Tesis para obtener el Grado de Maestro en Ciencias e Ingeniería Ambientales

Evaluación del proceso combinado Ácido Peracético-Luz Ultravioleta para desinfección de agua residual tratada para utilizarse en riego de áreas verdes

Ing. Abelardo González Aragón

Asesores:
Dra. Mabel Vaca Mier
Universidad Autónoma Metropolitana

Dr. Ronald Gehr
Universidad McGill, Canadá

Septiembre de 2007

A Vicky,

Gus,

Adris,

Dan

mi núcleo y mi fortaleza

En este proyecto se juntó una gran cantidad de personajes y actores que, asumiendo con entusiasmo y dedicación su papel, hicieron que este trabajo llegara a buen fin. A todos, mi profundo agradecimiento, ya que sin ustedes, nunca hubiera realizado esta tarea.

En especial, Mabela, no quitar el dedo del renglón tiene sus consecuencias.

Ronnie, thank you for your time, the fruitful long discussions and your comments, they were extremely valuable. I learned more than a few things.

Los “plantitos” y los “labitos” (alias “laboratoritos”) –los jefes Adán y Miguel Ángel, Salomé, Laura (las dos), Rodolfo, Carlos, Elena, Aymara, Lolita, Jorge, Diana, Ruth, Liz, Imelda, Silvia, Alma, Erika– aquellos que vieron nacer este proyecto alrededor de una mesa redonda, que saben lo que valen y lo que hicieron para sacar adelante el complejo y pesado trabajo en el tiempo en que se requería, gracias, ha sido un gusto y un privilegio compartir con ustedes esta aventura.

Sylvie, tu determinación de apoyarnos totalmente con la operación de la planta de tratamiento de aguas residuales fue definitiva, sin tus acciones, simplemente no se hubiera podido realizar este proyecto.

A todos los profes, colegas y amigos, que aunque digan lo contrario, pienso que fue difícil tenerme del otro lado en el salón. Gracias por su paciencia. Rocío, te agradezco el apoyo especial para sacar adelante la parte experimental del proyecto.

Araceli, Violeta, gracias por sus comentarios en la revisión de este trabajo. No olvido y agradezco las puntuales observaciones y sugerencias de todos los alumnos, compañeros y colegas del Seminario del grupo de investigación, siempre fueron tomados en cuenta.

Un reconocimiento especial a la UAM Azcapotzalco, por permitirme formar, orgullosamente, parte de su comunidad; y a sus autoridades y al personal de las secciones de obras y mantenimiento, quienes desde sus ámbitos de competencia facilitaron la realización de este proyecto.

Finalmente, a Manfred Schnyder de Germ-ex, por su incondicional apoyo a través de los años; a Degusa, por habernos facilitado el ácido peracético; y a Trojan Technologies, por haber donado la lámpara y los planos para la construcción del equipo de luz colimada, gracias.

Índice

RESUMEN	1
ABSTRACT	5
1 JUSTIFICACIÓN	8
2 OBJETIVOS	14
3 MARCO TEÓRICO	16
3.1 NECESIDAD DE DESINFECCIÓN DE AGUAS RESIDUALES	16
3.2 TECNOLOGÍA DE DESINFECCIÓN DE AGUAS RESIDUALES	18
3.2.1 MECANISMOS DE INACTIVACIÓN DE MICROORGANISMOS	20
Ácido Peracético	20
Luz ultravioleta	21
Proceso combinado PAA-UV	25
3.2.2 CINÉTICA DE DESINFECCIÓN	25
Decaimiento natural de los microorganismos	26
Modelos cinéticos de desinfección con agentes químicos	27
Modelos cinéticos de desinfección con luz ultravioleta	29
3.3 CRITERIOS DE CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL TRATADA PARA RIEGO DE ÁREAS VERDES	32
4 MATERIALES Y MÉTODOS	36
4.1 TÉCNICAS ANALÍTICAS UTILIZADAS	36
4.2 EFECTO DEL ÁCIDO PERACÉTICO. PRUEBA EN LABORATORIO	38
4.2.1 VALORACIÓN DEL ÁCIDO PERACÉTICO	38
4.2.2 DETERMINACIÓN DEL ÁCIDO PERACÉTICO RESIDUAL	39
4.2.3 DEMANDA INMEDIATA DE ÁCIDO PERACÉTICO	40

4.2.4	DETERMINACIÓN DEL EFECTO GERMICIDA DEL ÁCIDO PERACÉTICO EN LABORATORIO	41
4.3	EFFECTO DE LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA. PRUEBA EN LABORATORIO	42
4.4	EFFECTO DEL ÁCIDO PERACÉTICO. PRUEBA EN PLANTA PILOTO	50
4.5	EFFECTO DE LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA. PRUEBA EN PLANTA PILOTO	53
4.6	EFFECTO COMBINADO PAA-UV. PRUEBA EN PLANTA PILOTO	54
5	RESULTADOS	58
5.1	EXPERIMENTACIÓN PRELIMINAR	58
5.1.1	EFFECTO DEL PAA. RESULTADOS EN LABORATORIO	58
5.1.2	EFFECTO DE LA UV. RESULTADOS EN LABORATORIO	66
5.2	EXPERIMENTACIÓN EN PLANTA PILOTO	70
5.2.1	CALIDAD DEL AGUA A DESINFECTAR	70
5.2.2	EFFECTO DEL PAA. RESULTADOS EN PLANTA PILOTO	71
5.2.3	EFFECTO DE LA UV. RESULTADOS EN PLANTA	73
5.2.4	EFFECTO COMBINADO DEL PAA-UV. PRUEBA EN PLANTA	76
6	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	81
6.1	EFICIENCIA DE DESINFECCIÓN	81
6.1.1	DESINFECCIÓN CON ÁCIDO PERACÉTICO	82
6.1.2	DESINFECCIÓN CON RADIACIÓN ULTRAVIOLETA	83
6.1.3	DESINFECCIÓN CON PAA-UV	85
6.2	EFFECTO SINÉRGICO	88
7	SÍNTESIS Y CONCLUSIONES	93
8	ANEXOS	97
8.1	NOMENCLATURA	97
8.2	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL ÁCIDO PERACÉTICO	100
8.3	ANEXO FOTOGRÁFICO	101
8.4	ANEXO DE RESULTADOS	108

8.4.1	EFFECTO PAA. PRUEBA EN LABORATORIO _____	108
8.4.2	EFFECTO UV. PRUEBA EN PLANTA _____	110
8.4.3	EFFECTO PAA. PRUEBA EN PLANTA _____	110
8.4.4	EFFECTO PAA-UV. PRUEBA EN PLANTA _____	112
8.4.5	ESTADÍSTICA DE LA CALIDAD BACTERIOLÓGICA DEL AGUA A DESINFECTAR _____	115
8.4.6	CALIDAD DEL AGUA DEL EFLUENTE DEL SEDIMENTADOR DE LA PLANTA PILOTO _____	116
8.5	PLANTA PILOTO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES _____	122
9	<u>BIBLIOGRAFÍA</u> _____	131
9.1	REFERENCIAS _____	131
9.2	ARTÍCULOS CONSULTADOS _____	134
9.3	NORMAS CONSULTADAS _____	136

Índice de tablas

Tabla 1-1	Componentes del ciclo hidrológico y disponibilidad natural del agua en México	8
Tabla 1-2	Clasificación del indicador de disponibilidad natural de agua <i>per cápita</i>	9
Tabla 3-1	Principales microorganismos relacionadas con transmisión de enfermedades hídricas	18
Tabla 3-2	Tiempo máximo de supervivencia de patógenos en el ambiente	18
Tabla 3-3	Remoción de microorganismos en diferentes sistemas de tratamiento	19
Tabla 3-4	Energías de enlace en sistemas microbiológicos	24
Tabla 3-5	Dosis-respuesta reportados para microorganismos expuestos a radiación UV	32
Tabla 3-6	Criterios de calidad del agua residual tratada recomendada para riego de áreas verdes	34
Tabla 3-7	Criterios de calidad del agua para reúso en México	34
Tabla 3-8	Límites de metales pesados y tóxicos para reúso en riego de áreas verdes	35
Tabla 4-1	Técnicas analíticas utilizadas	36
Tabla 4-2	Equipos y analizadores utilizados en las determinaciones de calidad del agua	37
Tabla 4-3	Preparación de diluciones para prueba de demanda inmediata de PAA	40
Tabla 4-4	Calidad del agua en prueba de laboratorio	42
Tabla 4-5	Calidad del agua a determinar en la prueba de PAA en planta	52
Tabla 4-6	Programa de muestreo en la prueba de PAA en planta	52
Tabla 4-7	Calidad del agua a determinar en la prueba de UV en planta	54
Tabla 4-8	Condiciones experimentales en la prueba combinada PAA-UV	55
Tabla 4-9	Programa de muestreo en la prueba combinada PAA-UV en planta	57
Tabla 4-10	Calidad del agua a determinar en la prueba combinada PAA-UV en planta	57
Tabla 5-1	Demanda inmediata de PAA en función de la DQO del agua	59
Tabla 5-2	Modelos de regresión para el PAA residual	60
Tabla 5-3	Producto PAA residual por tiempo de contacto	62
Tabla 5-4	Resultados normalizados de la prueba de comportamiento del PAA residual	64
Tabla 5-5	Coliformes totales, UFC/100 mL. Prueba en laboratorio del efecto del PAA	65
Tabla 5-6	Eficiencia de desinfección, $-\log(N/N_0)$. Prueba en laboratorio del efecto del PAA	65
Tabla 5-7	Calidad bacteriológica del agua en prueba UV en laboratorio	66
Tabla 5-8	Coefficientes de regresión para las curvas CB	67
Tabla 5-9	Análisis de varianza del modelo de regresión prueba UV laboratorio	67
Tabla 5-10	Resumen de la calidad del agua del efluente del sedimentador primario	70
Tabla 5-11	PAA residual en las pruebas de desinfección con PAA en planta piloto	71
Tabla 5-12	Diseño de experimentos PAA en planta	71
Tabla 5-13	Análisis de varianza del experimento con PAA en planta	72

Tabla 5-14	Fluencia recibida por los microorganismos. Pruebas en planta piloto	74
Tabla 5-15	Fluencia UV promedio. Prueba en planta piloto	74
Tabla 5-16	Análisis de varianza de la inactivación de CT respecto a la fluencia UV	75
Tabla 5-17	Factores considerados en la prueba combinada PAA-UV	77
Tabla 5-18	Condiciones experimentales en la prueba combinada PAA-UV	77
Tabla 5-19	Condiciones experimentales en la prueba combinada PAA-UV	77
Tabla 5-20	Análisis de varianza de la inactivación. Prueba combinada PAA-UV	78
Tabla 6-1	Resumen estadístico básico de la calidad bacteriológica del agua sedimentada	81
Tabla 6-2	Inactivación promedio. Todos los tratamientos	91
Tabla 8-1	Resultados del comportamiento del PAA residual respecto al tiempo	108
Tabla 8-2	Calidad del agua sedimentada. Efecto PAA prueba en laboratorio	109
Tabla 8-3	Calidad del agua desinfectada. Efecto PAA prueba en laboratorio.	109
Tabla 8-4	Estadística descriptiva de la inactivación causada por UV en planta piloto	110
Tabla 8-5	Calidad del agua sedimentada. Efecto PAA prueba en planta piloto	110
Tabla 8-6	Calidad del agua desinfectada. Efecto PAA prueba en planta piloto	111
Tabla 8-7	Estadística descriptiva de la inactivación causada por PAA en planta piloto	111
Tabla 8-8	Calidad del agua sedimentada. Efecto PAA-UV prueba en planta piloto	112
Tabla 8-9	Calidad del agua desinfectada. Efecto PAA-UV prueba en planta piloto. Parte 1	112
Tabla 8-10	Calidad del agua desinfectada. Efecto PAA-UV prueba en planta piloto. Parte 2	113
Tabla 8-11	Calidad bacteriológica del agua a desinfectar (Coliformes totales)	114
Tabla 8-12	Calidad bacteriológica del agua desinfectada. Efecto PAA-UV, prueba en planta	114
Tabla 8-13	Estadística básica de la inactivación causada por PAA-UV en planta piloto	115
Tabla 8-14	Estadística básica por nivel, prueba combinada PAA-UV	115
Tabla 8-15	Estadística básica de la calidad bacteriológica del agua a desinfectar	115
Tabla 8-16	Estadísticos de la calidad del agua del efluente del sedimentador primario	117
Tabla 8-17	Resultados de calidad del agua del efluente del sedimentador primario	117
Tabla 8-18	Características de la unidad de mezclado rápido	122
Tabla 8-19	Características de la unidad de floculación	123
Tabla 8-20	Características de la unidad de sedimentación de alta tasa	123
Tabla 8-21	Características de la unidad de filtración	123

