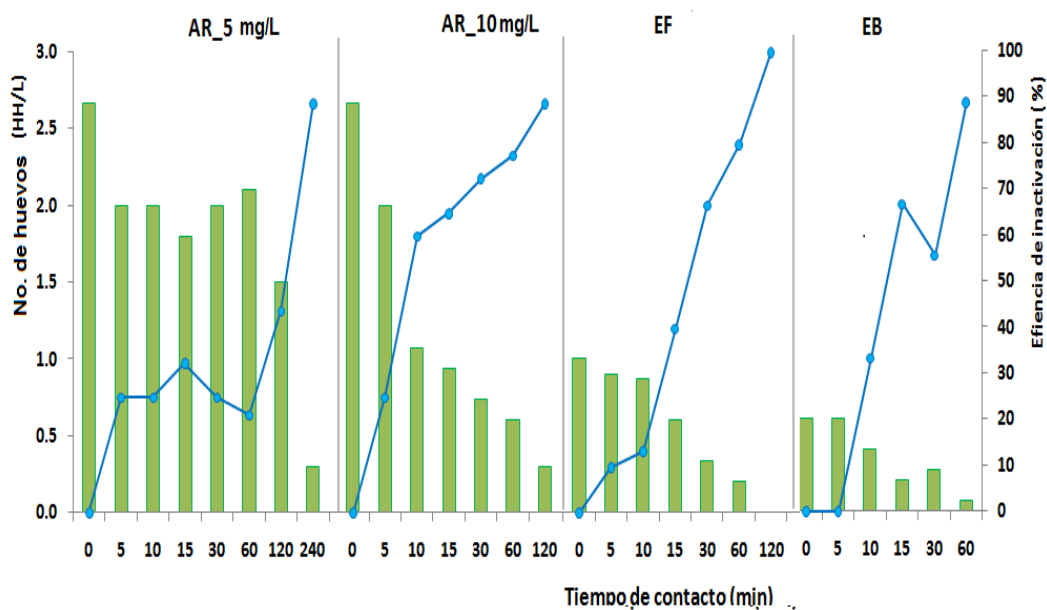


Figura 11 Efecto del APF en la inactivación de los huevos de helmintos en las tres matrices de estudio

6.2.5 Tiempos de contacto efectivos para cada organismo

En la Tabla 34 se observan los tiempos de contacto que lograron la inactivación total de cada uno de los organismos estudiados. En el caso de la matriz EF con una dosis de 60 mg/L de APF se logró obtener la dosis efectiva para BF, y con una dosis de 120 mg/L se inactivó totalmente CF, QG y HH. En la matriz EB, la dosis efectiva para BF y CF fue de 60 mg/L de APF, mientras que para QG correspondió a 60 mg/L.

Se muestra que para los organismos en la matriz EB ésta se llevó a cabo en tiempos de contacto menores a los registrados en las matrices EF y AR. Para los organismos que no se redujeron totalmente en la segunda fase experimental y con base en los resultados obtenidos, se llevó a cabo la extrapolación de los tiempos de contacto, mismos que podrían ser los efectivos de inactivación

Tabla 34 Tiempos de contacto efectivos de inactivación de cada organismo

Matriz	Indicador	Experimental		Extrapolación	
		Tiempo (min)	Reducción (log)	Tiempo (min)	Reducción (log)
AR_5	Bacteriófagos	> 240	3.0	453	5.7
	CF	> 240	4.0	429	7.2
	<i>Giardia</i> spp.	> 240	1.8	375	2.8
	Helminos*	> 240	89*	270	100*
AR_10	Bacteriófagos	> 120	3.4	200	5.7
	CF	> 120	5.4	160	7.2
	<i>Giardia</i> spp.	> 120	2.3	146	2.8
	Helminos*	> 120	89*	135	100*
EF	Bacteriófagos	60	3.7	-	-
	CF	120	6.3	-	-
	<i>Giardia</i> spp.	120	1.9	-	-
	Helminos *	120	100*	-	-
EB	Bacteriófagos	30	3.0	-	-
	CF	30	4.3	-	-
	<i>Giardia</i> spp.	60	1.9	-	-
	Helminos*	> 60	89*	67	100*

* % de eficiencia de inactivación; > denota que es preciso aumentar el tiempo de contacto por arriba del valor propuesto para obtener la inactivación total del organismo.

6.2.6 Análisis estadístico

El análisis de ANOVA factorial del modelo de tres factores con un factor anidado (Anexo I), indica que los tiempos de contacto sí ejercen la inactivación de los organismos de la siguiente manera:

Factor fijo: Matriz de agua.

En las tres matrices de estudio y en cada tiempo de contacto empleado, la inactivación de CF contra la de BF fue estadísticamente igual e inclusive aplicando 5 y 10 mg/L de APF en la matriz AR; se observa el mismo comportamiento al comparar la inactivación de BF contra la de QG.

En cuanto a la inactivación de CF y QG fue diferente ($\alpha=0.05$) en las siguientes condiciones: a los 60 y 120 min de exposición en la matriz AR_10 mg/L, desde los 15 hasta los 120 min de contacto en la matriz EF_5 mg/L y aplicando 15 min en la matriz EB_5 mg/L.

Factor fijo: Tipo de organismo

Sólo para el caso de la inactivación de CF en la matriz EB_5 mg/L comparada con la obtenida en la matriz AR_10 mg/L y la matriz EF_5 mg/L fueron estadísticamente diferentes. En resto de las condiciones (matriz y tiempo de contacto) la inactivación de BF, CF y QG fueron iguales ($\alpha=0.05$).

6.3 TERCERA ETAPA DE LA FASE EXPERIMENTAL

En la tercera y última etapa, se muestran los resultados obtenidos con respecto a las pruebas de recrecimiento a las 24, 48 y 72 h de tiempo de exposición y para cada una de las matrices de estudio (AR, EF y EB). Posteriormente, se presenta el

análisis de cada proceso de desinfección (APF, APA, Cl₂) en el cual se detallan por separado, los ensayos en presencia de luz y en oscuridad.

De las etapas anteriores de experimentación, se consideraron sólo aquellas dosis y tiempos de contacto mínimos requeridos para lograr cumplir con los límites máximos permisibles para CF (3 Log) por la NOM-001-SEMARNAT-1996 y la NOM-003-SEMARNAT-1997.

6.3.1 Caracterización biológica y fisicoquímica inicial de las matrices de estudio

La Tabla 35 muestra la matriz que presentó los menores valores de concentración de CF, turbiedad, SST y COD, la cual fue el efluente biológico (EB), seguido por el efluente fisicoquímico (EF) y por la matriz agua residual (AR), para el caso de pH y temperatura los valores son equivalentes en las matrices.

Tabla 35 Parámetros biológicos y fisicoquímicos de las tres matrices de agua

Parámetro	AR	EF	EB
Coliformes Fecales (UFC/100mL)	2.6×10^7	5.6×10^6	9.8×10^3
	1.2×10^8	7.9×10^7	5.0×10^4
pH	7.5	7.3	7.5
Temperatura (°C)	21.8	21.8	21.9
Conductividad (µS/cm)	865	899	646
Turbiedad (NTU)	155	57	0.97
COD total (mg/L)	382	185	16
SST (mg/L)	66	20	3

AR: agua residual. EF: efluente fisicoquímico. EB, efluente biológico. SST: sólidos suspendidos totales. COD t: carbón orgánico total disuelto.

6.3.2 Recrecimiento de CF en la matriz AR

En la Figura 12 se muestra la tendencia observada en cuanto al recrecimiento de coliformes fecales en la matriz AR, aplicando diferentes dosis de cada desinfectante durante 15 min de tiempo de exposición. Se observa que las dosis

aplicadas de Cl₂ y APF, fueron suficientes para reducir los CF a los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996; mientras que las dosis aplicadas de APA muestran crecimiento mayor.

Los ensayos de recrecimiento con presencia de luz aplicando los tres desinfectantes, desde las 24 h hasta las 72 h, sobrepasan las 3 log. Para el caso del experimento en obscuridad, en casi la totalidad de los casos, transcurrido el tiempo de 24, 48 y 72 h, el recrecimiento de CF excedió el límite máximo permisible establecido por la NOM-001-SEMARNAT-1996; excepto tras aplicar una dosis de 50 mg/L de Cl₂ a las 24 h.

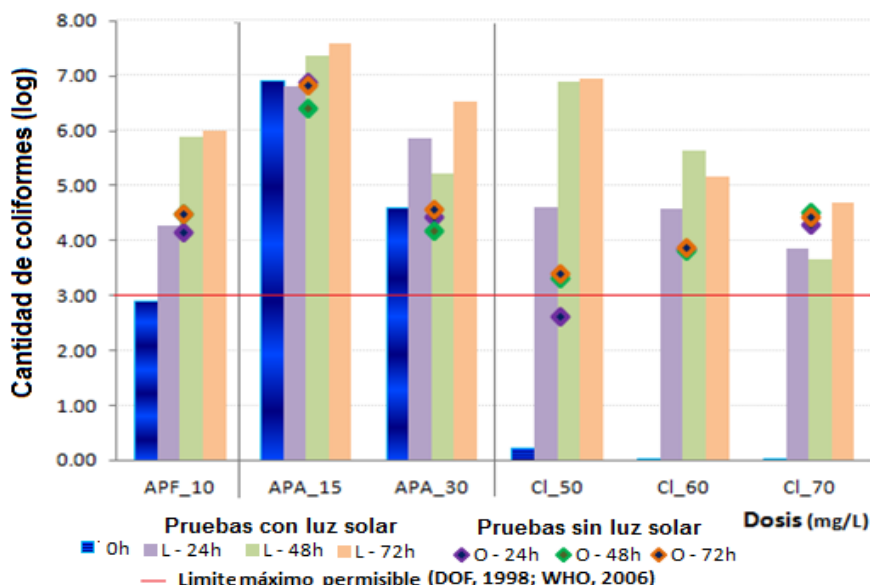


Figura 12 Recrecimiento de coliformes fecales en la matriz AR

6.3.3 Recrecimiento de CF en la matriz EF

En la Figura 13 se observa el comportamiento con respecto al recrecimiento de CF en la matriz EF, tras aplicar diferentes dosis de cada desinfectante durante 15 min de tiempo de contacto. Se muestra que las dosis utilizadas de APF, APA y Cl₂ tienen el mismo efecto que el observado en la matriz AR, con respecto a lo establecido por la NOM-003-SEMARNAT-1997: en presencia de luz y obscuridad,

después de aplicar una dosis de 15 mg/L de Cl₂ a las 24 h, se logra reducir los CF por debajo de 3 log.