Índice de figuras

Figura 1-1	Contraste de disponibilidad natural del agua en México (CNA, 2004)	9
Figura 1-2	Grado de presión sobre el recurso hídrico en México (CNA, 2004)	10
Figura 3-1	Doble enlaces en microorganismos expuestos a radiación UV (Metcalf & Eddy, 2003)	23
Figura 3-2	Espectro de absorción de radiación UV por las purinas y pirimidinas (WEF, 1996)	24
Figura 5-1	Demanda inmediata (45 s) de PAA en función de la DQO del agua	59
Figura 5-2	PAA residual en función del tiempo, $C_0 = 10$ mg/L	61
Figura 5-3	PAA residual en función del tiempo, $C_0 = 20$ mg/L	61
Figura 5-4	PAA residual en función del tiempo, $C_0 = 30$ mg/L	62
Figura 5-5	Comparación de curvas de PAA residual en función del tiempo	63
Figura 5-6	Comportamiento del PAA residual en función del tiempo	64
Figura 5-7	Eficiencia de desinfección PAA. Prueba en laboratorio	66
Figura 5-8	Curvas CB. Pruebas en laboratorio	68
Figura 5-9	Eficiencia promedio de desinfección UV. Pruebas en laboratorio	69
Figura 5-10	Diagrama de dispersión de la inactivación con PAA. Prueba en planta piloto	72
Figura 5-11	Diagrama de caja, efecto PAA, prueba en planta piloto	73
Figura 5-12	Diagrama de caja para la Fluencia UV. Prueba en planta piloto	75
Figura 5-13	Comparación de medias de la fluencia UV. Prueba en planta piloto	75
Figura 5-14	Diagrama de caja para Inactivación de Coliformes Totales. Prueba en planta piloto	76
Figura 5-15	Diagrama de dispersión PAA. Prueba combinada en planta	78
Figura 5-16	Diagrama de dispersión UV. Prueba combinada en planta	78
Figura 5-17	Superficie de respuesta estimada aplicación PAA-UV	79
Figura 5-18	Contornos de la superficie de respuesta estimada aplicación PAA-UV	80
Figura 6-1	Grado de inactivación logrado por el PAA solamente	83
Figura 6-2	Grado de inactivación logrado por la UV solamente	84
Figura 6-3	Coliformes totales remanentes después de la desinfección con UV	85
Figura 6-4	Grado de inactivación logrado por la aplicación combinada de PAA-UV	86
Figura 6-5	Diagrama de efectos principales de la inactivación. Prueba combinada PAA-UV	87
Figura 6-6	Diagrama de interacción de efectos. Prueba combinada PAA-UV	87
Figura 6-7	Suma de efectos individuales de desinfección	90
Figura 6-8	Comparación de efectos de los agentes desinfectantes utilizados	91
Figura 6-9	Comparación de eficiencia de inactivación. Todos los tratamientos	92
Figura 8-1	PAA residual normalizado	108
Figura 8-2	Diagrama de caja de los Coliformes totales antes de desinfectar	116

Figura 8-3	Grafica de probabilidad normal de los Coliformes totales antes de desinfectar _____	116
Figura 8-4	Diagramas de caja de la calidad del efluente del sedimentador primario _____	119
Figura 8-5	Histogramas de la calidad del efluente del sedimentador primario _____	120
Figura 8-6	Gráficas de probabilidad normal de la calidad del efluente del sedimentador primario ____	121

Resumen

En las regiones con marcada escasez de recursos hídricos, el reúso del agua residual tratada es una alternativa siempre atractiva a considerar. Sin embargo, esta acción no está exenta de problemas y debe realizarse de manera apropiada de forma tal que se proteja a la salud de los usuarios y al ambiente.

Independientemente del tipo de tratamiento del agua que se realice, es necesario garantizar la calidad microbiológica del agua residual tratada para todas aquellas actividades en que el uso de ésta pueda poner en peligro la salud de la población o de los usuarios. Por esto, el proceso de desinfección cobra especial relevancia, puesto que es la última barrera técnica que se tiene para producir un agua residual tratada con características microbiológicas adecuadas para el reúso al que se le destine.

Este trabajo se centró en el proceso de desinfección, buscando alternativas para eliminar algunos aspectos objetables de la generalizada práctica de desinfección con cloro y sus derivados. El objetivo principal del proyecto fue evaluar la capacidad del proceso de desinfección combinado ácido peracético¹-luz ultravioleta (PAA-UV), para alcanzar la calidad bacteriológica establecida en las normas mexicanas, para la utilización de agua residual tratada en riego de áreas verdes y zonas recreativas. Un segundo objetivo fue observar el efecto sinérgico de la aplicación combinada de los agentes desinfectantes (proceso PAA-UV), respecto al efecto particular de cada agente desinfectante.

Se consideraron las siguientes restricciones y particularidades:

- Trabajar con el efluente de un sistema de tratamiento primario avanzado
- Realizar las pruebas en continuo, en la planta piloto de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco

¹ PAA = ácido peracético por sus siglas en inglés

- Aplicar ácido peracético y luz ultravioleta, de manera separada y en conjunto
- Utilizar un equipo de UV con lámpara de alta intensidad y presión media

Se realizaron pruebas preliminares en laboratorio (pruebas 1 y 2) cuyos resultados se utilizaron para definir las condiciones en las que se realizarían las pruebas en la planta piloto. El programa total de pruebas fue:

1. Determinación del efecto del PAA en laboratorio
 - a. Valoración del PAA
 - b. Determinación del PAA residual
 - c. Demanda inmediata de PAA
 - d. Determinación del efecto germicida del PAA en laboratorio
2. Determinación del efecto de la radiación UV en laboratorio utilizando un equipo de luz colimada
3. Determinación del efecto del PAA prueba en planta piloto
4. Determinación del efecto de la radiación UV prueba en planta piloto
5. Determinación del efecto combinado de aplicación de PAA y radiación UV, prueba en planta piloto

En laboratorio se observó que el contenido de materia orgánica juega un papel determinante en la efectividad del ácido peracético, ya que para empezar a notar efectos en la desinfección se requirió aplicarlo en cantidades mayores a 20 mg/L.

Se diseñaron sendos experimentos para observar el efecto del PAA y la radiación UV aplicados cada uno por separado, y finalmente aplicándolos en conjunto.

El ácido peracético se aplicó en cantidades iniciales que variaron de 10 a 30 mg/L, y se fijó un tiempo de contacto de 10 minutos, notándose diferencias significativas en la eficiencia de desinfección. Se observó el comportamiento del PAA residual y, para cada concentración inicial del agente desinfectante químico, se obtuvo el producto PAA residual por tiempo de contacto ($C \cdot t$), que refleja de una mejor forma la respuesta a este agente en el proceso de desinfección. Se pueden caracterizar 3 grupos distintos

de eficiencia de inactivación²: menos de 1.5 logs de inactivación promedio de coliformes totales para productos C_{i-t} menores a 2.26 mg*min/L; 3.8 logs de inactivación promedio cuando el C_{i-t} fue de 4.40 mg*min/L; y, finalmente, 5.9 logs de inactivación promedio cuando el C_{i-t} fue 24.15 mg*min/L.

Las pruebas en continuo de desinfección con radiación UV se realizaron aplicando un intervalo de 3 a 20 mJ/cm², observándose fluencias UV promedio recibidas por los microorganismos de 5.93, 7.17 y 13.03 mJ/cm², para los gastos de operación de la planta piloto de 21, 30 y 39 L/min respectivamente. Los resultados indican que existe una diferencia significativa entre las medias, siendo evidente que el gasto de operación de la planta de 21 L/min (que representa una fluencia (UV) promedio de 13.03 mJ/cm²) es diferente a las otras dos condiciones de operación, y es la que produce las mayores eficiencias de inactivación de coliformes totales (2.5 logs en promedio).

Para las condiciones de esta experimentación, se obtuvieron reducciones de coliformes totales de 4 logs o mayores, aplicando el proceso combinado PAA-UV, cuando el producto C_{i-t} (factor PAA) fue mayor o igual a 20 mg*min/L y la fluencia (UV) promedio recibida por los microorganismos fue mayor a 12 mJ/cm². Los resultados permiten concluir que sí es factible alcanzar la calidad bacteriológica definida en la NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece que no se debe exceder el valor de 240 NMP CF/100 mL para aguas que se utilizarán en riego de áreas verdes con contacto directo.

En el caso bajo estudio, la cantidad de ácido peracético aplicado, tuvo una mayor influencia en la inactivación de coliformes totales, variando su impacto de 1 a 5 logs de reducción; mientras que la radiación UV mostró un impacto menos importante ya que

² Como lo expresan Chen, Dong y Gehr (2005), la inactivación de microorganismos se indica en unidades logarítmicas: "logs", y que representa la siguiente relación:

$$Inactivación = -\log\left(\frac{N}{N_o}\right)$$

Donde N y N_o, son las cantidades de microorganismos finales e iniciales, respectivamente, en las muestras analizadas.

al aumentar la fluencia (UV) solamente se observó un incremento de 1.5 a 2.5 logs por este factor.

No se encontró evidencia de un efecto sinérgico al aplicar ambos agentes desinfectantes en conjunto, respecto a la suma de los efectos cuando se utilizan por separado.

Pudiera ser que la materia orgánica y el material suspendido presentes en el agua a desinfectar reaccionen instantáneamente con el PAA, y que el tiempo que transcurre entre el punto de aplicación del PAA y se recibe la irradiación con UV sea tal que disminuya la disponibilidad real del PAA y, por tanto, la posibilidad de activación del PAA por la UV.

El tema desarrollado en este proyecto es totalmente relevante y da pie a una serie de investigaciones posteriores que será necesario ir planteando y desarrollando.

Abstract

Treated wastewater reuse is always an appealing option in regions where water is scarce. However, this option is not problem-free and it has to be accomplished in such a way that the users and the environment are properly protected.

Regardless what water treatment technology is used, it is necessary to assure microbiological quality of treated wastewater in every use that can endanger people or users health. That is why disinfection processes are particularly important; they are the last technical barrier we have to produce microbiologically safe treated wastewater for reuse.

This project is focused in disinfection processes, looking for alternatives to override certain objectionable aspects of chlorination. The main objective of this project was to evaluate the disinfection process combining the use of peracetic acid and UV irradiation (PAA-UV process) in order to achieve microbiological standards stated in Mexican legislation for recreational landscape irrigation. A second objective was to establish the synergy effect of combined disinfectants compared with the addition of their individual effects.

The following restrictions and particularities were considered in the project:

- Disinfection of an advanced primary treated effluent
- Perform the tests in continuous flow operation at the wastewater treatment pilot plant of the Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco
- Peracetic acid and UV irradiation would be evaluated separately, and the combined PAA-UV process would also be evaluated
- High intensity, medium pressure, UV lamp would be use in the pilot plant experiments

Preliminary laboratory tests (tests 1 and 2) were conducted to define the operation conditions that would be applied in pilot plant tests. Overall tests program was:

1. Laboratory test for PAA effect determination
 - a. PAA valuation
 - b. Residual PAA determination
 - c. Immediate PAA demand
 - d. Germicidal effect of PAA
2. Laboratory (collimated beam) test for UV effect determination
3. Pilot plant test for PAA effect determination
4. Pilot plant test for UV effect determination
5. Pilot plant test for PAA-UV effect determination

Laboratory tests showed that the amount of organic matter in wastewater to disinfect plays an important role in PAA disinfection efficiency; the effect was only noted when PAA was applied in amounts higher than 20 mg/L.

Experiments were designed to observe PAA and UV separate effects on disinfection efficiency; finally, the combined PAA-UV process was also evaluated.

During pilot plant tests initial PAA concentration varied from 10 to 30 mg/L and the contact time was established in 10 minutes; there were significant differences observed in total coliforms disinfection efficiency. Additionally, variations of PAA residual vs time were observed in order to define the combined factor PAA residual-contact time ($C_t \cdot t$) which properly represents the response of this disinfection agent. Three groups were identified: an average of 1.5 log units for inactivation when $C_t \cdot t$ was equal or less than 2.26 mg*min/L; 3.8 log units for inactivation when $C_t \cdot t = 4.40$ mg*min/L; and, 5.9 log units for inactivation when $C_t \cdot t = 24.15$ mg*min/L.

Continuous flow tests for UV disinfection were conducted varying pilot plant operation flow. Average UV fluence received by microorganisms varied from 3 to 20 mJ/cm²; and the average UV fluence received was 5.93, 7.17 y 13.03 mJ/cm² corresponding to 21, 30

y 39 L/min operating flow at the wastewater treatment pilot plant. Two groups were observed: an average of 2.5 log units for inactivation when average fluence received was 13.03 mJ/cm²; for an operation flow of 21 L/min in the wastewater treatment pilot plant. The other conditions yielded an average of 2.5 log units for inactivation with no significant differences among them.

For these experiments conditions, 4 log units for inactivation, or higher, were achieved when the combined PAA-UV process was used; to reach such removal efficiency, $C_{\text{PAA}} \cdot t$ (PAA factor) was equal or higher than 20 mg*min/L and average UV fluence received by microorganisms was equal or higher than 12 mJ/cm². The level of total coliforms inactivation attained was enough to comply with Mexican regulations (NOM-003-SEMARNAT-1997) that requires 240 MPN FC/100 mL for treated wastewater to be used in recreational landscape irrigation.

In this case, PAA applied had a major role in treated wastewater disinfection, its effect varied from 1 to 5 log units reductions; meanwhile fluence UV only produced from 1.5 to 2.5 log units reductions.

There was no evidence of synergy effects when PAA-UV was applied combined, compared with the addition of the individual effects of each disinfectant agent. Perhaps organic matter and suspended solids in wastewater react instantaneously with PAA, and time between PAA application and UV exposure is such that there is a minimal possibility to activate the remaining PAA.

The subject considered in this project is relevant and there are still many questions to be solved in future projects.

1 Justificación

La disponibilidad natural del agua en las cuencas hidrológicas es el resultado del balance entre la precipitación, la evapotranspiración, el escurrimiento superficial y la infiltración que recarga los acuíferos. A nivel nacional se estima una disponibilidad natural media anual de 475 km³, lo que en promedio indica que se tiene una disponibilidad natural *per cápita* de 4,534 m³/hab/año (Tabla 1-1). Este indicador es utilizado ampliamente para determinar el grado de presión que ejercen los diferentes usuarios sobre el recurso hidráulico (Tabla 1-2). Se puede observar que en promedio, la disponibilidad *per cápita* es baja, sin embargo, en México la distribución de la población y de los recursos hidráulicos en las regiones administrativas es muy diferente, lo que permite caracterizar dos regiones de disponibilidad: la sureste, que agrupa al 23% de la población nacional, genera el 15% del PIB, y tiene el 68% de la disponibilidad natural; mientras que las regiones norte, noroeste y centro, en su conjunto concentran al 77% de la población y generan el 85% del PIB, y solamente cuentan con el 32% del agua disponible anualmente. Como se ejemplifica claramente en la Figura 1-1, las regiones administrativas del sureste, que representan el 21.5% del territorio nacional tienen una alta disponibilidad natural de agua, mientras que el 78.5% restante sufre de graves presiones sobre el recurso hídrico debido a una muy baja disponibilidad. A nivel de cada región administrativa el caso extremo se presenta en la región del Valle de México, con una disponibilidad anual media extremadamente baja: 182 m³/hab/año (Constantino, 2006).

Tabla 1-1 Componentes del ciclo hidrológico y disponibilidad natural del agua en México

Componente del ciclo hidrológico	Promedio anual
Precipitación media histórica 1941-2002 (771 mm)	1 511 km ³
Evapotranspiración media	1 085 km ³
Escurrimiento superficial natural total	398 km ³
Recarga media total de acuíferos	77 km ³
Disponibilidad natural total	475 km ³
Disponibilidad natural media por habitante	4 534 m ³
Fuente: CNA, 2004	

Tabla 1-2 Clasificación del indicador de disponibilidad natural de agua *per cápita*

Disponibilidad natural <i>per-cápita</i> (m ³ /habitante/año)	Clasificación
Menor a 1 000	Extremadamente baja
1 001 a 2 000	Muy Baja
2 001 a 5 000	Baja
5 001 a 10 000	Media
10 001 a 20 000	Alta
Más de 20 000	Muy Alta
Fuente: Shiklomanov, 2003, citado en CNA, 2004

Figura 1-1 Contraste de disponibilidad natural del agua en México (CNA, 2004)

Otro indicador utilizado en este campo, es el grado de presión sobre el recurso hídrico, que se entiende como la relación entre la extracción total anual respecto a la disponibilidad natural media. Se puede clasificar a las regiones administrativas en cuatro intervalos de presión sobre el recurso: fuerte; media fuerte; moderada y; escasa. Las regiones administrativas del norte, noroeste y Valle de México, presentan una fuerte presión sobre el recurso, mientras que las del sur y sureste presentan una escasa presión (Figura 1-2). Esto simplemente subraya el problema que se enfrenta en más de la mitad del territorio nacional (56%) en donde se asienta el 43% de la población y la presión sobre el recurso hidráulico es alta o extrema, situación que por el simple crecimiento natural de la población se irá agravando cada vez más (Constantino, 2006).

Es evidente entonces que la competencia entre los diferentes usos del agua en las zonas urbanas obliga a buscar el mejor aprovechamiento de los limitados recursos hidráulicos disponibles. De esta necesidad resultan una serie de acciones como el uso de mecanismos ahorradores de agua, la reutilización de agua tratada en usos que no requieren calidad potable y cambios tecnológicos que, en general, coadyuvan al mejor uso del agua. Sin embargo, en zonas como la del Valle de México la demanda de agua rebasa, con mucho, a la oferta y la presión sobre el recurso hídrico aumenta continuamente.

Figura 1-2 Grado de presión sobre el recurso hídrico en México (CNA, 2004)

El reúso del agua para riego de áreas verdes es una práctica que se lleva a cabo en la zona metropolitana de la Ciudad de México, obligada, entre otros factores, por las circunstancias de escasez, el costo del suministro de agua y el incremento de la demanda para satisfacer las necesidades de una población creciente.

Sin embargo, este reúso de las aguas residuales tratadas no está exento de problemas y debe realizarse de manera apropiada, de manera que se proteja la salud de los usuarios y el ambiente. Desde 1997 se publicó la Norma Oficial Mexicana

estableciendo los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsan en servicios al público (NOM-003-SEMARNAT-1997). El énfasis de esta norma en la calidad bacteriológica, es una clara indicación de la preocupación de las autoridades por la protección de la salud del público usuario y de las personas que manejan agua residual tratada para satisfacer las necesidades de sus actividades cotidianas. En la norma también se establecen los límites de calidad del agua de parámetros que influyen en la eficiencia del proceso de desinfección, tales como la demanda bioquímica de oxígeno³ y el contenido de sólidos suspendidos, de manera que este proceso sea económicamente factible al nivel que se requiere para proteger la salud del público usuario.

La cloración⁴, por razones económicas y experiencia probada, es el método de desinfección de agua más ampliamente utilizado en México y a nivel mundial. Sin embargo, los compuestos orgánicos presentes en los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales se comportan como precursores de subproductos halogenados de desinfección (Metcalf & Eddy, 2003), cuyos efectos han inquietado a los investigadores desde hace tiempo.

En los años recientes ha aumentado la preocupación de los efectos adversos a la salud (Chen *et al.*, 2005; Liberti y Notarnicola, 1999; Monarca *et al.*, 2000; US EPA, (1999b), así como a las plantas (Lubello *et al.*, 2004), que pueden ocasionar los subproductos de la desinfección con cloro. La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA por sus siglas en inglés) clasifica a los residuales y subproductos de desinfección en cuatro categorías (US EPA, 1999a):

- Residuales de desinfección, como el cloro libre, las cloraminas, y el dióxido de cloro.

³ La Demanda Bioquímica de Oxígeno al 5° día (DBO₅), es una medida indirecta de la cantidad de materia orgánica biodegradable presente en una muestra de agua, y es el parámetro de diseño y control de operación más utilizado en sistemas de tratamiento de aguas residuales.

⁴ Uso del cloro, o sus derivados, para oxidar e intoxicar a los microorganismos.

- Subproductos inorgánicos, tales como iones clorato, clorito, bromato y yodato, así como el peróxido de hidrógeno y el amoníaco.
- Subproductos de oxidación de compuestos orgánicos, por ejemplo los aldehídos y los ácidos carboxílicos.
- Subproductos orgánicos halogenados, entre los que se pueden mencionar por ejemplo a los trihalometanos, los ácidos haloacéticos, los haloacetónitrilos, las halocetonas, y los clorofenoles.

Los subproductos orgánicos halogenados, generalmente se forman a partir de materia orgánica presente en el agua residual y de la aplicación de compuestos halogenados como desinfectantes. Éstos son los que, por su potencial de causar cáncer y mutaciones, producen mayor preocupación (Metcalf & Eddy, Inc., 2003). Aún más, a partir de estudios epidemiológicos, la US EPA (1999a) reporta que algunos subproductos orgánicos halogenados como el cloroformo, el bromodiclorometano, el bromoformo, el ácido dicloroacético, el 2-4-6 triclorofenol y el formaldehído, están clasificados como compuestos clase B (probables carcinógenos para los humanos); mientras que el dibromoacetónitrilo, el dibromoclorometano y el ácido tricloroacético, han sido catalogados como clase C (posibles carcinógenos para los humanos).

Estas preocupaciones han motivado el estudio de diversos desinfectantes alternativos al cloro que, por una parte, logren alcanzar los niveles de desinfección requeridos por las diferentes instancias encargadas de establecer los límites para el uso seguro del agua residual tratada y, por la otra, que el costo asociado a estos tratamientos sea económicamente competitivo respecto al cloro. Así, se realizó un amplio estudio patrocinado por la comunidad europea (Liberti y Notarnicola, 1999; Liberti *et al.*, 2000), en donde se estableció inicialmente que algunos de los desinfectantes alternativos no eran económicamente competitivos para alcanzar los niveles de desinfección requeridos. Se propuso entonces que se utilizaran procesos combinados de desinfectantes de manera que se tuvieran alternativas económicamente más realistas, lo que fue finalmente demostrado en un prolongado estudio piloto (Caretti y Lubello, 2003). Ha resultado particularmente atractivo el uso combinado de agentes físicos y agentes químicos desinfectantes; y dentro de las opciones que se han probado se

encuentra la aplicación de ácido peracético (PAA por sus siglas en inglés) y el uso de radiación ultravioleta (UV).