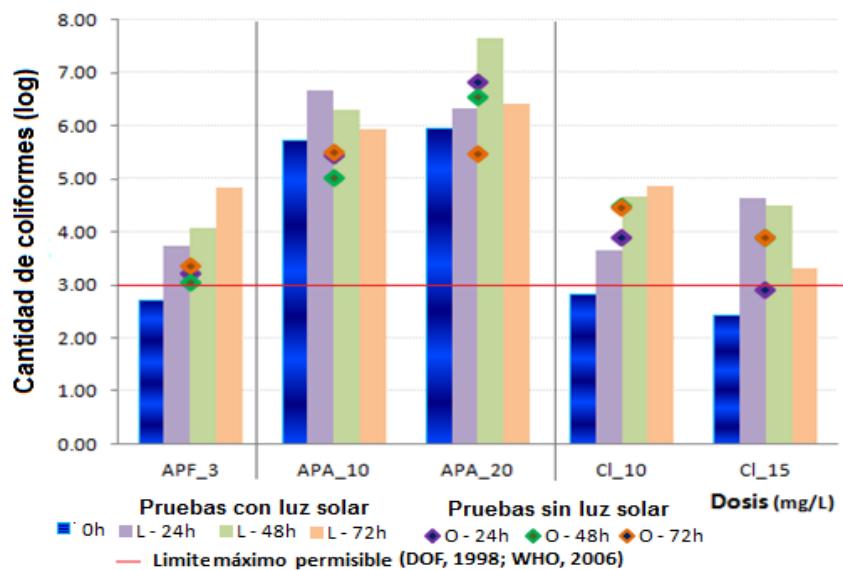


Figura 13 Recrecimiento de coliformes fecales en la matriz EF

6.3.4 Recrecimiento de CF en la matriz EB

A continuación se muestran los resultados de la reactivación de CF en la matriz EB. Los resultados se encuentran ordenados por desinfectante (cuatro dosis de APF, tres dosis de APA y Cl₂, a tres tiempos de exposición -10, 15 y 30 min) y el efecto desinfectante en presencia y ausencia de luz solar.

6.3.4.1 Efecto del Cl₂

En la Figura 14 se muestra la tendencia de recrecimiento después de la desinfección con cloro. Para todas las pruebas iniciales se logró obtener valores menores a 3 log. En los ensayos con presencia de luz, la concentración de CF registró datos que exceden la NOM-003-SEMARNAT-1997 desde las primeras 24 h. Con una dosis de 8 mg/L de Cl₂ con 10 y 15 min de contacto se sobrepasaron las 3 log, tanto, a las 48 como hasta 72 h.

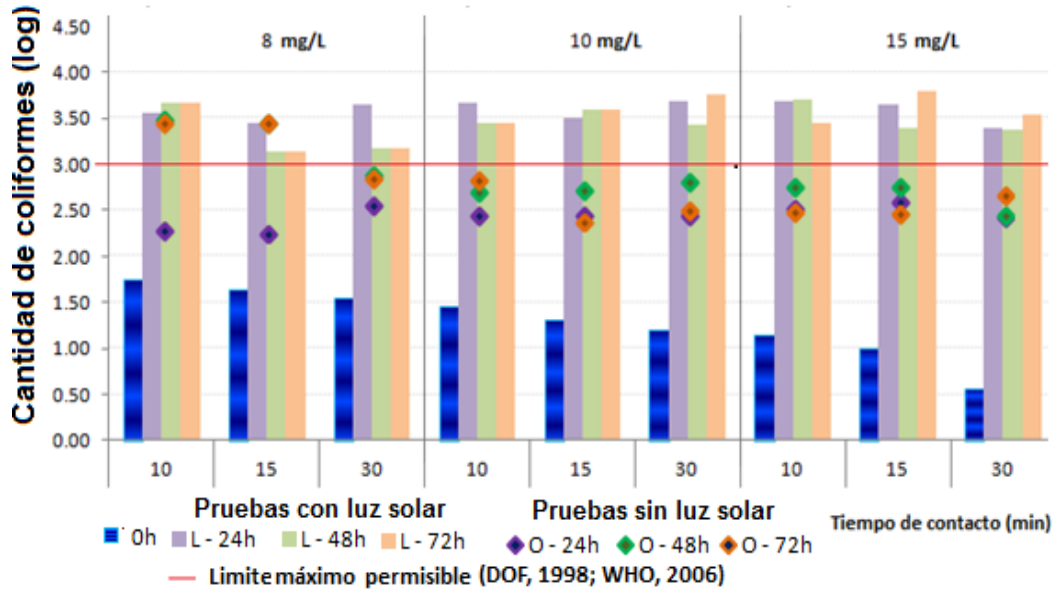


Figura 14 Recrecimiento de CF tras aplicar Cl₂ en la matriz EB

6.3.4.2 Efecto del APA

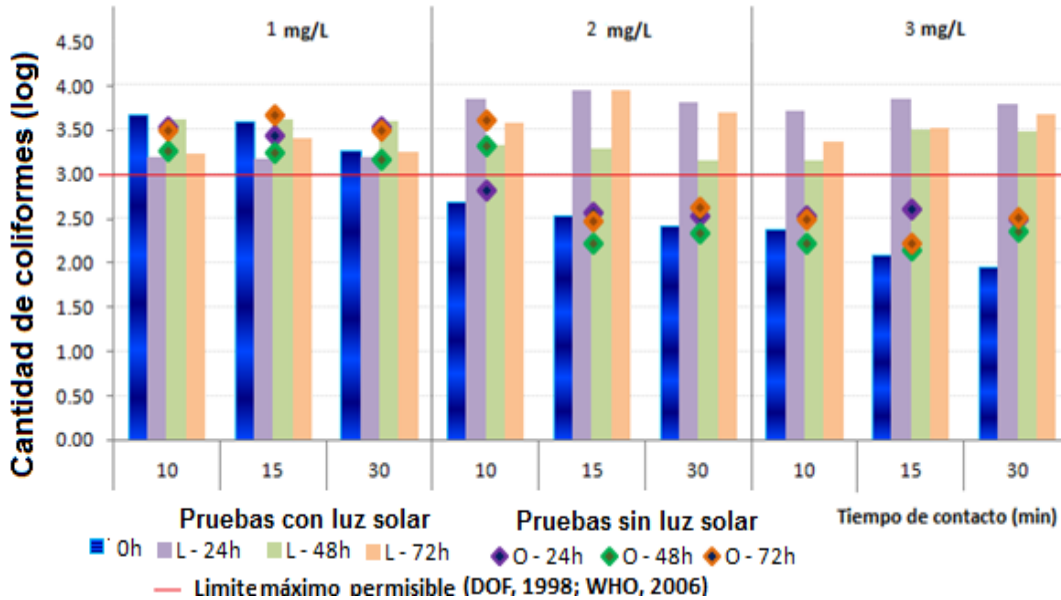


Figura 15 Recrecimiento de CF tras aplicar APA en la matriz EB

En la Figura 15 se muestra que en las pruebas sin luz solar la dosis de 1 mg/L de APA a los 10, 15 y 30 min de contacto excedió el límite permisible de la NOM-003-SEMARNAT-1997 para CF, mientras que a dosis de 2 y 3 mg/L de APA en los

tres tiempos de exposición sucedió lo contrario. Asimismo, se observa que todos los ensayos de recrecimiento con presencia de luz, la cantidad de CF se mantuvo por arriba de 3 log desde las 24 h.

6.3.4.3 Efecto del APF

La Figura 16 muestra que casi todas las condiciones de operación establecidas lograron cumplir con el límite máximo permisible de la NOM-003-SEMARNAT-1997. En el experimento en ausencia de luz se muestra que la única dosis que no cumplió la NOM-003-SEMARNAT-1997 hasta por un periodo de 72 h, es la de 0.5 mg/L con 10 min de contacto.

Aunque se registró el recrecimiento de CF en casi todas las pruebas en el estudio con presencia de luz, se observa que durante las 24 h la cantidad de CF no excedió las 3 Ulog. Este mismo comportamiento predomina hasta por 72 h con la dosis de 2 mg/L en los 3 tiempos de contacto.

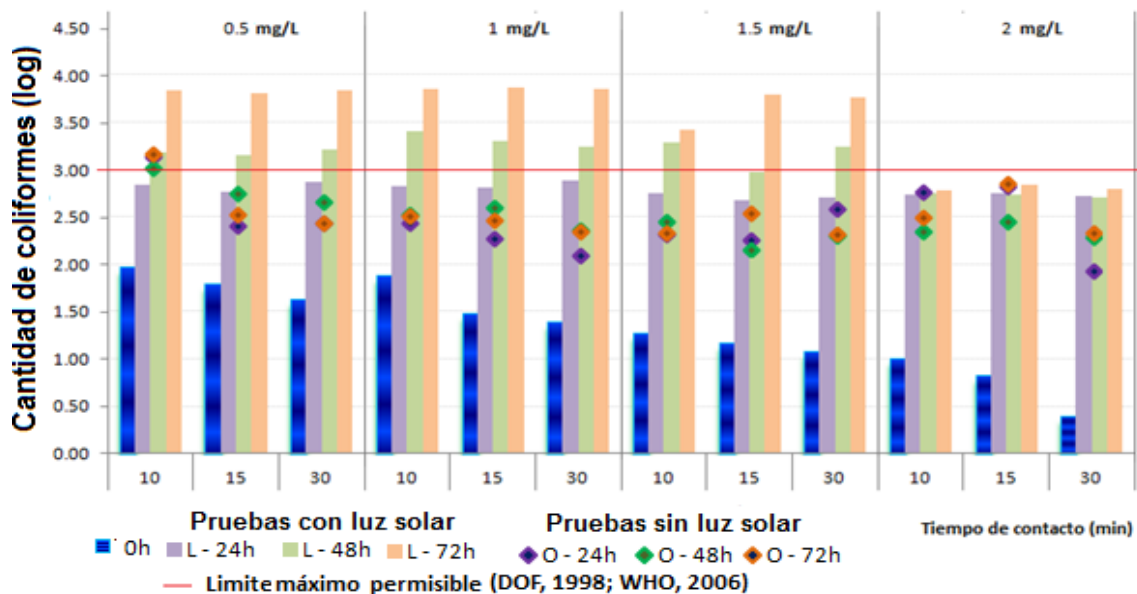


Figura 16 Recrecimiento de CF tras aplicar APF en la matriz EB

7 DISCUSIÓN

7.1 PRIMERA ETAPA EXPERIMENTAL

7.1.1 Caracterización de matrices

En la Tabla 18 se muestra la disminución en la concentración de BF, CF y QG, pero ninguna de las matrices cumplen con el límite máximo permisible establecido para CF por la NOM-001-SEMARNAT-1996 y la NOM-003-SEMARNAT-1997, aunque los valores registrados de los huevos de helmintos cumplan con lo establecido no es posible el reúso del agua en la agricultura o para servicios al público. La concentración de turbiedad, SST y COD que se observan en las matrices (Tabla 19), son características fisicoquímicas que tienden a beneficiar el proceso de desinfección (Metcalf y Eddy, 2003).

7.1.2 Desinfección en Matriz AR

Se requieren dosis menores de APF para cumplir con la NOM-001-SEMARNAT-1996 con respecto a CF (Tabla 21), para obtener las dosis efectivas (Tabla 23) y para lograr un mayor nivel de inactivación de cada organismo comparado con los otros procesos de desinfección (Figura 4). Con las mayores dosis aplicadas para el Cl₂ (100 y 150 mg/L) y APA (100 mg/L), los niveles de inactivación alcanzados para el caso de BF, CF y QG, fueron similares entre sí; sin embargo, el APA es más eficiente con las demás dosis aplicadas.