Un mayor entendimiento de los mecanismos de desinfección y otras experiencias similares llevadas a cabo en Canadá, sugieren que existe un efecto sinérgico al utilizar el ácido peracético en combinación con la radiación ultravioleta para desinfectar agua tratada y producir consistentemente agua con características aptas para riego de áreas verdes (Chen *et al.*, 2005).

En México no se ha puesto suficiente atención al problema de los subproductos de los procesos de desinfección de agua residual tratada para riego de áreas verdes, por lo que es necesario investigar cómo se comportan éstos en las condiciones y con la calidad del agua que se obtiene en las plantas de tratamiento locales. Así, se contribuye a la protección y el mejoramiento de las condiciones de salud de los habitantes de nuestro país, se promueve el uso eficiente y seguro del agua residual tratada, se protege al ambiente y se fomenta el cumplimiento de las normas ecológicas establecidas por las autoridades del sector.

2 Objetivos

Este proyecto tuvo los siguientes objetivos:

General:

Evaluar la capacidad del proceso de desinfección combinado Ácido Peracético-Luz Ultravioleta, para alcanzar la calidad bacteriológica requerida en la producción de agua residual tratada para riego de áreas verdes y zonas recreativas.

Particulares:

1. Evaluar el proceso de desinfección combinado Ácido Peracético-Luz Ultravioleta, utilizando agua residual que ha recibido tratamiento primario avanzado en un sistema operado en flujo continuo.

Hipótesis:

Es técnicamente factible obtener agua que cumpla con la calidad bacteriológica requerida en las normas nacionales para su utilización en riego de áreas verdes y zonas recreativas (reúso con contacto directo), partiendo de agua residual que ha recibido tratamiento primario avanzado en un sistema operado en flujo continuo.

2. Evaluar el efecto sinérgico al aplicar agentes desinfectantes químicos (ácido peracético) y físicos (luz ultravioleta), en el proceso de desinfección de agua residual que ha recibido tratamiento primario avanzado en un sistema operado en flujo continuo.

Hipótesis:

La interacción de los agentes desinfectantes físicos y químicos, al aplicarse en conjunto, tiene un efecto sinérgico en la inactivación de microorganismos que es superior a la suma de los efectos particulares de cada mecanismo de desinfección del agua residual que ha recibido tratamiento primario avanzado en un sistema operado en flujo continuo.

3 Marco teórico

En esta sección se presentan los fundamentos de la desinfección de agua residual tratada, los mecanismos de desinfección de los oxidantes químicos y la radiación ultravioleta, y finalmente se describe el uso combinado de agentes desinfectantes.

3.1 Necesidad de desinfección de aguas residuales

La protección de la salud pública, a través del control de los microorganismos patógenos, es la principal razón para desinfectar las aguas residuales. La desinfección se practica para proteger la calidad del agua y que ésta sea apropiada para usos subsecuentes, situación cada vez más importante debido a la escasez y competencia por utilizar este recurso natural. La importancia relativa de la desinfección del agua se puede entender al considerar que es la última barrera de protección para evitar que los microorganismos patógenos lleguen a los cuerpos receptores de aguas residuales tratadas.

Más aún, como se describe en el Manual de Prácticas de Desinfección de Agua Residual (WEF, 1996):

"Mills y Reincke reportaron en 1893 que cuando se sustituía una fuente de abastecimiento de agua contaminada por una de buena calidad, la mejora en salud de la población era mucho mayor que la que podría ser atribuida a la simple reducción de la presencia de fiebre tifoidea y otras enfermedades transmisibles por el agua, lo que se conoció como el fenómeno Mills-Reincke. En 1903, Allen Hazen descubrió que, cuando la fuente de abastecimiento de agua de una localidad cambiaba de mala a excelente debido a que recibía un tratamiento adecuado, por cada persona salvada de la muerte por fiebre tifoidea, adicionalmente otras tres personas serían salvadas de la muerte debida a otras causas, muchas de las cuales nunca habrían sido consideradas como relacionadas, o especialmente afectadas o influidas, por la calidad del suministro de agua. Esta reducción en la tasa de mortalidad se denominó como

el Teorema de Hazen. Evidentemente, la desinfección del agua potable y las aguas residuales tiene mayores implicaciones que el simple control de enfermedades transmisibles por el agua."

La desinfección se define como la acción de destruir o inactivar microorganismos patógenos por medios físicos, químicos, fisicoquímicos o una combinación de ellos; mas no la eliminación total de todos los microorganismos presentes en el agua, concepto al que se refiere como esterilización, y tiene aplicaciones muy bien definidas principalmente en la industria farmacéutica, alimenticia y los servicios hospitalarios (WEF, 1996; Metcalf & Eddy, 2003).

En el campo de tratamiento de agua residual, las cuatro categorías de organismos entéricos humanos causantes de enfermedades son: bacterias, quistes de protozoos, helmintos y virus, en los que se han centrado la mayoría de estudios de desinfección. En la Tabla 3-1 se enlistan los principales microorganismos involucrados en la transmisión de enfermedades hídricas; cabe indicar que la mayoría de ellos llega a los cuerpos receptores de agua, provenientes de heces humanas y de animales.

El potencial de exposición a microorganismos patógenos disminuye con el tiempo debido a factores ambientales tales como el calor, la radiación solar, la desecación y la depredación de los patógenos en el ambiente, sin embargo los persistentes riesgos de infección son evidentes debido al tiempo de permanencia que éstos tienen en el suelo o las plantas (Tabla 3-2); razón por demás importante para realizar una adecuada desinfección de las aguas residuales antes de que lleguen a los cuerpos receptores o sean reutilizadas.

Tabla 3-1 Principales microorganismos relacionadas con transmisión de enfermedades hídricas

	Nombre	Tipos	Principal enfermedad	Concentración en fuente primaria	Dosis infecciosa
Bacterias	<i>Salmonella Typhi</i>	1	Fiebre tifoidea	10 ⁶ /g	Baja
	<i>Salmonella paratyphi</i>	1	Fiebre paratifoidea	10 ⁶ /g	Alta
	Otras salmonelas	2,000	Salmonelosis	10 ⁶ /g	Alta
	<i>Vibrio cholerae</i>	?	Cólera	10 ⁶ /g	Media
	<i>E. coli</i> enteropatógena	?	Gastroenteritis	10 ⁶ /g	Alta
Virus	Poliovirus	3	Poliomielitis		
	Coxsackievirus A	3	Meningitis	10 ⁶ /g	
	Coxsackievirus B	23	Meningitis		
	Rotavirus	3	Gastroenteritis		
	Adenovirus	37	Enfermedades gastrointestinales y en vías respiratorias	10 ⁶ /g	
Protozoo	<i>Blattidium coli</i>	1	Disentería	?	?
	<i>Entamoeba histolytica</i>	1	Disentería amibiana	10 ⁵ /g	Baja
	<i>Giardia lamblia</i>	1	Giardiasis	10 ⁵ /g	Baja
	<i>Acanthamoeba spp.</i>	1	Keratitis y encefalitis	?	?
	<i>Naegleria fowleri</i>	1	molestias amibiasis	?	?
Helmintos	<i>Ascaris lumbricoides</i>	1	Ascariasis	10 - 10 ⁴ /g	
	<i>Trichuris trichiura</i>	1	Trichuriasis	10 - 10 ⁴ /g	
	<i>Ancylostoma duodenale</i>	1	lombrices intestinales		
	<i>Necator americanus</i>	1	lombrices intestinales	10 - 10 ² /g	
	<i>Strongyloides stercoralis</i>	1	lombrices intestinales		
? = desconocido o incierto Adaptado de: Wastewater Disinfection, Manual of Practice FD-10, Water Environment Federation, 1996					

Tabla 3-2 Tiempo máximo de supervivencia de patógenos en el ambiente

Patógeno	Suelo		Plantas	
	Absoluto ^a	Normal	Absoluto	Normal
Bacterias	1 año	2 meses	6 meses	1 mes
Virus	1 año	3 meses	2 meses	1 mes
Quistes de protozoos ^b	10 días	2 días	5 días	2 días
Huevos de helmintos	7 años	2 años	5 meses	1 mes
^a Mayores tiempos de supervivencia son posibles bajo condiciones poco usuales como temperaturas consistentemente bajas o ambientes altamente protegidos ^b Se reportan pocos datos acerca del tiempo de supervivencia de quistes de <i>Giardia</i> y <i>Cryptosporidium</i> Fuente: WEF, 1996				

3.2 Tecnología de desinfección de aguas residuales

Los patógenos mueren naturalmente y también son destruidos en cantidades importantes durante los procesos de tratamiento de aguas residuales (Tabla 3-3). Sin

embargo, esta reducción no es suficiente para garantizar la calidad microbiológica del agua residual tratada, ni para proteger la salud de los usuarios, y tampoco debe confundirse con el objetivo ni las funciones de las unidades de desinfección.

Tabla 3-3 Remoción de microorganismos en diferentes sistemas de tratamiento

Proceso de tratamiento	Remoción de (unidades log ₁₀)			
	Bacterias	Helmintos	Virus	Quistes
Sedimentación primaria simple	0-1	0-2	0-1	0-1
Sedimentación mejorada con químicos ¹	1-2	1-3 (G)	0-1	0-1
Lodos activados ²	0-2	0-2	0-1	0-1
Biofiltración ²	0-2	0-2	0-1	0-1
Lagunas aeradas ³	1-2	1-3 (G)	1-2	0-1
Zanjas de oxidación ²	1-2	0-2	1-2	0-1
Desinfección ⁴	2-6	0-1	0-4	0-3
Lagunas de estabilización ⁵	1-6 (G)	1-3 (G)	1-4	1-4
Lagunas de almacenamiento de efluentes ⁶	1-6 (G)	1-3 (G)	1-4	1-4
Notas: G Con un buen diseño y operación apropiada se pueden alcanzar las recomendaciones de la OMS 1 Se requiere mayor información para confirmar el desempeño 2 Incluyendo sedimentación secundaria 3 Incluyendo laguna de sedimentación 4 Cloración u ozonación 5 El desempeño depende del número de lagunas en serie utilizadas y otros factores ambientales 6 El desempeño varía con el tiempo de retención, el que varía con la demanda Fuente: Helmer y Hespanhol, 1997				

La desinfección, que también se puede definir como la operación mediante la que se mata a los organismos vivos potencialmente infecciosos, se realiza mediante calor, luz, oxidantes químicos, ácidos, álcalis, iones metálicos, y/o tensoactivos. Los procesos térmicos generalmente no son utilizados en el tratamiento de aguas residuales domésticas, debido al elevado costo que se tendría al calentar grandes volúmenes de agua a desinfectar. La radiación solar es un desinfectante natural que actúa principalmente por desecación. La radiación ultravioleta es un método práctico para aplicar radiaciones en variadas operaciones de desinfección. Los oxidantes químicos utilizados usualmente para desinfección son halógenos (cloro, bromo, yodo) y sus sales, ozono, peróxido de hidrógeno, permanganato de potasio y ácido peracético. Las bacterias patógenas no sobreviven en ambientes con pH menor a 3, o mayor a 11. Finalmente, los tensoactivos –principalmente los detergentes catiónicos–, son tóxicos a los patógenos y de ahí que también se hayan utilizado como agentes desinfectantes

complementarios, sobre todo en la industria de preparación de alimentos (WEF, 1996; Metcalf & Eddy, 2003).