De acuerdo con la estadística descriptiva de inactivación de cada organismo (Figura 4), los valores del modelo cinético de Selleck (Tabla 22) y el efecto significativo de la interacción que tienen las dosis de cada desinfectante con cada organismo se determina que la eficiencia de la desinfección en la Matriz AR, de menor a mayor, es de la siguiente forma: Cl₂ < APA < APF y con respecto a la

resistencia de los organismos es: $CF < BF < QG$. La resistencia de los HH indica que hay poco efecto de cada desinfectante (Figura 5).

La resistencia que presentan los BF sobre los CF, está altamente influenciada por la densidad bacteriana, es decir, que a mayor densidad de huésped, mayor oportunidad de infección. Además de replicarse en el aparato digestivo de los animales de sangre caliente, también pueden hacerlo en medios acuáticos (Allowood, 2005; Gaviria et al., 2012).

Respecto a la turbiedad excesiva que presenta esta matriz, no solamente afecta los aspectos organolépticos del agua sino que puede representar una preocupación para la salud, ya que puede proporcionar el sustrato y además albergar a los patógenos, protegiéndolos de los desinfectantes. Aunque la turbiedad no es un indicador directo de riesgo para la salud, la US EPA en 1994 y 2004 reportan estudios que muestran una relación directa entre la remoción de turbiedad y de organismos (coliformes, virus entéricos y protozoarios).

El modelo de Selleck (Tabla 22), muestra la velocidad con la cual el desinfectante inactiva los microorganismos (constante n), la cual depende de muchos factores y no sólo de la función dependiente de la concentración del desinfectante y el tiempo de contacto que se observa con el modelo matemático. Las constantes y los coeficientes del modelo de decaimiento son obtenidos por regresión a partir de resultados experimentales del laboratorio, en condiciones controladas y conocidas para un determinado tipo de organismos (Daniel, 2001; Metcalf y Eddy, 2003). Elementos que no permiten asumir mucha confiabilidad en cuanto a la reproductividad de los resultados, sino más bien deben tomarse como datos estimativos para el proyecto.

También hay que tomar en cuenta que la desinfección engloba una serie de etapas físicas, químicas y bioquímicas complejas por lo tanto la inactivación de los organismos no se produce en forma instantánea, sino que el proceso ocurre

gradualmente. Asimismo existe la variabilidad de la calidad del agua, y que generalmente conviven diversas especies de microorganismos (Romero, 2004). Por otra parte, la concentración del desinfectante no es constante en el tiempo, ya que este reacciona con la materia orgánica e inorgánica, reduciendo su concentración e interfiriendo con la velocidad de inactivación, resultando en un desvío de los modelos matemáticos (Daniel, 2001, Metcalf y Eddy, 2003)

Con el fin de posibilitar el reúso de la Matriz AR después de la desinfección, así como de proteger el medio ambiente y la salud humana de su descarga se deben tomar en cuenta las especificaciones en la NOM-001-SEMARNAT-1996, en cuanto al contenido de bacterias (Figura 4) y parásitos (Figura 5), las dosis que se indican en Tabla 21 generan una calidad de agua que podría ser reutilizada para riego agrícola restringido.

7.1.3 Desinfección en Matriz EF

Aunque se utilizaron dosis menores de cada desinfectante que en la Matriz AR, la eficiencia de los desinfectantes fue similar a la registrada en la Matriz AR, es decir, el APF es más eficiente que el Cl_2 y el APA en cuanto a la inactivación de BF, CF y QG. Mientras que el APA es más eficaz con respecto a la desinfección con Cl_2 .

Conforme a los resultados observados y al comprarlos con los reportados a nivel internacional, Jardines (2000) y Üstün *et al.* (2011), reportan que con dosis de 3 y 8 mg/L de Cl_2 y un tiempo de contacto de 30 min es posible obtener 4 log de inactivación de coliformes fecales, mientras que en el presente estudio tal inactivación fue posible sólo cuando se aplicó una dosis de 20 mg/L de Cl_2 , con 30 min de exposición. Tal diferencia se puede explicar debido a que de forma previa al proceso de desinfección, tanto Jardines como Üstün *et al.* (2011), llevaron cabo una filtración, mejorando con ello la calidad del agua y la eficiencia del proceso.

Con lo que respecta al APA, con dosis de 2 a 8 mg/L y un tiempo de contacto de 5 min, se lograron de 0.4 a 0.9 log de inactivación de BF, valores semejantes a los reportados por Koivunen y Heinonen (2005), quienes registraron desde 0.2 a 0.9 log de inactivación, después de aplicar de 2 a 7 mg/L de APA, durante 4 a 27 min de contacto; los valores obtenidos en el presente experimento indican mejores condiciones de operación puesto que Koivunen y Heinonen (2005) trabajaron con una matriz inicial de efluente secundario a la cual le aplicaron dos procesos de precipitación con sulfato férrico y ferroso.

Para obtener una remoción de 3 log de CF se requirió aplicar una dosis de 15 mg/L de APA con 5 min de exposición. Resultados similares a los observados por Gerh *et al.* (2002) con condiciones similares de concentración inicial (6.8 log), una matriz inicial de agua residual sin tratamiento y después de aplicar el TPA con cloruro férrico se procedió a la desinfección, indica que con dosis de 4 y 6 mg/L de APA y 60 min de contacto obtiene remociones de 3 log de coliformes fecales.

Con los niveles de inactivación de cada organismo que se muestran en la Fig. 6, junto con el análisis del modelo cinético de Selleck (Tabla 25) y el efecto significativo de la interacción que tiene cada desinfectante con cada organismo se estipula que la eficiencia de la desinfección en la Matriz EF, de menor a mayor, es de la siguiente forma: $Cl_2 < APA < APF$ y con respecto a la resistencia de los organismos es: $CF < BF < QG$.

Los HH presentan un alto grado de resistencia a los desinfectantes (Figura 5), aspecto que concuerda con Orta *et al.* (2004) quienes reportan que es necesario aplicar dosis mayores a 10, 000 mg/L de Cl_2 para lograr la inactivación total de los HH. Mientras que en este estudio para lograr el 100% de inactivación se deberían administrar dosis por arriba de 60 mg/L de Cl_2 .

Con el fin de posibilitar el reúso de la Matriz EF después de la desinfección y cumpliendo con las especificaciones de la NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-

003-SEMARNAT-1997, en cuanto al contenido de microbiológico y de acuerdo con la Figura 6 y 7, las dosis que se indican en Tabla 24 generan una calidad de agua que podría ser reutilizada para riego agrícola restringido y para servicios al público con contacto indirecto u ocasional.

7.1.4 Desinfección en Matriz EB

La eficiencia de los desinfectantes fue similar a la registrada en la Matriz AR y EF, el APF es más eficiente que el Cl_2 y el APA ya que registra dosis mínimas efectivas y requiere menos dosis para obtener altos niveles de inactivación de BF, CF y QG. Mientras que el APA logra la inactivación total de BF con 6 mg/L y consigue 3 log de CF con 4 mg/L, la desinfección con Cl_2 conserva las condiciones antes mencionadas con 30 y 10 mg/L, respectivamente. Esto permite deducir que el APA es más eficaz que el Cl_2 .

Con respecto al proceso del APA, Koivunen y Heinonen (2005), partiendo de una concentración inicial de 3.4 log de bacteriófagos lograron inactivar de 0.3 a 1 log después de aplicar dosis de 2 a 7 mg/L, durante 4 a 7 min de contacto (con una etapa de precipitación con sulfato férrico antes del tratamiento con lodos activados), resultados similares a los observados en el presente trabajo (2 a 8 mg/L de APA y 5 min de exposición) al alcanzar una inactivación de 1.4 a 3.6 log, respectivamente.

En lo referente a la inactivación de CF, Lefevre *et al.* (1992); Liberti y Notarnicola (1999); Koivunen y Heinonen (2005) y Antonelli *et al.* (2006) reportan que con una dosis de 2 mg/L de APA durante 27 a 60 min de contacto se alcanzan de 0.5 a 1.5 unidades log de inactivación. El presente estudio mostró resultados comparables ya que tras aplicar una dosis de 2 mg/L de APA durante 5 min, se obtuvieron 0.8 unidades log de inactivación de CF. Los valores de inactivación, de entre 3.2 a 3.9 log después de aplicar dosis entre 2 a 10 mg/L de APA durante 5 min, son

similares a los reportados por Lefevre *et al.* (1992), aunque a la matriz inicial, y después del tratamiento con lodos activados, se le agregó la etapa de clarificación.

En lo referente a QG y de acuerdo con la USEPA (desde 1999), para obtener 0.5 log de inactivación de QG debe ser aplicada una dosis de 50.5 mg/L de Cl₂ durante 20 min en un efluente biológico de lodos activados; sin embargo, cuando se aplicaron 5 mg/L de Cl₂, durante 30 min de contacto se logró 0.6 log de inactivación. Es importante mencionar que a pesar de la resistencia observada para los quistes de *Giardia*, una dosis de 50 mg/L es extremadamente alta para lograr sólo una inactivación de 0.5 log y en el particular para un efluente biológico, cuyas características son las más adecuadas para lograr una mayor eficiencia sobre diversos tipos de organismos (Jiménez, 2001; Metcalf y Eddy, 2003; Romero, 2004). Aspecto que confirma lo reportado por Liberti *et al.* (2000) que después de suministrar una dosis de 10 mg/L de APA con 30 min de tiempo de contacto, obtienen una inactivación de 0.6 log, resultados similares a los obtenidos en el presente estudio.

El análisis del modelo cinético de Selleck (Tabla 28) muestra que los BF fueron menos resistentes al efecto desinfectante con respecto a los CF y QG. Esto se debe posiblemente a que la cantidad inicial de BF es menor comparada con la de CF, aunque en las matrices anteriores se observa la misma diferencia; también la poca concentración de SST pudo permitir que las moléculas del desinfectante chocaran directamente con los organismos, primero ocasionando la disminución de CF, posteriormente el ciclo biológico de los BF se vio afectado. Principalmente bloqueando el proceso liberación de fagos debido a que en el entorno existían un espectro muy limitado de bacterias huéspedes susceptibles de ser infectadas y de lisarse rápidamente por el efecto desinfectante (Wok, 2001; Van Twes y Kropinski, 2009).

Además, se ha comprobado que los fagos para tener una infectividad óptima en la bacteria y por siguiente el desarrollo del ciclo lítico, han revelado la dependencia

de cationes divalentes (principalmente Ca^{+2} y en algunos casos Mg^{+2}). Debido al efecto desinfectante, las proteínas de membrana de CF se desestabilizan y se incrementa el daño celular por lo que la concentración de los cationes divalentes es afectada. Siendo que los fagos requieren de estos iones en un intervalo de concentración de 1 a 10 mM para el acoplamiento y el crecimiento intracelular (Van Twes y Kropinski, 2009).

Tomando en cuenta la descripción de la Figura 8, la información del análisis del modelo cinético de Selleck (Tabla 27) y el análisis estadístico de inferencia, se establece que la eficiencia de la desinfección en la Matriz EB, de menor a mayor, es de la siguiente forma: $\text{Cl}_2 < \text{APA} < \text{APF}$ y con respecto a la resistencia de los organismos es: $\text{CF} < \text{BF} < \text{QG}$.

Las dosis de los desinfectantes que se indican en Tabla 27, generan una calidad de agua que podría ser reutilizada para riego agrícola no restringido y para servicios al público con contacto directo. Debido a que cumplen las especificaciones en cuanto al contenido de bacterias (Figura 8) y parásitos (Figura 9) que establece la NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997.

7.2 SEGUNDA ETAPA EXPERIMENTAL

7.2.1 Caracterización de matrices

En la Tabla 30 se muestra la disminución en la concentración de los organismos, pero ninguna de las matrices cumplen con lo establecido para CF de la NOM-001-SEMARNAT-1996 y la NOM-003-SEMARNAT-1997, aunque la cantidad de HH cumple con lo establecido, no es posible el reúso del agua en la agricultura o para servicios al público. La concentración de turbiedad, SST y COD en las matrices (Tabla 31), son características que tienden a beneficiar el proceso de desinfección (Metcalf y Eddy, 2003).

7.2.2 Efecto del tiempo de contacto

De acuerdo con la eficiencia de los desinfectantes de la etapa anterior, el APF es el más eficaz en las tres matrices, razón por la cual se aplicaron diferentes tiempos de contacto a una o dosis de cada desinfectante. Se pudieron optimizar las condiciones de operación (mínima dosis y tiempo de contacto) en la matriz EF y EB para alcanzar 3 log de CF y obtener el tiempo de contacto efectivo de inactivación de los organismos. Para inactivar totalmente los cuatro organismos en la matriz AR (Tabla 34) sería necesario utilizar un tiempo de contacto de 453 y 200 min, con una dosis de 5 y 10 mg/L, respectivamente.

De acuerdo con Bydzovská y Měrka (1981), las condiciones de operación empleadas en la matriz AR son desfavorables para la inactivación de BF debido a que logró inactivar 7 log de una concentración inicial de 8 log después de aplicar 0.25 mg/L de APF durante 5 min; para el caso del presente estudio y aplicando 5 y 10 mg/L de APF con el mismo tiempo de contacto se logró inactivar 0.9 y 2 log, respectivamente, de una concentración inicial de 5.7 log de BF. No obstante, utilizando las dosis antes mencionadas con 120 min de exposición sólo se consiguió inactivar 2.3 y 3.5 log, respectivamente.

Respecto a la desinfección en la matriz EF, los valores que reportaron Gerh *et al.* (2009) muestra mejores condiciones de operación para la inactivación de CF con respecto a las del presente ensayo, porque de 6 log de CF se lograron inactivar 3.5 log empleando 4 mg/L de APF durante 5 min, posteriormente al aumentar el tiempo de contacto a 10, 20 y 30 min utilizando la misma dosis lograron la inactivación total de CF. Mientras tanto, las pruebas de este estudio consiguieron 2.5, 3, 4.6 y 5.5 log de inactivación, en orden a cada tiempo de exposición antes mencionado, empleando 5 mg/L de APF; la inactivación total de 6.2 log se consiguió en un tiempo de 120 min de contacto. No obstante, para la inactivación de coliformes fecales, registró mejores condiciones de operación. Cabe mencionar que al igual que en el presente estudio las pruebas de desinfección se realizaron

en un Sistema Batch y posterior al TPA (cloruro férrico y polielectrolito aniónico) del agua residual.

Los niveles de inactivación de cada organismo (Figura 10), junto con el análisis del modelo cinético de Selleck (Tabla 33) y el efecto significativo de la interacción que tiene cada matriz con cada organismo se especifica que la eficiencia del APF, de menor a mayor, es de la siguiente forma: AR_10 < AR_5 < EF_5 < EB_5 y con respecto a la resistencia de los organismos es: CF < BF < QG. Los HH presentan un alto grado de resistencia al APF (Figura 5), aunque se logra eliminar 1 HH en la matriz EF con 5 mg/L y 120 min de contacto.

La resistencia que presentan los BF sobre los CF se debe a que la conformación y organización proteica de sus cápsidas les confiere la habilidad de permanecer viables por largos períodos de tiempo en el ambiente en condiciones adversas, como la exposición a ADN-asas, variaciones de pH y temperatura (Allowood, 2005).

Los tiempos de contacto indicados en la Tabla 32 generan una calidad de agua que en cuanto al contenido microbiológico (Figura 11) podría ser reutilizada para:

- 1) riego agrícola restringido de acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-1996 y para servicios al público con contacto indirecto conforme la NOM-003-SEMARNAT-1997 para el caso de la matriz AR.
- 2) riego agrícola no restringido y para servicios al público con contacto directo para la matriz EF y EB.

7.3 TERCERA ETAPA EXPERIMENTAL

7.3.1 Caracterización de matrices

La caracterización biológica y fisicoquímica (Tabla 35) mostró nuevamente menores concentraciones para el caso de EB, seguida por EF y AR. Por lo tanto, se puede considerar que no existió variabilidad en cuanto a los parámetros determinados para las tres matrices durante las tres etapas del estudio.

7.3.2 Desinfección en Matriz AR

En la Figura 12 las pruebas con luz solar se observa que el efecto desinfectante no es durable a través del tiempo mientras que las condiciones sin luz solar mantiene el efecto desinfectante deseado El recrecimiento de coliformes está determinado por la concentración de sustrato biodisponible, la temperatura del agua, la presencia de sedimentos y la concentración del desinfectante residual (Van der Kooij, 2003).

7.3.3 Desinfección en Matriz EF

En la Figura 13 se muestra que la reactivación de CF en la matriz AR y EF ante el efecto residual de las diferentes concentraciones del desinfectante no fueron eficaces debido: 1) a la cantidad de sólidos que presenta cada matriz (66 y 20 mg/L SST, respectivamente) y 2) a la concentración de carbono orgánico (382 y 185 mg/L COD, respectivamente), considerado como el principal aporte de energía para los microorganismos. Ambos factores favorecen la supervivencia de los coliformes fecales (Van der Kooij, 2003).

7.3.4 Desinfección en Matriz EB

De manera general las pruebas con presencia de luz solar favorecieron el aumento de la concentración de coliformes, por el mecanismo de reparación denominado fotoreactivación, en el cuál se repara el ADN dañado de la bacteria. Este proceso es muy común y ocurre en presencia de luz solar a una longitud de onda de 330-480 nm (Liltved y landfald, 2000). Otro mecanismo que permite la reactivación (inclusive con y sin luz solar) es la transferencia horizontal de genes

de la bacteria, es decir, tiene la capacidad de adquirir o perder ADN de su genoma y por lo general contribuye a la evolución y adaptación de *Escherichia coli* a diferentes nichos (Ahmed *et al.*, 2008).

La desinfección con cloro (Figura 14) en las condiciones con luz solar fue favorecida primero, por la fotoreactivación y segundo porque el cloro residual disminuye rápidamente. Por lo general, después de un tiempo de residencia de 10 h, la concentración se redujo por debajo de 0.1 mg/L (Van der Kooij, 2003). En el caso de las pruebas en la oscuridad o en ausencia de luz se muestra la reactivación de coliformes, aspecto que se puede explicar debido a su capacidad de multiplicación a bajas concentraciones de sustrato (Van der Kooij, 2003).

En la Figura 15 las pruebas de reactivación en oscuridad muestran que con dosis de 2 y 3 mg/L de APA, a los diferentes tiempos de contacto, se mantuvo la desinfección inicial durante el período de las 24 hasta por 72 h.

El efecto del APF (Figura 16) propició un ambiente oxidante, así que la proliferación de los coliformes fecales fue difícil de llevarse a cabo, ya que se trata de una bacteria fermentativa cuyo crecimiento se ve favorecido en medios reductores (Osoro *et al.*, 2010).

7.4 Análisis de resultados complementarios.

Cordova en el 2012 reporta el comportamiento de algunos parámetros químicos y de los subproductos de la desinfección. La tesis de Cordova y el desarrollo de este estudio son parte del mismo proyecto. La importancia de tomar en cuenta estos resultados son las similitudes en cuanto a las etapas experimentales, matrices de estudio, desinfectantes, dosis y tiempos de contacto. A continuación, se detallan los aspectos que permiten fundamentar mejor la eficiencia del APF sobre la del APA y el Cl₂.

a) Describe la diferencia que ha alcanzado el potencial redox después de cada proceso de desinfección durante la primera etapa experimental (Figura 17). En los ensayos realizados con APF (30 a 120 mV), se alcanzaron valores más altos que aquellos realizados con APA (0 a 5 mV) y Cl₂ (-10 a -50 mV). Lo que significa que la calidad alcanzada con APF en cada efluente (en cuanto a la inactivación de los organismos y la oxidación de la materia orgánica), indican un bajo nivel de contaminación y una buena calidad del agua en comparación con APA y Cl₂.

b) Informa que de una concentración inicial de 339 mg/L de DQO el APF y el APA aumentan de manera significativa la DQO, registrando valores de 340 hasta 440 mg/L, mientras que el cloro obtiene valores de 250 a 330 mg/L. La diferencia antes mencionada se debe a que los perácidos (APF y el APA) son inestables y tienden a degradarse hasta CO₂, O₂ y -OH, para lo cual es necesaria la presencia de oxígeno.

c) El COD también se ve afectado, aunque en menor grado, de nuevo los perácidos registran un aumento (90 a 190 mg/L), debido a que el ácido perfórmico y el ácido peracético tienen uno y dos átomos de carbono, respectivamente.

d) Indica la concentración de cloro residual presente en las matrices desinfectadas (Figura 18), solo en la matriz AR se presentan valores de 1.5 y 3 mg/L de cloro libre, con dosis de 100 y 150 mg/L de Cl₂, respectivamente; los cuales sobrepasan la concentración de cloro libre residual establecida por la EPA (2004).

e) Explica que los subproductos de la desinfección con perácidos: peróxido de hidrógeno, perácidos orgánicos y oxígeno activo (Figura 19) aumentan en función de la dosis de APF y APA empleada (primera etapa experimental) o disminuyen a medida que transcurre el tiempo de contacto (segunda etapa experimental).

f) Señala que el APA presenta concentraciones mayores de los residuales en comparación con el APF (Figura 20):

- Esto se debe a que la reacción del APF con la materia orgánica y organismos resulta ser más rápida ya que este compuesto tiende a reducir considerablemente su concentración y finalmente se descompone hasta CO_2 , O_2 y $-\text{OH}$, los cuales en ningún momento llegan a valores permanentes y por ende no provocan daños potenciales a la salud humana o al ambiente (Gehr *et al.*, 2009)
- La degradación del APF se lleva a cabo en menor tiempo mientras que la del APA será gradual, es decir, el tiempo de vida media del APF es menor que el que presenta el APA. La poca estabilidad del APF es causada por el efecto inductivo de la presencia de un carbono más en la estructura molecular del APA con respecto al APF.

7.5 Posibles cambios morfológicos en los organismos.

Se entiende que el efecto desinfectante esta provocado por la formación de moléculas oxidantes, tales como los radicales hidroxilos, el ión superóxido ($\text{O}_2^{\cdot-}$) y el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), para el caso de la desinfección con APF y APA. Mientras que en la desinfección con Cl_2 produce el ácido hipocloroso (HOCl) y el ión hipoclorito (OCl^-). A continuación se describe como las compuestos oxidantes afectan la estructura de resistencia de cada organismo.