3.2.1 Mecanismos de inactivación de microorganismos

Se han estudiado con detalle los mecanismos mediante los cuales el ozono, así como el cloro y sus derivados, inactivan a los microorganismos, y el lector puede verificarlos en la abundante literatura técnica al respecto. Los agentes desinfectantes de interés para este trabajo son el ácido peracético y la luz ultravioleta.

Ácido Peracético

El ácido peracético (PAA por sus siglas en inglés) ha sido utilizado solo o en combinación con otros agentes para desinfectar agua residual tratada (Gehr *et al.*, 2003; Liberti *et al.*, 2000).

Se produce mezclando ácido acético glacial, peróxido de hidrógeno y agua. Generalmente se utiliza ácido sulfúrico como catalizador de la reacción y se aplica un estabilizador para reducir la biodegradación del producto (US EPA 1999b).

El ácido peracético es un oxidante fuerte (1.81 V de potencial de oxidación, E_o) y es una mezcla en equilibrio de ácido acético, peróxido de hidrógeno, ácido peracético y agua:

Debido a la alta reactividad del producto final, los reactivos líquidos deben enviarse al sitio de uso en tanques separados y debe prepararse la mezcla de acuerdo con la demanda. Los residuales del PAA parecen ser no tóxicos, y se degradan fácilmente en los cuerpos receptores (Lefevre, *et al.*, 1992; US EPA 1999 b). La descomposición del PAA y del peróxido de hidrógeno, conducen a la formación de ácido acético,

metano, oxígeno y agua, compuestos no nocivos al ambiente, como lo muestran las siguientes reacciones (Lefevre, *et al.*, 1992):

Se considera que el ácido no dissociado ($\text{CH}_3\text{CO}_3\text{H}$) es la forma biocida (Liberti y Notarnicola, 1999). Se han propuesto dos mecanismos de desinfección:

- La acción desinfectante se debe a la liberación de oxígeno activo que destruye los enlaces sulfhidrilo (-SH) y sulfuro (S-S) de las enzimas de la membrana celular, afectando el transporte a través de ella (Lefevre, *et al.*, 1992; Liberti y Notarnicola 1999).
- Caretti y Lubello (2003) proponen que la liberación de radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) son los responsables de la desinfección debido a su alto potencial de oxidación, garantizando una rápida degradación de las moléculas.

Luz ultravioleta

La luz ultravioleta es un agente físico desinfectante. Las ondas de energía de la radiación UV se encuentran en el intervalo de 100 a 400 nm de longitud de las ondas (λ) electromagnéticas –entre el espectro de rayos X y luz visible–. La radiación UV puede clasificarse en cuatro tipos (US EPA, 1999 a):

- UV en vacío, $\lambda = [100 \text{ a } 200] \text{ nm}$
- UV-C, $\lambda = [200 \text{ a } 280] \text{ nm}$

- UV-B, $\lambda = [280 \text{ a } 315] \text{ nm}$
- UV-A, $\lambda = [315 \text{ a } 400] \text{ nm}$

La radiación penetra la pared celular de los microorganismos y es absorbida por los ácidos nucleicos (DNA y RNA), lo que evita su replicación, o bien causa la muerte de la célula (WEF, 1996; UE EPA 1999 a; Metcalf & Eddy, 2003; Chen *et al.*, 2005).

En términos de su acción germicida, las radiaciones con longitudes de onda en el intervalo de 245 a 285 nm son las que producen los mayores efectos desinfectantes; radiaciones con $\lambda \cong 254 \text{ nm}$, son las que causan el daño más potente al DNA. El daño fotoquímico resulta de la dimerización de las moléculas pirimidinas: citosina (presente en el DNA y RNA; timina (sólo en el DNA); y uracilo (sólo en el RNA). La replicación de los ácidos nucleicos se dificulta una vez que se establecen enlaces dobles de las moléculas pirimidinas, distorsionando la estructura de doble hélice del DNA (Figura 3-1) y, más aún, en caso de que hubiera replicación, el resultado serían bacterias mutantes incapaces de replicarse (US EPA, 1999 a).

Para que se realice la desinfección con radiación UV es necesario que se presenten dos condiciones:

- Que exista suficiente energía radiante para alterar los enlaces químicos, y
- Que la radiación sea absorbida por la molécula objetivo (microorganismos)

La energía asociada a la radiación electromagnética puede calcularse con esta ecuación (WEF, 1996):

Ec. 3-6
$$E_{\lambda} = \frac{hC}{\lambda} A$$

Donde:

E_λ , energía radiante asociada con determinada longitud de onda⁵, kcal/einstein

C , velocidad de la radiación electromagnética en vacío, 3×10^{17} nm/s

h , constante de Planck, 1.583×10^{-37} kcal·s

λ , longitud de onda de la energía radiante, nm

A , número de Avogadro, 6.023×10^{23} fotones/einstein

Figura 3-1 Doble enlaces en microorganismos expuestos a radiación UV (Metcalf & Eddy, 2003)

A partir de esta ecuación se puede demostrar que, para $\lambda = 253.7$ nm, la energía radiante (E_λ), es 112.8 kcal/einstein, energía suficiente para alterar los principales enlaces químicos en las moléculas nucleicas (Tabla 3-4). En la Figura 3-2 se muestra el espectro de absorción molar, a pH 7, de las moléculas que componen los ácidos nucleicos.

⁵ En reacciones fotoquímicas, un einstein representa una "mol", es decir un número de Avogadro, de fotones

Tabla 3-4 Energías de enlace en sistemas microbiológicos

Enlace	Energía de disociación, kcal/mol
O – H	110 – 111
C – H	96 – 99
N – H	93
C = O	173 – 181
C – N	69 – 75
C = C	146 – 151
C – C	83 – 85
Fuente: WEF, 1996	

La literatura técnica (WEF, 1996; UE EPA 1999 a; Metcalf & Eddy, 2003) coincide en llamar la atención sobre dos fenómenos que ocurren después de la desinfección con UV: la fotorreactivación; y la reactivación a oscuras ("*Dark reactivation*").

Figura 3-2 Espectro de absorción de radiación UV por las purinas y pirimidinas (WEF, 1996)

La fotorreactivación es un proceso de reparación natural del DNA y ocurre cuando algunos organismos dañados por la radiación UV, son expuestos a energía lumínica (en el intervalo de $\lambda = 310$ a 500 nm), ocurre la fisión de los dímeros de pirimidinas, restaurándose la secuencia base original y permitiendo que los microorganismos se repliquen normalmente. La reactivación nunca es completa, y sólo se recupera una

fracción de los organismos afectados. El grado de reactivación es proporcional al tiempo, intensidad de la exposición a la luz visible y la temperatura. La reactivación también puede darse en ausencia de luz (reactivación a oscuras), pero requiere tiempos mayores (WEF, 1996).

Proceso combinado PAA-UV

Para el caso de procesos combinados de desinfección PAA-UV, se propone un mecanismo de desinfección basado en la liberación de radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$), los que se consideran responsables de la desinfección debido a su alto potencial de oxidación ($E_o = 2.8 \text{ V}$), garantizando una rápida degradación de las moléculas (Caretti y Lubello, 2003; Lubello, *et al*, 2004).

La Ec. 3-7 muestra la acción fotolítica de radiación UV sobre el PAA, produciendo la ruptura hemolítica del enlace O-O de la molécula del PAA, formando entonces radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$); la molécula resultante ($\text{CH}_3\text{CO}_2\bullet$) se descompone rápidamente a $\text{CH}_3\bullet$ y CO_2 . También se menciona que la presencia de peróxido de hidrógeno no sólo contribuye a la formación de más PAA, sino que también forma nuevos radicales hidroxilo (Lubello, *et al*, 2004).

3.2.2 Cinética de desinfección

Se han propuesto una gran cantidad de formulaciones matemáticas que intentan describir el efecto de los desinfectantes y el tiempo de exposición sobre la tasa de supervivencia de los microorganismos de interés. En esta sección se presentan los más relevantes para este trabajo.

Decaimiento natural de los microorganismos

Como se mencionó anteriormente, los microorganismos naturalmente decaen en el ambiente debido a dilución, remoción física y muerte natural debida a la radiación solar, temperatura, salinidad, metales pesados, bacteriofagia, parasitismo, lisis y depredación por los microorganismos nativos. Se ha propuesto que, cuando los efectos de temperatura no son relevantes, el decaimiento natural de los microorganismos en las corrientes de agua sigue una cinética de primer orden (WEF, 1996; Metcalf & Eddy, 2003):

$$\text{Ec. 3-8} \quad N = N_o e^{-kt}$$

Donde:

N , Concentración de microorganismos al tiempo t , organismos/L

N_o , Concentración inicial de microorganismos, organismos/L

k , tasa de remoción, s^{-1}

t , tiempo transcurrido, s

Para lagos y embalses, el decaimiento natural puede calcularse con la siguiente expresión:

$$\text{Ec. 3-9} \quad N = \frac{N_o}{1 + kt_d}$$

Donde:

N , Concentración de microorganismos al tiempo t , organismos/L

N_o , Concentración inicial de microorganismos, organismos/L

k , tasa de remoción, d^{-1}

t_d , tiempo de retención hidráulico en el cuerpo de agua basado en su descarga, d

Modelos cinéticos de desinfección con agentes químicos

El primer intento de modelo matemático que representara la desinfección de agua fue enunciado por Chick en 1908, quien reconoció la similitud entre la inactivación de los microorganismos y las reacciones químicas. Chick formuló un modelo en donde se suponía que la tasa de desinfección con cloro podía describirse con una expresión similar a la de una reacción que sigue una cinética de primer orden. El modelo inicial fue transformado por Watson para ajustar sus predicciones con los resultados encontrados en campo, dando lugar al modelo de Chick-Watson, que ha sido ampliamente utilizado para modelar la desinfección con agentes químicos. En 1972, Hom basado en el modelo de Chick-Watson, desarrolló un modelo bastante flexible, y altamente empírico, que permitió aproximaciones más razonables (WEF, 1996; Gyürék y Finch, 1998). El modelo, que es válido cuando se considera flujo pistón y concentración constante del desinfectante a través del tiempo, es el siguiente (Gyürék y Finch, 1998):

Ec. 3-10
$$\frac{dN}{dt} = -k_m N C^n t^{m-1}$$

Donde:

N , concentración de microorganismos al tiempo t , organismos/L

k , constante de la ley de la tasa de inactivación

C , concentración del desinfectante al tiempo t , mg/L

n , constante para la ley de la tasa de inactivación

m , constante para la ley de generalizada de la tasa de inactivación

Considerando que, en realidad, la concentración de desinfectante varía con el tiempo, y el patrón de flujo en el reactor generalmente es arbitrario, el modelo de Hom

fue modificado por Haas y Jofe en 1994 (citados por Gyürék y Finch, 1998), resultando la siguiente expresión:

$$\text{Ec. 3-11} \quad \log \frac{N}{N_o} = -k C_o^n T^m \eta$$

Donde el factor de eficiencia (η) se estima de la siguiente forma:

$$\text{Ec. 3-12} \quad \eta = \left[\frac{1 - e^{\left(\frac{-nk'T}{m} \right)}}{\left(\frac{-nk'T}{m} \right)} \right]^m$$

Donde:

N , Concentración de microorganismos al tiempo t , organismos/L

k , constante de la ley de la tasa de inactivación

k' , constante (base e) de primer orden de la tasa de desaparición del desinfectante, min^{-1}

T , tiempo total de contacto, min

C_o , concentración inicial del desinfectante al tiempo $t = 0$, mg/L

n , constante para la ley de la tasa de inactivación

m , constante para la ley de generalizada de la tasa de inactivación

η , factor de eficiencia

Otro modelo, desarrollado inicialmente para desinfección con cloro, pero que puede generalizarse también a cualquier agente químico, es el desarrollado por Selleck (citado por Gyürék, *et al.*, 1998), en donde se asume que la tasa de desaparición del desinfectante sigue una cinética de primer orden independientemente de la tasa de inactivación de microorganismos. El modelo resultante es:

$$\text{Ec. 3-13} \quad \log \frac{N}{N_o} = -n \log \left[1 + \frac{C_o}{k k'} (1 - e^{-k' T}) \right]$$

Todos los términos han sido definidos previamente.