Bacteriofagos

En la cápside de los bacteriófagos, los compuestos oxidantes, rompen la unión electrostática de uno o varios tipos de subunidades proteicas idénticas que se encuentran organizadas de manera simétrica (capsomeros) (Guttman *et al.*, 2005), además de desnaturalizar las proteínas andamio que se encargan del ensamblaje correcto del ADN dentro de la cápside y de las proteínas de expulsión que actúan

en el momento de la infección de un nuevo hospedero. (Wok, 2001; Allowood, 2005; Van Twes y Kropinski, 2009).

El efecto desinfectante puede inducir la oxidación de las bases nitrogenadas del DNA, lo que provoca en primera instancia la formación de bases oxidadas (8-OH-guanosina y 8- hidroxil 2' deoxiguanina) y luego la fragmentación de la doble hélice de ADN. Por lo tanto se destruye la información necesaria para el desarrollo viral (como el interruptor de la decisión lisis-lisogenia y la capacidad de integración como profago, la replicación, la morfogénesis de las partículas de la progenie y la lisis de la célula hospedadora).

Debido a que estos colifagos somáticos inician la infección uniéndose a receptores concretos ubicados permanentemente en la pared celular de la bacteria (Young, 2005), la etapa de absorción del fago puede ser interferida por la pérdida o modificación del receptor provocado por el efecto oxidante de los desinfectantes (Van Twes y Kropinski, 2009).

Coliformes fecales

Las bacterias gram (-) están compuestas principalmente de peptidoglucano (10 al 20%), lipoproteínas, lipopolisacáridos, proteínas (60%) y lípidos (20%). El cambio estructural de esta composición ante el efecto desinfectante podría ser de la siguiente manera: inicialmente se frena por los mecanismos de defensa bacterianos al ataque oxidativo en los componentes de la pared celular (WHO, 2004).

Estas estructuras desempeñan el papel principal en el control de la cinética bactericida debido a que la degradación del peptidoglucano, lipopolisacáridos y fosfatidiletanolcolina toma el mayor tiempo en el proceso de desinfección (Solsono y Mendez, 2003; Sanchez y Saenz, 2005). Después de este tiempo de exposición,

la bacteria se inactivada a tasas mayores debido a que los radicales libres superan los mecanismos de defensa celular (Kitis, 2004; Heinonen y Miettinen, 2010).

El ataque a los componentes de la pared celular provoca su ruptura y por consecuencia la pérdida de sus funciones., se oxidan y rompen los enlaces O-glucosídicos entre la N-acetilglucosamina y el ácido N-acetilmurámico del peptidoglicano (Gerardi, 2006), produciendo agujeros discretos en la pared. Además se desnaturaliza la proteína OmpA cuya función está asociada a la integridad estructural y forma de la célula.

Posteriormente, la descomposición de la pared celular permite la entrada de especies reactivas que alcanzan y destruyen el espacio periplásmico que contiene proteínas que participan en la captación de nutrientes (proteasas, lipasas, fosfatasas, β -lactamasas) y enzimas que participan en la síntesis del peptidoglicano. Finalmente, los compuestos oxidantes, penetran hasta la membrana celular y realizan la peroxidación de los fosfolípidos provocando los desórdenes funcionales que conducen a la muerte celular (Gehr, 2002; Antonelli et al., 2006; Gerh et al, 2009).

Quistes de Giardia

La pared quística rígida está integrada por una bicapa interna membranosa y una capa externa filamentosa. La pared filamentosa externa está compuesta de 4 proteínas (37%) y de filamentos de carbohidrato (63%), principalmente del N-acetil galactosamina (Ankarklev *et al.*, 2010) Las moléculas oxidantes podrían actuar inicialmente con la ruptura de los enlaces de los aminoácidos de las 4 proteínas: las tres CWPs (Cyst Wall Proteins) se caracterizan por poseer secuencias repetidas ricas en leucina y la proteína HCNCp (High Cysteine Non-variant Cyst protein) que contiene regiones ricas en cisteína (Karanis et al, 2007; Chaparro, 2010; CDW, 2011).

Degradando la mayoría de las proteínas de la capa externa, provoca el cambio de la estructura del carbohidrato N-acetil galactosamina (Widmer et al., 2002), de esta manera se introducen los oxidantes para desnaturalizar las proteínas del espacio peritrópico y continuar con la peroxidación de la bicapa lipídica de la porción interna membranosa (Chaparro, 2010). Finalmente se pierden las barreras mecánicas del quiste provocando la alteración irreversible del extenso entramado de vesículas, túbulos, ribosomas, estructuras del citoesqueleto y de los núcleos (CDW, 2011).

Otra alternativa, es que las moléculas oxidantes penetran sólo la capa externa del quiste e inducen a que las vesículas periféricas liberen proteasas provocando la degradación de las proteínas y alteraciones morfológicas dentro del quiste (Widmer et al., 2002)

Huevos de helmintos

La composición química del huevo es la siguiente: de 41.4 % de proteínas, 36-29.7 % de lípidos (ascariosides, fosfolípidos y triglicéridos) y 14.3-24.9 % de carbohidratos (glucógeno y trehalosa). El efecto de los perácidos inicia la peroxidación de la membrana lipídica, la cual está compuesta por 25 % de proteínas y 75 % de lípidos (Maya *et al.*, 2008). Posteriormente los agentes oxidantes rompen el complejo quitina-proteína (González *et al.*, 2002), los cuales comienzan a perder su arreglo helicoidal, que permanecía en la membrana intermedia, dando lugar a la pérdida de la capa más resistente del huevo.

De esta manera se bloquea la respiración, la transferencia de materiales, energía y electrones en el interior del huevo (Aguilar, 2006); permitiendo el paso de moléculas oxidantes (producidos por la desinfección), los cuales alteran las funciones enzimáticas y generan la muerte del organismo (WHO, 2004).

8 CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos fue posible evaluar el efecto desinfectante del cloro, ácido peracético y ácido perfórmico mediante la inactivación de bacteriófagos, coliformes fecales y quistes de *Giardia* spp. en las tres calidades de agua residual doméstica; no así, en el caso de los huevos de helmintos en cuyo caso no se logró su inactivación total, debido posiblemente a su elevada resistencia a los diversos procesos de desinfección evaluados.

Se determinaron las dosis y tiempos de contacto necesarias de cada desinfectante en las tres matrices de agua residual doméstica que permitieron cumplir el límite máximo permisible de 3 log para coliformes fecales establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997.

Con respecto a la Primera Etapa Experimental, en la cual se probaron diferentes dosis de desinfectante a un tiempo de exposición constante, se pudo observar que:

- a) Para inactivar totalmente a los bacteriófagos en la matriz AR, ninguna dosis fue efectiva, en la matriz EF las dosis efectivas fueron de 60 mg/L y 12 mg/L de cloro y ácido perfórmico, respectivamente, mientras que para la matriz EB fueron de 30 mg/L de cloro y 6 mg/L tanto para el APA y APF.
- b) Las dosis para inactivar totalmente coliformes fecales en la matriz AR, EF y EB fueron de 150, 60 y 40 mg/L de cloro, respectivamente, y de 30, 12 y 8 mg/L ácido perfórmico, respectivamente. Mientras que en la matriz EB la dosis efectiva requerida fue de 30 mg/L para el APF.
- c) La dosis requerida para la inactivación total de quistes de *Giardia* spp. en la matriz AR no fue determinada, mientras que para la matriz EB las dosis efectivas fueron de 30 mg/L para el APA para ambos efluentes y 10 mg/L para el APF.

En la Segunda Etapa Experimental, en la cual se probaron diferentes tiempos de contacto a una dosis de ácido per fórmico constante se observó que:

- a) El proceso de desinfección fue eficiente con una dosis de 5 mg/L, tanto para la matriz EF y EB. A tiempos de 30, 60 y 120 min de contacto CF, BF y QG, respectivamente, fueron inactivados en su totalidad; caso contrario a la de la matriz AR, donde ningún de los organismo estudiados se inactivo completamente, aún aplicando tiempos de contacto de 240 min.
- b) El ácido el ácido per fórmico es una alternativa viable a la desinfección tradicional de las aguas residuales tratadas, comparada con cloro y APA, y debido al alto poder oxidante y de amplio espectro biocida observado en las tres matrices, permitiendo dosis y tiempos de contacto menores con una tasa de inactivación mayor para los organismos evaluados.

La eficiencia de cada desinfectante y la resistencia de cada uno de los organismos comparados fueron estimadas con el modelo cinético de Selleck, a través del cual se estableció la dosis de cada desinfectante, tiempo de contacto e inactivación de cada organismo. Con la obtención de los valores de las constantes de dicho modelo (n y b) y el análisis estadístico (descriptivo e inferencial), la resistencia en las tres matrices fue de menor a mayor de la siguiente forma: coliformes fecales, bacteriófagos, quistes de *Giardia* spp. y huevos de helmintos.

Finalmente, en la Tercera Etapa Experimental se evidenció el efecto residual del APF sobre CF, en pruebas con y sin luz solar y hasta por 72 h, mejores condiciones comparas con el efecto residual de cloro y el ácido peracético en los que dicho efecto se observó exclusivamente en pruebas sin luz solar y hasta por 72 h.

9 RECOMENDACIONES

Para mejorar la calidad del agua para reuso agrícola y con el fin de minimizar las condiciones de operación (dosis y tiempo de contacto) del proceso de desinfección, en la matriz AR es importante realizar un proceso de tratamiento previo a la etapa de desinfección. En el caso de las matrices EF y EB un proceso de filtración permitirá incrementar la calidad del efluente y con ello una desinfección más eficiente.

La desinfección del ácido per fórmico induce mayores y mejores resultados en su espectro y eficiencia biocida comparada con el cloro y el ácido peracético, pero la implementación de este desinfectante a escala real dentro de las PTAR implicaría un gasto inicial alto. Debido a que la composición química del APF es inestable es necesario instalar dos dosificadores en el área de desinfección dentro de la PTAR, uno con ácido fórmico y el otro con peróxido de hidrogeno.

Se sugiere remover el contenido de huevos de helmintos del agua residual a través de procesos de sedimentación y/o filtración, ya que los procesos de desinfección no son eficientes para su inactivación.

10 LITERATURA CITADA

Ankarklev J, Jerlström-Hultqvist J, Ringqvist E, Troell K, Svärd SG. Review. 2010. Behind the smile: cell biology and disease mechanisms of Giardia species. *Nature Reviews Microbiology*. **8** : 413 – 422.

Allowood, P. B., Mlik, Y. S., Maherchandani, S., Hedberg, C. W. and Goyal, S. M. (2005). Effect of temperature on the survival of F-specific RNA coliphage, feline calicivirus and *Echerichia coli* in chlorinated water. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **2** (3-4): 442-446.

Aguilar, O.P.A. 2006. **La plata como desinfectante de lodos provenientes del tratamiento de aguas residual domésticas mediante un proceso de coagulación-floculación**. Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. Instituto de Ingeniería, UNAM. 118 pp

Andrew, D. S. (2007). **Comparison of toxigenomic effects of sodium hypochlorite, hydrogen peroxide and peracetic acid on *Pseudomonas auriginosa***. Thesis for the degree of Doctor of Philosophy. Dissertation submitted to the Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, College Park in partial fulfillment. 90 pp.