Es conveniente mencionar que N , N_o , C y t , son términos comunes en estas expresiones, mientras que las constantes empíricas utilizadas en las diferentes ecuaciones pueden no estar relacionadas. En las ecuaciones anteriores, los valores de las constantes dependen de la naturaleza del agua residual, las especies químicas, y las combinaciones del desinfectante con ciertas características del agua –por ejemplo la relación cloro: nitrógeno amoniacal– (WEF, 1996).

Modelos cinéticos de desinfección con luz ultravioleta

Al evaluar la tasa de cambio fotoquímico inducido por la radiación UV, es conveniente considerar al fotón de UV como reactivo. Como en el caso de reacciones químicas, la tasa de reacción fotoquímica estará controlada por la disponibilidad de "reactivo". En este caso, la intensidad es la medida de la disponibilidad de fotones de UV. La intensidad se define como la cantidad de la potencia radiante por unidad de área expuesta a la radiación que recibe un cuerpo (WEF, 1996).

Los primeros modelos para representar la inactivación por radiación UV, fueron similares a los de desinfección química, pero considerando la intensidad de radiación en lugar de la concentración del desinfectante (WEF, 1996):

$$\text{Ec. 3-14} \quad \frac{dN}{dt} = -k \bar{I} N$$

$$\text{Ec. 3-15} \quad \bar{I} = \frac{I_o}{H\alpha} (1 - e^{-H\alpha})$$

Donde:

N , concentración de organismos viables, organismos/L

k , constante de inactivación de primer orden, $\text{cm}^2/\text{mW}\cdot\text{s}$

$\bar{I}$, intensidad de radiación promedio, mW/cm^2

I_o , intensidad de radiación incidente, mW/cm^2

H , profundidad del líquido, cm

α , coeficiente de absorbancia, cm^{-1}

La aplicación del modelo, a partir del uso de un aparato de rayo colimador para mantener constante la radiación aplicada, permitió obtener intensidades y dosis requeridas para lograr un 90% de inactivación de diversos microorganismos (Tabla 3-5).

En sistemas de tratamiento, los organismos están expuestos a niveles variables de intensidad. En estas condiciones, la dosis (expresada en $\text{mW}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$) se puede definir de la siguiente forma:

Ec. 3-16
$$dosis = \int_0^{\tau} I(t) dt$$

Donde:

$I(t)$, función de intensidad dependiente del tiempo, mW/cm^2

τ , tiempo de exposición, s

En múltiples aplicaciones la función de intensidad dependiente del tiempo $I(t)$, se aproxima a partir de métodos numéricos.

En 1987 Sheible (citado en WEF, 1996) presentó un modelo para predecir el desempeño de procesos de desinfección con UV, basado en la teoría de reactores no-ideales. La ecuación resultante es:

$$\text{Ec. 3-17} \quad N = N_o \exp \left[\frac{ux}{2E} \left[1 - \left(1 + \frac{4E(a I_{avg}^b)}{u^2} \right)^{1/2} \right] \right] + c SS^m$$

Donde:

N , densidad de microorganismos después de la irradiación, UFC/100 mL

N_o , densidad de microorganismos antes de la irradiación, UFC/100 mL

u , velocidad del agua residual, cm/s

x , longitud de la zona de irradiación en la dirección del flujo, cm

E , coeficiente de dispersión longitudinal, cm²/s

I_{avg} , intensidad UV promedio espacial dentro de la zona de irradiación, mW/cm²

SS , concentración de sólidos suspendidos en el efluente, mg/L

a, b, c, m , coeficientes empíricos

Este modelo se ha utilizado satisfactoriamente, sin embargo su principal crítica radica en que se deben establecer los parámetros experimentales que son específicos en cada caso. Los parámetros a y b relacionan la intensidad promedio con la tasa de inactivación microbiana, mientras que los parámetros c y m , están relacionados con los microorganismos que, acoplados a los sólidos suspendidos en el efluente de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, no reciben suficiente radiación para ser inactivados.

Tabla 3-5 Dosis-respuesta reportados para microorganismos expuestos a radiación UV

Grupo	Microorganismo	Dosis requerida para lograr 90% de inactivación, mW·s/cm ²	Constante de inactivación de primer orden, cm ² / mW·s
Bacteria	<i>Clostridium tetani</i>	12	0.19
	<i>Escherichia coli</i>	1.33 - 3.2	0.72 - 1.73
	<i>Legionella pneumophila</i>	0.38 – 2.49	0.93 – 6.1
	<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	6	0.38
	<i>Pseudomona auruginosa</i>	5.5	0.42
	<i>Salmonella enteris</i>	4	0.58
	<i>Salmonella paratyphi</i>	3.2	0.72
	<i>Salmonella typhi</i>	2.26 – 2.5	0.92 – 1.10
	<i>Shigella yisenteriae</i>	0.89 – 2.2	1.05 – 2.6
	<i>Staphylococcus aureus</i>	4.5 – 5.0	0.46 – 0.51
	<i>Streptococcus faecalis</i>	4.4	0.52
	<i>Vibrio cholerae</i>	0.65 – 6.5	0.35 – 3.54
Virus	Colifago	3.6	0.64
	Colifago MS-2	18.6	0.12
	Hepatitis A	3.7 – 7.3	0.32 – 0.62
	Rotavirus	11.3	0.20
	Rotavirus SA-11	8.0 – 9.86	0.24 – 0.30
Protozoos	<i>Giardia muris</i>	82	0.03
	<i>Acanthamoeba castelani</i>	35	0.07
Adaptado de: Wastewater Disinfection, Manual of Practice FD-10, Water Environment Federation, 1996			

3.3 Criterios de calidad del agua residual tratada para riego de áreas verdes

El proceso para definir las guías y estándares de calidad del agua, ha seguido históricamente un patrón de establecer los efectos de los contaminantes en la salud humana y en la ecología de los organismos acuáticos. Originalmente las guías se basaron en limitada información epidemiológica, posteriormente fueron modificadas con base en riesgos detectables (a partir de limitada información experimental) y, actualmente, se han desarrollado con base en riesgos aceptables, que requieren suficiente información para modelar matemáticamente la relación entre alguna medida de la calidad del agua y el riesgo (WEF, 1996).

Debido a la posible presencia de múltiples organismos patógenos en el agua, se han desarrollado indicadores que permiten estimar la presencia, ausencia y cantidad de organismos patógenos en el agua. Los organismos más utilizados han sido las bacterias

coliformes (totales y fecales), la *Escherichia coli* y los estreptococos. Estos indicadores se correlacionan adecuadamente con la presencia de bacterias patógenas, pero subestiman a los protozoos y helmintos; sin embargo, actualmente no se cuenta con una herramienta mejor para determinar los riesgos microbiológicos asociados al agua y se siguen utilizando para establecer normas y criterios de uso y descarga.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) revisó recientemente los criterios para determinar la calidad microbiológica del agua residual tratada utilizada en agricultura (Blumenthal *et al.*, 2000). En éstos, el agua para riego de áreas verdes, campos deportivos y zonas recreativas, es clasificada como agua para irrigación sin restricciones, tipo "A1", cuyo grupo expuesto son los trabajadores, los usuarios y el público en general. La OMS propone que, independientemente del tipo de riego que se utilice, el agua residual tratada utilizada para este servicio debe presentar un promedio aritmético de menos de 0.1 Huevos de Helmintos/L; y menos de 200 organismos coliformes fecales/100 mL, reportados como media geométrica de las determinaciones realizadas, preferentemente, en forma semanal (Blumenthal *et al.*, 2000).

En Estados Unidos, la US EPA recomienda el uso de un efluente terciario desinfectado que cumpla con los parámetros indicados en la Tabla 3-6 para realizar el riego de áreas verdes, camellones y parques recreativos. Las recomendaciones del Estado de California, que han estado en uso desde 1978, son consistentes con las recomendaciones de la EPA (citado en Metcalf & Eddy, Inc., 2003).

Canadá establece los requerimientos de desinfección caso por caso. Algunos ejemplos reportados indican, para el caso de los coliformes fecales, un intervalo que varía desde 14 hasta 1,000 NMP CF/100 mL, que es similar a los criterios establecidos por la Organización Mundial de la Salud (WEF, 1996).

En México, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, publicó el 21 de septiembre de 1998 en el Diario Oficial de la Federación, la NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas

residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Esta norma enfatiza la importancia de la calidad bacteriológica del agua residual tratada y restringe los valores de parámetros de calidad del agua que interfieren con la eficiencia de desinfección.

Tabla 3-6 Criterios de calidad del agua residual tratada recomendada para riego de áreas verdes

Agencia	Parámetro	Valor	Unidades	Monitoreo
EPA	pH	6 a 9	Unidades	Semanal
EPA	DBO ₅	10	mg/L	Semanal
EPA	Turbiedad	2	UTN	Continuo
EPA	<i>Escherichia coli</i>	Ninguno	Organismos/100 mL	Diario
EPA	Cloro residual	≥ 1.0	mg/L	Continuo
California	Coliformes totales	< 2.2	NMP/100 mL	
California	Turbiedad promedio	2	UTN	
	Turbiedad máxima	5	UTN	
Adaptado de: Wastewater engineering: treatment and reuse, Metcalf & Eddy, Inc., (2003)				

En la NOM-003-SEMARNAT-1997 el riego de áreas verdes se clasifica como reúso en servicios al público con contacto directo. La Tabla 3-7 presenta los valores microbiológicos y fisicoquímicos de la Norma, mientras que en la Tabla 3-8 se muestran los relativos a tóxicos y metales pesados.

Tabla 3-7 Criterios de calidad del agua para reúso en México

Parámetros reportados como promedio mensual	Tipo de reúso	
	Servicios al público con contacto directo	Servicios al público con contacto indirecto u ocasional
Coliformes fecales, NMP/100 mL	240	1,000
Huevos de Helminto, HH/L	≤ 1	≤ 5
Grasas y aceites, mg/L	15	15
DBO ₅ , mg/L	20	30
SST, mg/L	20	30
Materia flotante	Ausente	Ausente
Fuente: NOM-003-SEMARNAT-1997		

Tabla 3-8 Límites de metales pesados y tóxicos para reúso en riego de áreas verdes

Parámetro, mg/L	Promedio mensual	Promedio diario
Arsénico	0.2	0.4
Cadmio	0.2	0.4
Cianuros	2.0	3.0
Cobre	4.0	6.0
Cromo	1.0	1.5
Mercurio	0.01	0.02
Níquel	2.0	4.0
Plomo	0.5	1.0
Zinc	10.0	20.0
Fuente: NOM-003-SEMARNAT-1997		

Al comparar estos valores puede observarse la concordancia de los criterios nacionales con los utilizados y recomendados en otras partes del mundo. También se observa que existe un consenso de utilizar a los organismos indicadores como mecanismo para establecer la aplicabilidad del agua tratada para el riego de áreas verdes.

4 Materiales y métodos

Se diseñaron las siguientes pruebas para alcanzar los objetivos planteados para el proyecto:

- Determinación del efecto del ácido peracético en laboratorio
 - Valoración del ácido peracético
 - Determinación del ácido peracético residual
 - Demanda inmediata de ácido peracético
 - Determinación del efecto germicida del ácido peracético en laboratorio
- Determinación del efecto de la radiación ultravioleta en laboratorio
- Determinación del efecto del ácido peracético prueba en planta piloto
- Determinación del efecto de la radiación ultravioleta prueba en planta piloto
- Determinación del efecto combinado de aplicación de ácido peracético y radiación ultravioleta, prueba en planta piloto

En este capítulo se describe cada una de ellas.

4.1 Técnicas analíticas utilizadas

Las determinaciones de calidad del agua se realizaron aplicando las técnicas analíticas indicadas en la Tabla 4-1. La Tabla 4-2 describe los equipos estándar de laboratorio utilizados en las determinaciones analíticas.

Tabla 4-1 Técnicas analíticas utilizadas

Parámetro	Técnica	Técnica alterna
pH	NMX-AA-008 Determinación de pH Método potenciométrico	Method 4500- H ⁺ B, Electrometric Method Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater APHA, AWWA & WEF, (1992)

Parámetro	Técnica	Técnica alterna
Conductividad eléctrica	Method 2510 B Conductivity "Laboratory Method", Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater APHA, AWWA & WEF, (1992)	
Temperatura	NMX-AA-007 Determinación de la temperatura Método visual con termómetro.	
Turbiedad	Method 2130 B Turbidity Nephelometric Method Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater APHA, AWWA & WEF, (1992)	Hach Method 8237. Turbidity (0 to 1000 mg/L) Hach Co., (2005)
Sólidos suspendidos totales	NMX-AA-034 Determinación sólidos en agua Método gravimétrico.	Hach Method 8006 Suspended Solids (0 to 750 mg/L) Hach Co., (2005)
Demanda química de oxígeno	NOM-AA-30-1981 Determinación de la Demanda Química de Oxígeno.	Hach Method 8000 Oxygen Demand, Chemical, Reactor Digestion Method USEPA (Federal Register, April 21, 1980, 45(78), 26811-26812) Hach Co., (2005)
Coliformes totales y fecales	NMX-AA-102-SCFI-2006 Calidad del Agua Detección y enumeración de organismos coliformes, organismos coliformes termotolerantes y <i>Escherichia coli</i> presuntiva Método de filtración en membrana	
PAA residual	Método de DPD Falsanisi <i>et al.</i> (2006)	

Tabla 4-2 Equipos y analizadores utilizados en las determinaciones de calidad del agua

Equipo	Marca/modelo
Analizador de pH	Orion Portable Meter 290 ^a
Conductímetro	YSI 30/10 FT
Turbidímetro	Colorimeter HACH DR/890
Espectrofotómetro	Spectronic 20
Espectrofotómetro UV-Visible	Varian Modelo Cary50
Incubadora	Thelco, GCA/Precision Scientific, Model 2.
Incubadora	Blue M, Stabil Therm, Dry Type Bacteriological Incubator
Titulador automático	BRAND Burette Digital III

El agua a tratar provenía de la planta piloto de tratamiento de aguas residuales de la UAM Azcapotzalco, la que se describe en la sección 8.5.

4.2 Efecto del ácido peracético. Prueba en laboratorio

Para determinar el efecto del ácido peracético en la desinfección de coliformes totales, fue necesario realizar cuatro procedimientos: los dos primeros relacionados propiamente con la valoración del ácido peracético, y los dos últimos enfocados a determinar el funcionamiento del ácido peracético como agente químico desinfectante.

4.2.1 Valoración del ácido peracético

La valoración del ácido peracético se basó en el método descrito por Falsanisi *et al.*, (2006), que se fundamenta en la destrucción del peróxido de hidrógeno (H_2O_2) mediante la aplicación de catalasa ($15 \cdot 10^6$ unidades/vial, Merck® 105186). Posteriormente se libera yodo al llevar a cabo la reacción entre el PAA y el yoduro de potasio (KI) en medio ácido:

Finalmente se titula el yodo liberado (I_2) con tiosulfato de sodio (Na_2SO_3), utilizando almidón al 1%, como indicador. La reacción de valoración es la siguiente:

En el Cuadro 4-1 se enlistan los reactivos y equipos utilizados en esta determinación.

Cuadro 4-1 Reactivos y equipos utilizados para la valoración del ácido peracético

Equipo utilizado <ul style="list-style-type: none">• Titulador automático BRAND Burette Digital III
Reactivos <ul style="list-style-type: none">• Catalasa (15·10⁶ unidades/vial, Merck 105186)

4.2.2 Determinación del ácido peracético residual

El ácido peracético residual se determinó por colorimetría, de acuerdo con el método descrito por Falsanisi *et al.*, (2006). El procedimiento es como sigue:

Se prepara una muestra de 11 mL para el ensayo colorimétrico, integrada por 10 mL de muestra a analizar, 0.5 mL de la solución de sulfato de N,N-Dietil-p-fenilenediamina (DPD) y 0.5 mL de solución buffer de fosfato a pH 6.5.

La solución de DPD se prepara con las siguientes proporciones: 0.037 mM de ácido sulfúrico, 0.054 mM de EDTA, y 0.061 mM DPD. La solución buffer de fosfato se preparó de la siguiente forma: 0.18 mM de fosfato ácido di-sodio dodeca-hidratado ($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$), 0.34 mM de fosfato de potasio monobásico (KH_2PO_4), 0.074 μM de cloruro mercúrico (HgCl_2), y 0.0060 mM de yoduro de potasio (KI).

La interacción del DPD y el PAA produce una coloración rojiza y la reacción se cataliza con la solución buffer de fosfato con yoduro de potasio. De acuerdo con la ley de Lambert-Beer, la concentración de PAA es proporcional con la absorbancia medida a 530 nm.

En el Cuadro 4-2 se detallan los reactivos y equipos utilizados en esta determinación.

Cuadro 4-2 Reactivos y equipos utilizados para la valoración del ácido peracético residual

Equipo utilizado
<ul style="list-style-type: none"> • Espectrofotómetro UV-Visible, Varian Mod. Cary50
Reactivos
<ul style="list-style-type: none"> • Catalasa ($15 \cdot 10^6$ unidades/vial, Merck 105186) • Yoduro de potasio (KI, 99%) Merck 105043 • Tiosulfato de sodio (Na_2SO_3, 99.7%) J. T. Baker, 3946 • Fosfato de potasio monobásico (KH_2PO_4, 99.9%) J. T. Baker 3252

4.2.3 Demanda inmediata de ácido peracético

El ácido peracético y el peróxido de hidrógeno son oxidantes fuertes, que reaccionan con compuestos orgánicos e inorgánicos susceptibles de oxidación química antes de realizar una acción desinfectante (Chen, *et al.*, 2005; Gehr, *et al.*, 2003). Con el fin de determinar el efecto que tiene la materia orgánica presente en el agua residual tratada a desinfectar se realizó una prueba exploratoria.

La prueba consistió en determinar el consumo inicial de ácido peracético, de una muestra de agua tratada que había sido diluida con agua destilada para obtener diferentes concentraciones de DQO.

La prueba se realizó con el agua cruda y cinco diluciones, de acuerdo a las proporciones indicadas en la Tabla 4-3

El ácido peracético fue valorado con el procedimiento descrito en la sección 4.2.1, y el residual fue valorado según el procedimiento de la sección 4.2.2.

Tabla 4-3 Preparación de diluciones para prueba de demanda inmediata de PAA

Dilución	Volumen Agua Cruda	Volumen Agua Destilada
1	10	0
2	8	2

3	6	4
4	4	6
5	2	8
6	1	9

4.2.4 Determinación del efecto germicida del ácido peracético en laboratorio

Esta prueba exploratoria se realizó con el fin de determinar la cantidad de ácido peracético que se requiere aplicar para alcanzar la eficiencia de desinfección deseada.

Considerando los resultados de la prueba de demanda inmediata de ácido peracético, se definieron los tiempos de contacto en los que se determinó el PAA residual. Se tomaron los siguientes:

- 1.5 minutos
- 3.0 minutos
- 4.5 minutos
- 6.0 minutos
- 7.5 minutos

Se realizó una corrida exploratoria, adicionando, de manera aleatoria, diferentes concentraciones de ácido peracético:

- 10 mg PAA/L
- 15 mg PAA/L
- 20 mg PAA/L

La eficiencia de desinfección se determinó mediante la relación entre la concentración resultante de coliformes totales después de adicionar el PAA y transcurrido el tiempo de contacto (N_{PAA}), dividido entre la concentración inicial del agua a tratar (N_0):

Ec. 4-3
$$\eta_{\text{desinfección PAA}} = \frac{N_{PAA}}{N_o}$$

Para describir la calidad del agua en esta prueba, se determinaron los parámetros de calidad del agua indicados en la Tabla 4-4.

Tabla 4-4 **Calidad del agua en prueba de laboratorio**

Parámetro	Agua sin tratamiento	Agua desinfectada con PAA
pH	✓	✓
Conductividad eléctrica	✓	✓
Temperatura	✓	
Turbiedad	✓	✓
SST	✓	
DQO	✓	
Coliformes totales	✓	✓
PAA residual		✓

El ácido peracético fue valorado con el procedimiento descrito en la sección 4.2.1, y el ácido peracético residual fue valorado según el procedimiento de la sección 4.2.2.

4.3 Efecto de la radiación Ultravioleta. Prueba en laboratorio

Se siguió el método sugerido en el protocolo de Trojan Technologies, que coincide plenamente con las recomendaciones de Bolton y Linden (2003), para la realización de pruebas estandarizadas de radiación ultravioleta con aparatos de luz colimada. Los equipos utilizados en la prueba se indican en el Cuadro 4-3.

Cuadro 4-3 Equipo utilizado en la determinación del efecto de la UV en laboratorio

Equipo utilizado <ul style="list-style-type: none">• Equipo de luz colimada• Radiómetro, International Light Technologies, Mod. IL1400BL
--

El procedimiento consistió en irradiar muestras de agua a tratar durante un tiempo específico, de manera tal que se determina la inactivación de microorganismos después de que la muestra de agua ha estado expuesta a una fluencia de UV específica.

Definiciones y aclaraciones

Bolton y Linden (2003) hacen las siguientes aclaraciones:

- El radiómetro mide irradiación, la que se define como la potencia radiante total que incide desde todas las direcciones ascendentes sobre un elemento infinitesimal de área superficial dA conteniendo el punto en consideración, dividido por dA . La irradiación es el término apropiado cuando una superficie es irradiada con luz UV proveniente de todas direcciones sobre la superficie.
- La tasa de fluencia se define como la potencia radiante total incidente de todas las direcciones sobre una pequeña esfera infinitesimal, de área transversal dA , dividido por dA . Este término es apropiado cuando, por ejemplo, un microorganismo es irradiado por luz UV proveniente de muchas direcciones diferentes.
- Tanto la irradiación, como la tasa de fluencia, se deben expresar en unidades del sistema internacional (W/m^2); sin embargo, en la literatura de desinfección con luz UV se utiliza comúnmente mW/cm^2 como medida de irradiación.
- $1 mW/cm^2 = 10 W/m^2$
- El término Dosis UV se utiliza en forma generalizada en la literatura de desinfección. Sin embargo, en situaciones cuando la irradiación o la tasa de fluencia es constante (como en el caso de un aparato de luz colimada), su

multiplicación por el tiempo de exposición (en segundos) resulta en el término correspondiente de exposición a la radiación, o fluencia. El término fluencia ha sido llamado comúnmente Dosis UV; sin embargo, en otros contextos el término "Dosis" se utiliza para describir la energía total absorbida. En el caso de los microorganismos, prácticamente toda la radiación pasa a través de ellos, siendo absorbida solamente una mínima parte, por lo que el término fluencia es más apropiado, puesto que describe la energía UV que incide en lugar de la que es absorbida.