Antonelli, M., Rossi, S., Mezzanotte, V., & Nurizzo, C. (2006). Secondary effluent disinfection: PAA long term efficiency. *Environmental Science and Technology*, **40** (15): 4771-4775.

Arraj, A., Bohatier J., Laveran, H. and Traore O. (2005). Comparison of bacteriophage and enteric virus removal in pilot scale activated sludge plants. *Journal of Applied Microbiology*, **98**(2):516 – 524.

Augusto, S. D. (2011). Tesis doctoral. La desinfección basada en bacteriófagos como herramienta de biocontrol de *Salmonella* en alimentos. Departamento de Genética y de Microbiología de la Universidad Autónoma de Barcelona, España. 157 pp.

Baldry M.G.C., Cavadore A., French M.S., Massa G., Rodriguez L.M., Schirch P.F.T., Threadgold T.L. (1995). Effluent disinfection in warm climates with peracetic acid. *Water Science and Technology*, **31** (6): 161-164.

Baldry, M. G. C. and French M.S. (1989) Activity of peracetic acid against sewage indicator organisms. *Water Science and Technology*, **21**:1747 – 1749.

Blatchley, III, E. R., Hunt B. A., Duggirala, R., Thompson, J.E., Zhao, J., Halaby, T., Cowger, R. L. Straub C. M. y Alleman J. E. (1997). Effects of disinfectants on wastewater effluent toxicity. *Water Research*, **31** (7): 1581-1588.

Block, SS ed. (2001). **Disinfection, Sterilization, and Preservation**. 5th ed. Lippincott, Williams y Wilkis, Philadelphia. ISBN: 0683307401. 1439 pp.

Burns, E. (2009). **Repensar la Cuenca: La Gestión de Ciclos del Agua en el Valle de México**. Centro de la Sustentabilidad Incalli Ixcahuicopa. UAM. 37-49 pp.

Bydzovská, O and Měrka, V. (1981). Disinfecting properties of performic acid against bacteriophage phi X 174 as a model of small envelope-- free viruses. *Journal Hygiene Epidemiology Microbiology and Immunology*. **25**(4):414-423.

Caretti, C. and Lubello C. (2003). Wastewater disinfection with PAA and UV combined treatment: a pilot plant study. *Water Research*; **37**(10): 2365 – 2371.

Christman, K. (1998). Chlorine. Chlorine Chemistry Council. CEPIS., OPS. Regional symposium on water quality: effective disinfection Lima. 1 – 22 pp.

Chaparro, G. J. J. 2010. **Estudios de los patrones de ubiquitinación y la actividad de proteólisis específica en Giardia**. Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias Químicas. Facultad de ciencias. Universidad de Colombia, Bogota. 166 pp

CNA. Comisión Nacional del Agua. (2010). **Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento**. Edición 2010. Editor: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 80 pp.

CNA. Comisión Nacional del Agua. (2011). **Estadísticas del agua de México edición 2011**. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F. 133 pp.

Committee on Drinking Water. (2011). **Enteric Protozoa: Giardia and Cryptosporidium**. The Federal-Provincial Territorial Committee on Drinking Water. Canada. 89 pp.

CGER. Commission on Geosciences, Environment, and Resources. (1996). **Use of Reclaimed Water and Sludge in Food Crop Production**. Committee on the Use of Treated Municipal Wastewater Effluents and Sludge in the Production of Crops for Human Consumption. Water Science and Technology Board. National Research Council. National Academy Press, Washington, D.C., USA. 178 pp.

Cotler, H. (2010). **Las cuencas hidrográficas de México: Diagnóstico y Priorización**: Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT - Fundación Gonzalo Río Arronte I.A.P., México: <http://cuencas.ine.gob.mx/cuenca/diagnostico.html>

Cordova Cervantes, Maria Jose. 2012. **Ácido perfoómico como desinfectante para el tratamiento de agua con distinta calidad microbiológica:**

comparación con cloro y ácido peracético. Tesis que para obtener el grado de Ingeniería Química. Facultad de Química, UNAM. 123 pp.

De Luca, G., Sacchetti, R., Zanetti F. and Leoni, F. (2008). Comparative study on the efficiency of peracetic acid and chlorine dioxide at low doses in the disinfection of urban wastewater. *Annals Agricultural and Environmental Medicine*, (15): 217–224.

De Souza, J. B. and Daniel, L. A. (2005). Comparison between sodium hypochlorite and peracetic acid for *E. coli*, coliphages and *C. perfringens* inactivation of high organic matter concentration water. *Engineering and Sanitization Ambient* **10**(2).

Dell' E. A., Falsanisi D., Liberti L., Notarnicola, M. and Santoro, D. (2007) Disinfection by-products formation during wastewater disinfection with peracetic acid. *Desalination*, (215): 177–186.

Devaux, I., Gerbaud L., Planchon, C., Bontoux J. and Glanddier, P.Y. (2001) Infectious risk associated with wastewater reuse: an epidemiological approach applied to the case of Clermont-Ferrand, France. *Water Science and Technology*, **43**(12): 53–60.

Díaz, D.C., Fall C., Quentin E., Jiménez, M.Ma del C..C., Esteller, A.Ma.V., Garrido, H.S.E., López, V.C.M. y García, P.D. (2003). **Agua potable para comunidades rurales, reúso y tratamientos avanzados de aguas residuales doméstica.** Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del agua. Ed. CIRA-RIPDA CYTED. México. 224-229 pp.

Norma Oficial Mexicana, NOM-001- SEMARNAT-1996, **Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas y bienes nacionales.** Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales publicada en el Diario Oficial de la Federación. DOF. México, 1997.

Norma Oficial Mexicana, NOM-002-SEMARNAT-1996. **Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.** Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, publicada en el Diario Oficial de la Federación. DOF. México, 1997.

Norma Oficial Mexicana, NOM-003- SEMARNAT-1997, **Que establece los límites máximos permisibles de contaminación para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.** Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, publicada en el Diario Oficial de la Federación. DOF. México, 1997.

Eivers, B., Hawkins S. and Schulz G. (1991) **Ullmann's Encyclopaedia of Industrial Chemistry**, 5th ed., vol. A.19. (eds.), Weinheim: Wiley-VCH Publishers, Inc.

Farthing, M.J.G. 1989. **Giardiasis as a disease**. In: *Giardia from Molecules to Disease* ed. Thompson, R.C.A., J.A. Reynoldson and A.J. Lymbery, CAB International, , Cambridge, U.K., 15-37 pp.

Gaviria A. G., González de S. M. y Castaño O. J. 2012. Técnica para aislamiento de bacteriófagos específicos para *E.coli* DH5 α a partir de aguas residuales. Rev. Medicina Veterinaria y Zootecnia Cordoba. **17** (1).

Gehr, R., Cochrane D. and French M. (2002). **Peracetic acid as a disinfectant for municipal wastewaters: encouraging performance results from physicochemical as well as biological effluents**. Proc of the US Water Environment Federation Disinfection Conference. 30 pp.

Gehr, R. Chen, D. and Moreau, M. (2009). *Performic acid (PFA): tests on an advanced primary effluent show promising disinfection performance*. Water Science & Technology, **59**(1): 89 – 96.

Gerardi, M. (2006). **Wastewater bacteria**. Waster Microbiology Series. Wiley-Interscience. ISBN-13; 978-471-20691-0. New York. USA. 251 pp.

Widmer, G., Clancy, T., Ward, H. D.M., Miller, D., Batzer, G. M., Pearson, C. B. and Bukhari, Z. (2002). Structure and biochemical alterations in *Giardia Lamblia* cyts exposed to ozone. Journal of Parasitology. **88** (6): 1100 – 1106.

Gray, N. F. (1996). **Calidad del agua potable**. Problemas y Soluciones. Editorial Acribia. Zaragoza. ISBN 8420008214. España. 365 pp.

Gerba, C. P. (2009). **Enviromental Microbiology**. 2nd Ed. En: Maier R., Pepper, I. y Gerba C. P. Cap 23. Indicator Microorganisms. Editorial Elsevier Academic Press. China. 485-496 pp.

González, G.V.A., Guerrero, S.C.A. y Ortiz M.U. 2002. Estructura química y compatibilidad de poliamidas con quitina y quitosán. *CIENCIA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN* **5**(1).

Grabow, W. O. K., Taylor, M. B. and De Villiers, J. C. (2001). New methods for the detection of viruses call for review of drinking water quality guidelines. *Water Science and Technology*, **43**(12):1-8.

Guttman, B., Raya, R., Kutter, E. 2005. Basic fage biology, 29 – 66 pp. In Kutter, E. and Sulakvelidze, A. (editors). Bacteriophages: Biology and applications. CRC Press, Florida, EE. UU.

Helmi, K., Skrabber S., Gantzer, C., Willame R., Hoffmann L. and Cauchie, H. M. (2008). Interactions of *Cryptosporidium parvum*, *Giardia lamblia*, vaccinal poliovirus type 1 and bacteriophages phi X174 and MS2 with a drinking water

biofilm and a wastewater biofilm. *Applied Environmental Microbiology*, **74**(7): 2079-2088.

Heinonen, H. T. and Miettinen H. (2010). Performic acid as a potential disinfectant at low temperature. *Journal of Food Process Engineering*, **33**: 1159–1172.

Minister Health. (2010). **Canadian Guidelines for Domestic Reclaimed Water for Use in Toilet and Urinal Flushing**. Health Canada. Ontario, Canada. ISBN: 978-1-100-15665-1. 41 pp.

Jardines, O. J. (2000). **Estudio de la desinfección con cloro del efluente proveniente de un proceso de tratamiento primario avanzado con diversas tecnologías, y que será destinado para reúso agrícola**. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. UNAM. Pp. 131

Jiménez, B. (2001) “**La Contaminación Ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada**”, Limusa, Colegio de Ingenieros Ambientales de México, A. C., Instituto de Ingeniería de la UNAM y FEMISCA, México, 414 pp.

Karanis, P., Kourenti, C. and Smith, H. (2007). Waterborne transmission of protozoan parasites: a worldwide review of outbreaks and lessons learnt. *Journal Water Health*, **5**(1):1–38.

Kemira, 2010. Pagina web: kemira.com.mx

Kitis, M. (2004). Disinfection of wastewater with peracetic acid: a review. *Environmental International*, **30**:47 - 55.

Kondratjeff, S. (2007). **Inactivation of indicator microbes with performic acid in wastewater effluent**. MSc thesis work, pp. 1–70. Department of Environmental Science, University of Kuopio. País??150 pp.

Koivunen, H. and Heinonen, T. (2005). Peracetic acid (PAA) Disinfection of Primary, Secondary and Tertiary Treated Municipal Wastewater. *Water Research*, **39**, 4445-4453

Lazarova, V., Janex, M. L., Fiksdal, L., Oberg, C., Barcina, I. and Pommepuy, M. (1998). Advanced wastewater disinfection technologies: short and long term efficiency. *Water Science and Technology*, **38**: 109-117.

Lefevre, F., Audic, J. M. and Ferrand, F. (1992). Peracetic acid disinfection of secondary effluents discharged off coastal seawater. *Water Science and Technology*, **25**: 155 – 164.

Leal, J.L. (1909). The sterilization plant of the Jersey City Water Supply. Company at Boonton, N.J.” *Proceedings American Water Works Association*, 100-109 pp.

Liberti, L. and Notarnicola M. (1999). Advanced treatment and disinfection for municipal wastewater reuse in agriculture. *Water Science and Technology*, **40**: 235 - 245.

Liberti, L., Lopez A., Notarnicola M., Barnea N., Pedahzur R. and Fatal B. (2000). Comparison of advanced disinfection methods for municipal wastewater reuse in agriculture. *Water Science and Technology*, **42** (1-2): 215- 220.

Maya, C., Lucario, S., Gálvan, M., Gayosso, T. y Naranjo, R. 2008. **Study on the inactivation mechanism of helminth eggs from different genera of medical importance**. Memorias en extenso en el XXXI Congreso interamericano AIDIS. Santiago –Chile. Centro de Eventos Casa Piedra.

Metcalf y Eddy. (2003). **Wastewater Engineering. Treatment and Reuse**. 4th Edition, McGraw-Hill, New York Wastewater Engineering. Treatment and Reuse. 4th Ed. Mc Graw Hill.

Monarca, S., Richardson S. D., Feretti D., Grotto M., Thruston A. D. Zani C. (2002) Mutagenicity and disinfection by-products in surface drinking water disinfected with peracetic acid. *Environmental Toxicology and Chemistry*, **21**: 309 - 318.

Mondaca. M. A., Campos. A. V. y Sepúlveda, Z. R. (2003). **Capítulo 13, Riesgo de enfermedades transmitidas por el agua en zonas rurales**. En: Díaz, D. C., Fall, C., Quentin, E., Jiménez M. Ma. del C., Esteller, A. Ma. V., Garrido, H. S. E., López V. C. M. Agua potable para comunidades rurales, reúso y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas. Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del agua. 155 - 167 pp.

Morris, R. (1993). Reduction of microbial levels in sewage effluents using chlorine and peracetic acid disinfectans. *Water Science and Technology*, **27**: 387 – 393

Murillo, R. (2004). **Aplicación de lodos estabilizados con ácido peracético en suelos salino-sódicos**. Tesis para obtener el grado de Maestra en Ingeniería Ambiental. UNAM. 95 pp.

Orta, L. M., Rojas, V. N. and Vaca, M. M. (2002). Destruction of Helminth Eggs (*Ascaris suum*) by Ozone: Second Stage, *Water Science and Technology*. In: *Water Supply*, **2**(3): 227-233.

Patnaik, P. (2007). **A comprehensive guide to the hazardous properties of chemical substances**. 3rd Edition. John Wiley and Sons, Inc, All. ISBN 0471714585. 128 pp.

Peterka, G. A. (1998). Solution That's Easy to Swallow: Vitamin C-A Promising Dechlorination Reagent. *Opflow*, 24,12 (1):4-5

Peterka G. A. (2002), The Endangered Species Act and Chlorinated Water Discharges (Retrieved: April 5, 2012), from: http://www.swwrc.wsu.edu/conference/Papers/Greg_Peterka.pdf

Preuss A., Fuchs, R., Huss, M. and Schneider, R. (2001). **Peracetic acid and performic acid mixtures formed by peroxidation of corresponding acid.** Patent 6, 211, 237.

Romero, J. (2004). **Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño.** 3° Ed. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, Colombia. 1232 pp.

Reynolds, A. K. (2002a). **De la llave: Tratamiento de Aguas residuales en Latinoamérica. Identificación del problema.** *Agua Latinoamericana* 2(5): 19 – 25.

Reynolds, K. A. (2002b). **Desinfección con cloro y riesgos de los productos derivados de la desinfección.** *Agua Latinoamericana*, 2 (4): 18 – 26.

Rodríguez J. M; Rodríguez G., Seodes, J. y Sadiq R. (2007). **Subproductos de la desinfección del agua potable: formación, aspectos sanitarios y reglamentación.** *Interciencia*, 32 (11): 749-756.

Rojas, V. M. N (2004). **Tratamiento avanzado de desinfección con ozono para eliminar *Vibrio Cholerae*, *Salmonella typhi*, Amebas y huevos de helmintos en aguas residuales tratadas para reúso.** Tesis de Doctorado en Ciencias. División de Ciencias Básicas e Ingeniería. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco. México. 190 pp.

Rutala W. A. and Weber D. J. (2001). **New Disinfection and Sterilization Methods.** *Emerging Infectious Diseases*, 7(2).

Salgot, M., Folch, M., Huertas, E., Tapias, J., Avellaneda, D., Girós, G., Brissaud, F., Vergés, C., Molina, J., Pigem, J. (2002). **Comparison of different advanced disinfection systems for wastewater reclamation.** *Water Science and Technology: Water Supply*, 2 (3): 213-218.

Sánchez-Ruiz C., Martínez-Royano, S. y Tejero-Monzon I. (1995). An evaluation of the efficiency and impact of raw wastewater disinfection with peracetic acid prior to ocean discharge. *Water Science and Technology*, 32: 159 – 166.

Sánchez, S. L. y Sáenz, A. E. (2005). Antisépticos y Desinfectantes. *Dermatology Peru* . 15 (2): 82-103.

Sidhu, J.P.S y Toze S. G. (2008). Human pathogens and their indicators in biosolids: A literature review. *Environment International*, **35**: 187-201.

Sherri, A. T., Scott, R. R. and William, D. W. (1995). Inactivation of bacterial and viral indicators in secondary sewage effluents, using chlorine and ozone. *Water Research*. **29** (11): 2483-2490.

Skraber, S., Gassillound B. and Gantzer C. (2004). Comparison of coliforms and coliphages as tools for assessment of viral contamination in river water. *Applied Environmental Microbiology*, **70** (6): 3644- 3649.

Solsono, F. y Méndez J. P. (2003). **Water disinfection**. Pan American Center for Sanitary Engineering Environmental Sciences. Pan American Health Organization. Regional Office of the World Health Organization. Lima, Peru. 198 pp

Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica. (2010). **Boletín epidemiológico. Sistema único de información**. Dirección General de Epidemiología. Secretaría de Salud. México.

Tay, Z.J., Velasco C.O., Lara, A.R. y Gutiérrez, Q.M. (2002). **Parasitología Médica**. 7ª ed. Editores, S. A. de C. V. México. 208 - 315 pp.

Tree, J. A. 1, Adams, M. R. 2, Lees, D. N. (2005). Disinfection of feline calicivirus (a surrogate for Norovirus) in wastewaters. *Journal of Applied Microbiology*. **98**(1):155-162

USEPA. United States Environmental Protection Agency. (1999). **Alternative Desinfectants and Oxidants Guidance Manual**. EPA 815-R-99-014.

USEPA. United States Environmental Protection Agency. (2004). **Guidelines for water reuse**. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC. Available at: www.epa.gov/ttnrmrl/.

Üstün, G. E., Solmaz, S. K. A; Çiner, F. and Başkaya, H. S. (2011). Tertiary treatment of a secondary effluent by the coupling of coagulation–flocculation–disinfection for irrigation reuse. *Desalination*, **277** (1–3): 207-212.

Van, R.H., Kolak D., Dordain J.J. and Djoghlaif A. (2009). New age, new outcome? The implications of scientific advancement, for 2010 and beyond. *Public Service Review Science and technology*, (05): 198-205.

Van der kooji, D. (2003). Managing regrowth in drinking water distribution systems. In: Heterotrophic plate counts and drinking water safety. *Applied Environmental and Microbiology*. **47**: 551 – 559.

Van Twest, R. and Kropinski, A. M. 2009. Bacteriophage enrichment from water and soil. *Methods in Molecular Biology*, **501**:15-21.

Vaskhov, V.I., Ramkova, N.V., Maslennikov, Y.U.I., Vyshegorodskaya, R.A., Krivonosov, A.I. and Limanov, V.E. (1974). Chemical sterilization of biomedical articles made of thermolabile materials. *Biomedical Engineering*, **8**: 331–333

WC. Water Corporation. (2005). **Code of practice for the reuse of greywater in Western Australia—January 2005**. Water Corporation, Department of Health of Western Australia, Department of Environment of Western Australia. 52 pp.

Warner, S.C. and Slayton, J.L. (1998). *Surrogate and Matrix Spike Recoveries in Chlorinated Samples Using Sodium Thiosulfate, Sodium Arsenite, and L-Ascorbic Acid as Dechlorinating Agents*. Central Regional Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency. EPA-903/9-89-001.

Wagner, M., Brumelis D., Gehr R. (2002). Disinfection of wastewater by hydrogen peroxide/peracetic acid: Development of procedures for measurement of residual disinfectant and application to a physicochemically treated municipal effluent. *Water Environment Research*, **74** (1), 33-50.

World Health Organization (WHO). (2004). **Guidelines for Drinking – water Quality**. Vol. 1. Third Edition. Geneva. ISBN 92 4 154638 7.

White, G. (1999). **Handbook of Chlorination and Alternative Disinfectants**. 5th Edition. Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc. New York.

Wok, G. (2001). Bacteriophages: update on application as models for viruses in water. *Water SA*, **27**(2): 251-268.

Young, R. (2005). Phage lysis. In: Waldor, M. K., Friedman, D. I. and Adhya, S. L. *Phages: their role in bacterial pathogenesis and biotechnology*. AMS Press, Washington. 92 – 127 pp.

11 ANEXO I

Análisis estadístico de la primera etapa de experimentación

Tabla 36 Análisis de varianza factorial (ANOVA) en la matriz AR

Fuente de variación	Df	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F	Variación total (%)	Valor de P
Interacción	30	97.14	3.238	43.31	18.01	< 0.0001
Tipo de organismo	2	92.88	46.44	621.2	17.22	< 0.0001
Desinfectante [Dosis]	15	342.1	22.80	305.0	63.43	< 0.0001
Residual	96	7.177	0.07476			

Tabla 37 Análisis de varianza factorial (ANOVA) en la matriz EF

Fuente de variación	Df	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F	Variación total (%)	Valor de P
Interacción	30	113.0	3.767	15.51	21.91	< 0.0001
Tipo de organismo	2	89.17	44.59	183.6	17.29	< 0.0001
Desinfectante [Dosis]	15	290.2	19.35	79.68	56.28	< 0.0001
Residual	96	23.31	0.2428			

Tabla 38 Análisis de varianza factorial (ANOVA) en la matriz EB

Fuente de variación	Df	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F	Variación total (%)	Valor de P
Interacción	45	81.76	1.817	37.10	28.45	< 0.0001
Tipo de organismo	3	70.26	23.42	478.2	24.45	< 0.0001
Desinfectante [Dosis]	15	106.0	7.070	144.4	36.90	< 0.0001
Residual	112	5.485	0.04897			

Análisis estadístico de la segunda etapa de experimentación

Tabla 39 Análisis de varianza factorial (ANOVA) de la desinfección con APF

Fuente de variación	Df	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	Valor de F	Variación total (%)	Valor de P
Tipo de organismo	2	81.05	40.53	100.5	51.51	< 0.0001
Matriz [Tiempo de contacto]	23	57.77	2.512	6.23	36.71	< 0.0001
Residual	46	18.55	0.4032			

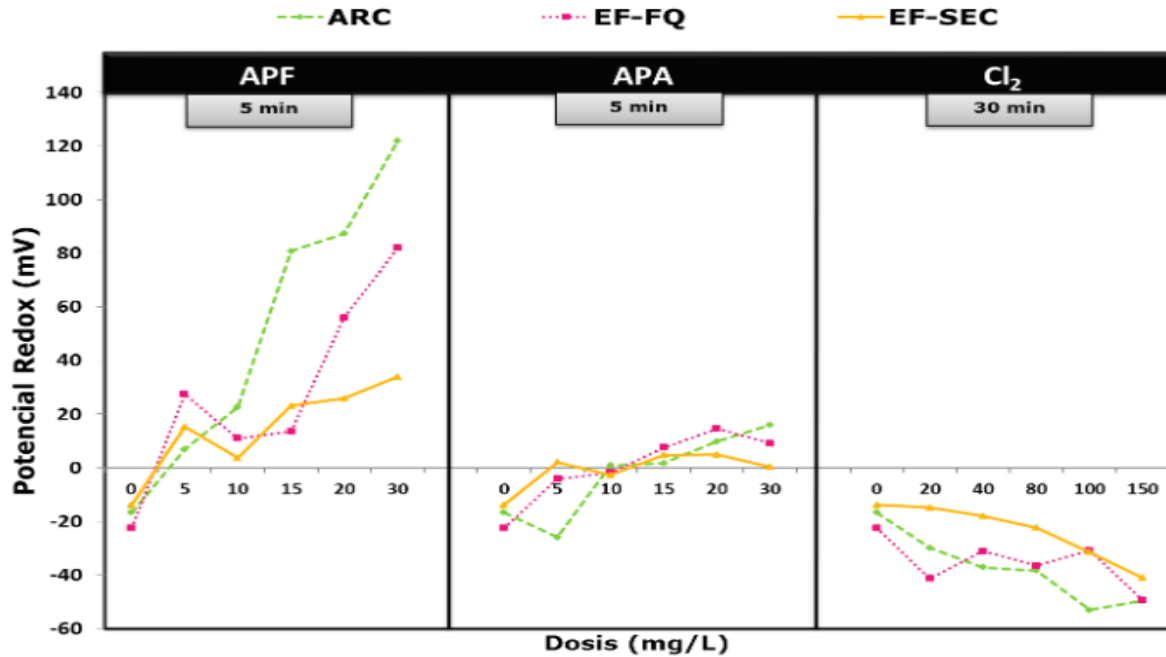


Figura 17 Variación del potencial redox en la primera etapa experimental

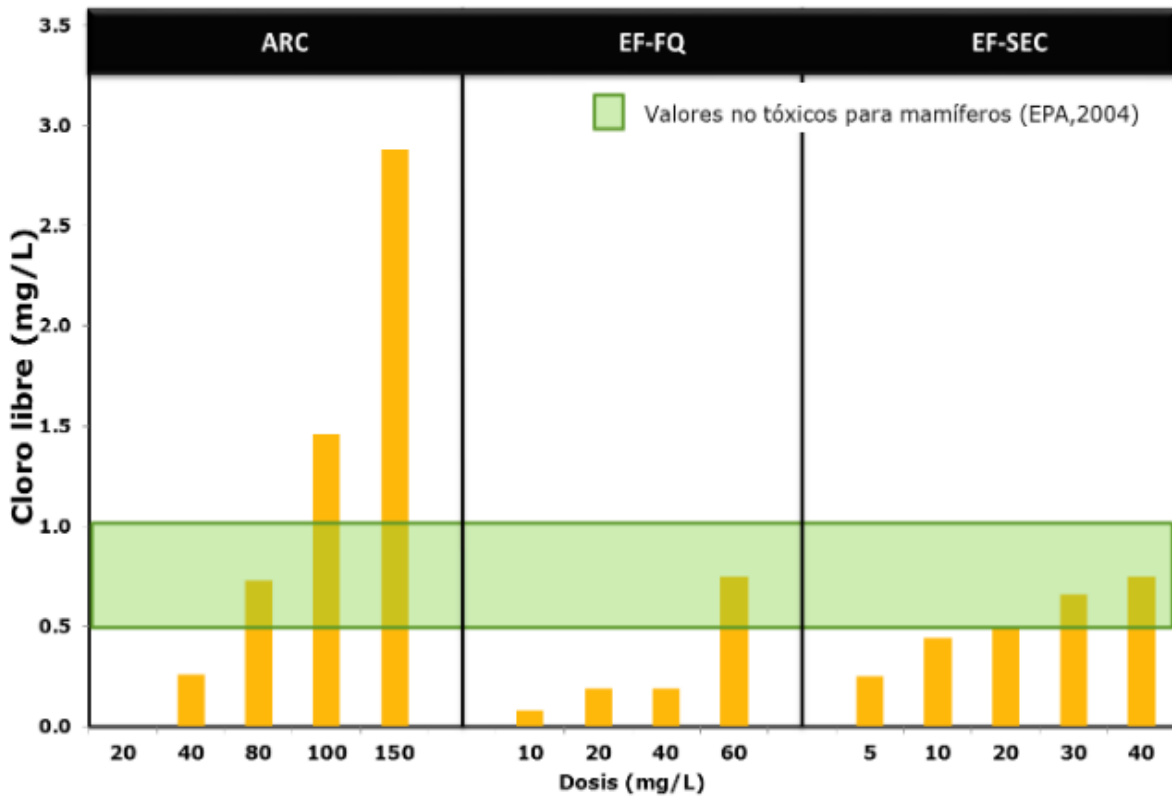


Figura 18 Residuales de cloración en la primera etapa experimental.

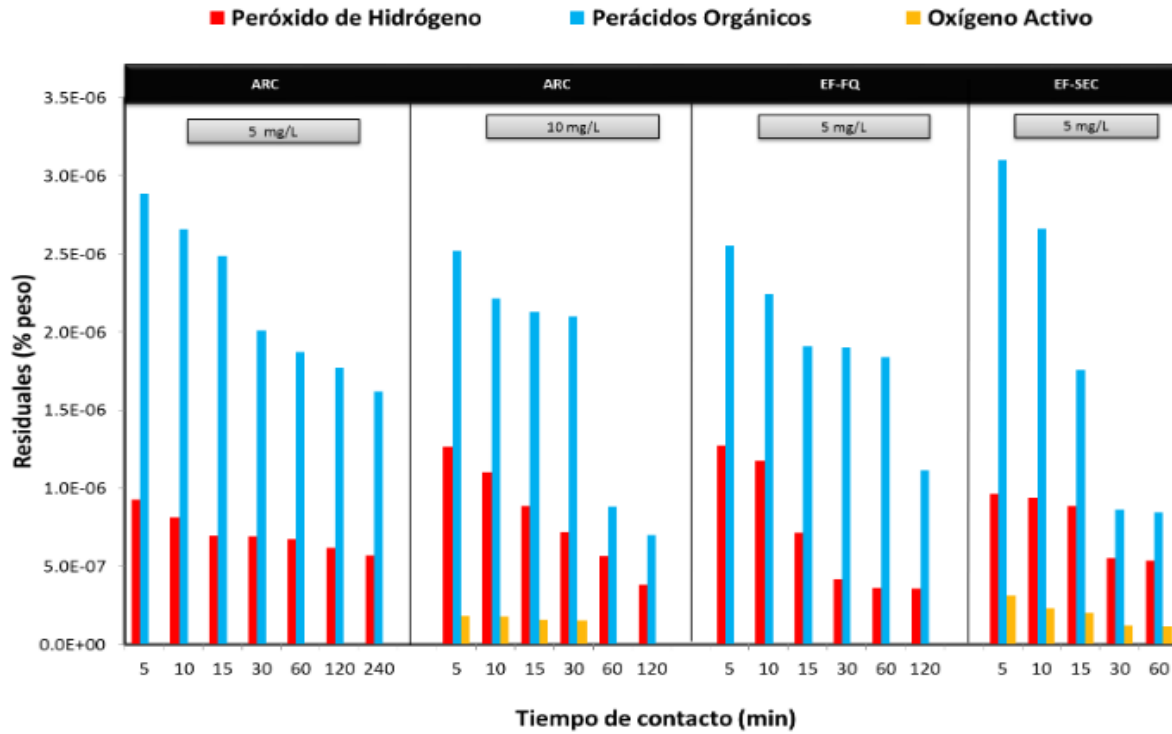


Figura 19 Residuales de perácidos orgánicos en la segunda etapa experimental

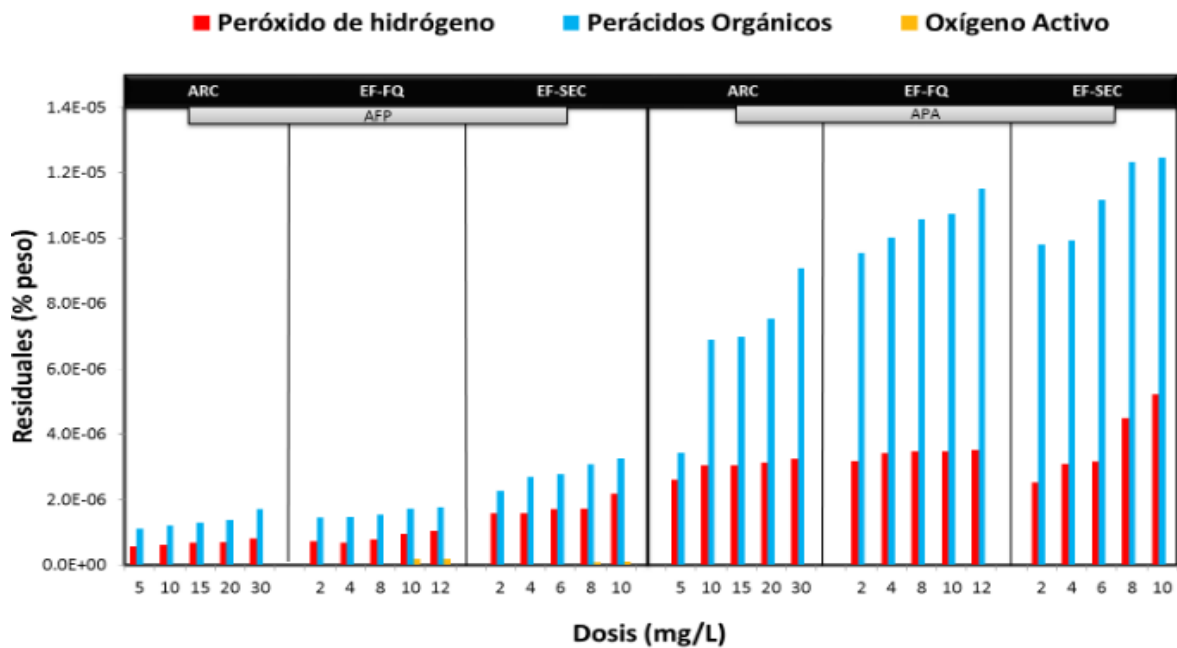


Figura 20 Residuales de perácidos orgánicos en la tercera etapa experimental