Prueba de irradiación

- La lámpara se operó durante 20 a 30 minutos antes de la realización de las pruebas de irradiación, a fin de garantizar un funcionamiento sin variaciones durante las pruebas.
- Previo a la prueba se verificó la calibración ("cero") del radiómetro.
- Para medir la intensidad de luz UV aplicada, el filtro UV del detector se colocó al mismo nivel que el que tenía la superficie de agua al hacer las pruebas de irradiación.
- Antes de iniciar las pruebas se determinaron los tiempos de exposición que serían utilizados para obtener la curva de respuesta de los microorganismos a la radiación UV. Para esto se determinaron los siguientes valores:
 - Irradiación UV @ 0.5 cm en las direcciones "X" y "Y", a partir del centro de irradiación del tubo del aparato colimador.
 - Diámetro (d), en cm, de la caja de irradiación.
 - Volumen (V) de la muestra, en mL.
 - Distancia (D), en cm, de la lámpara UV a la superficie de agua.
 - Transmitancia UV (%T):
 - Se midió con el espectrofotómetro fijando la longitud de onda en 254 nm
 - El espectrofotómetro se calibró cada vez que se llevaba a cabo la determinación de la transmitancia.
- Lectura del radiómetro al centro de la caja Petri, en mW/cm^2 .

- Con esta información se determinaron los factores de corrección y los tiempos de exposición requeridos para realizar el análisis con el aparato colimador.
- La dosis de UV se calcula con:
- $\text{Dosis (UV)} = \text{Intensidad} \times \text{Tiempo}$
- Una vez que se determinó el intervalo de Dosis (UV) para cada muestra y los factores de corrección apropiados, se inició el análisis con el equipo de luz colimada.

Análisis con el equipo de luz colimada

- La muestra de agua a probar se homogeneizó.
- Se determinó la muestra requerida y se transfirió a la caja Petri estéril⁶. Se utilizó también un agitador magnético previamente esterilizado.
- La muestra se colocó en la parrilla de agitación debajo del tubo del equipo de luz colimada. La emisión del tubo debía estar bloqueada antes del inicio de la prueba.
- Se activó el cronómetro y se destapó el tubo de luz colimada simultáneamente.
- El intervalo de tiempos de exposición dependía de las series de dosis requeridas. Dado que la medición de tiempo era crucial, la tapa del tubo del equipo de luz colimada debía estar lista para su cierre antes de que expirara el tiempo de la determinación.
- La caja Petri se retiró de la parrilla de agitación y se colocó en una segunda parrilla de agitación para mantenerla bien agitada durante la siembra. La siembra se efectuó inmediatamente después de la irradiación.

⁶ En este procedimiento cuando se habla de caja Petri, se refiere a cualquier recipiente en donde se coloca la muestra a trabajar (irradiar).

Factores de corrección

Al realizar las pruebas estandarizadas de desinfección con el aparato de luz colimada, es necesario determinar y aplicar cuatro factores de corrección: Petri, reflectancia, calidad del agua y divergencia.

El factor Petri (F_p) toma en cuenta la irregularidad de la irradiación sobre la caja Petri. El factor se calcula midiendo la irradiación sobre la caja Petri y dividiéndola entre la irradiación en el centro del tubo del equipo de luz colimada. Los valores obtenidos se promediaron para obtener el factor Petri.

El factor de reflectancia (F_R) considera que no toda la radiación UV penetra en la superficie de agua. Se estima que el 2.5% de la radiación UV incidente se refleja en la superficie de agua.

Es necesario determinar el factor de calidad del agua (F_a) dado que el radiómetro solamente registra la intensidad de la irradiación UV en la superficie de la muestra, y debe considerarse su efecto mientras ésta se transporta a través del agua. Este factor se basa en la ley de Beer, y considera el coeficiente de absorción del agua y el espesor de la muestra.

El factor de divergencia (F_D) considera el efecto de que la radiación UV no está totalmente alineada ("colimada") conforme se aleja de la fuente de emisión y ésta diverge significativamente. Mientras menos espesor de muestra se tenga, se reducirá el efecto de este factor.

Determinación de los factores de corrección

Factor Petri

La irradiación se midió directamente abajo del tubo colimador, recordando que el filtro del detector UV debía estar a la misma altura que tendría la superficie del líquido durante la prueba.

Se determinó la irradiación UV @ 0.5 cm en las direcciones "X" y "Y" (I_i), a partir del centro de irradiación del tubo del aparato colimador (I_c), cubriendo una retícula que abarcó toda el área del colimador.

Los valores de la relación de estas mediciones I_i/I_c se promediaron, y se obtuvo el factor de corrección:

$$\text{Ec. 4-4} \quad F_p = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} I_i / I_c}{n}$$

Factor de reflectancia

$$F_R = 0.975$$

Factor de calidad del agua

Para determinar el factor de calidad del agua fue necesario medir la transmitancia del agua (T) y convertirla a absorbancia.

$$\text{Coeficiente de absorción, cm}^{-1} = -\log (\%T/100)$$

$$\text{Absorbancia total (A)} = \text{Coeficiente de absorción} \times \text{espesor de la muestra}$$

Ec. 4-5
$$F_a = \frac{(1 - 10^{-A})}{(A \cdot \ln(10))}$$

Factor de divergencia

Se requieren dos distancias:

- Distancia del centro de la lámpara a la superficie del agua, (L), en cm
- Espesor de la muestra, (l), en cm. Se puede calcular dividiendo el Volumen de muestra entre el área transversal de la caja Petri.

Ec. 4-6
$$F_D = \frac{L}{L + l}$$

Cálculos

La tasa de "fluencia" germicida promedio ("*average germicidal fluence rate*"), E'_{avg} , W/m² ó mW/cm², se calcula aplicando los factores de corrección a la medición de la irradiación en el centro del tubo de luz colimada (E_o).

Ec. 4-7
$$E'_{avg} = E_o \cdot F_P \cdot F_R \cdot F_A \cdot F_D$$

E_o representa la medición de irradiación realizada con el radiómetro al centro de la caja Petri y en una posición vertical tal que el plano de calibración del detector se encuentra al mismo nivel que la superficie de la solución.

La fluencia (UV) germicida promedio ("*average germicidal fluence (UV dose)*"), H' , en J/m² ó mJ/cm², se obtiene al multiplicar la tasa de "fluencia" germicida promedio por el tiempo de exposición, en segundos.

Ec. 4-8 $H' = E'_{avg} \cdot t$

Procedimiento de la prueba

La prueba se hizo variando los tiempos que permitían generar una fluencia en el intervalo de 0 a 30 mJ/cm².

En cada prueba se registra tanto la transmitancia del agua a tratar (medida con el espectrofotómetro), como la intensidad de radiación UV (determinada con el radiómetro).

Determinación de la Curva CB

La curva de respuesta de los coliformes totales en función de la fluencia UV a la que habían sido expuestos –curva desarrollada a partir de las pruebas realizadas con el aparato de luz colimada, identificada como curva CB (*"colimated beam"*)– se aproximó al modelo logístico, de acuerdo con lo indicado por Gehr (2007):

Ec. 4-9
$$Ln(N) = \frac{a}{1 + b \cdot e^{(c \cdot H')}}}$$

Donde:

N , Concentración remanente de organismos coliformes totales, UFC/100 mL

H' , fluencia germicida promedio, mJ/cm²

a, b, c , coeficientes de regresión

4.4 Efecto del ácido peracético. Prueba en planta piloto

Esta prueba se realizó con el fin de determinar el efecto de aplicar ácido peracético en continuo al efluente del sedimentador primario de la planta piloto, para alcanzar la eficiencia de desinfección deseada.

Preparación de la prueba

Antes de iniciar la prueba en planta, se tomaron las siguientes precauciones y se realizaron las siguientes actividades:

- Para evitar efectos de contaminación en los puertos de muestreo, se desinfectó con hipoclorito de sodio toda la zona de desinfección aguas debajo de la bomba de transferencia de agua tratada a la unidad de UV, manteniendo en el tramo de interés una solución concentrada de hipoclorito de sodio por 15 minutos cuando menos.
- Las pruebas se realizaron con el efluente del sedimentador, no se utilizó el filtro de antracita ni los filtros de cartucho con que cuenta la planta piloto.
- Antes de tomar las muestras, se operó la planta por un tiempo suficiente para que la condición que se estaba probando no estuviera influenciada por condiciones de operación previas.
- Cada día de operación se tomaban muestras de agua sin desinfectar, que servían de referencia para realizar los cálculos de eficiencia de desinfección.

Procedimiento

Se realizaron las corridas en la planta piloto aplicando diferentes concentraciones de PAA al efluente del sedimentador primario. El orden en que se emplearon las concentraciones era aleatorio. La cantidad de ácido peracético aplicado en cada prueba fue:

- Concentración 1: 10 mg PAA/L
- Concentración 2: 15 mg PAA/L

- Concentración 3: 20 mg PAA/L
- Concentración 4: 25 mg PAA/L
- Concentración 5: 30 mg PAA/L

La cantidad de solución de PAA que se aplicó al efluente del sedimentador de la planta piloto se determinaba diariamente de acuerdo con la fuerza de la solución de ácido peracético – valorada mediante la metodología descrita por Falsanisi *et al.*, (2006) –. La cantidad aplicada era controlada, en función del gasto, mediante la bomba dosificadora de desinfección de la planta piloto.

Para cada muestra se controlaba el flujo de operación de la planta, la fuerza de la solución de PAA aplicada, y el gasto de la bomba dosificadora. También se registró la cantidad de sulfato de aluminio y polielectrolito que se estaba utilizando en el proceso de tratamiento primario avanzado.

La muestra se tomaba una vez que se establecían las condiciones de operación de la prueba en turno, y se dividía en dos alícuotas. Después de transcurrido el tiempo de contacto especificado (10 minutos) se procedía a hacer las determinaciones analíticas.

Una alícuota de la muestra se destinaba para analizar el PAA residual por el método colorimétrico descrito en la sección 4.2.2.

El resto de la muestra obtenida se le aplicaba tiosulfato de sodio y catalasa para detener la acción germicida de los agentes químicos aplicados -y se constituía la muestra desactivada- a la que se le realizaban las determinaciones de coliformes totales y demás parámetros de calidad del agua indicados en la Tabla 4-5.

Los análisis bacteriológicos se realizaron por triplicado. Los análisis de calidad fisicoquímica se hicieron por duplicado.

Tabla 4-5 Calidad del agua a determinar en la prueba de PAA en planta

Parámetro	Agua cruda	Agua desinfectada	
		activada	desactivada
pH	✓		✓
Conductividad eléctrica	✓		✓
Temperatura	✓		✓
Turbiedad	✓		✓
SST	✓		
DQO	✓		
Coliformes totales	✓		✓
PAA residual		✓	

Programa de pruebas

Para garantizar que no hubiera sesgos por el tipo de muestreo, se siguió el programa de pruebas descrito en la Tabla 4-6.

Eficiencia de desinfección

La eficiencia de desinfección se determinó mediante la relación entre la concentración resultante de coliformes totales después de adicionar el PAA y transcurrido el tiempo de contacto (N_{PAA}), dividido entre la concentración inicial del agua a tratar (N_o):

Ec. 4-10
$$\eta_{\text{desinfección PAA}} = \frac{N_{PAA}}{N_o}$$

Tabla 4-6 Programa de muestreo en la prueba de PAA en planta

Muestra	Condición	Dosis PAA, mg/L	Muestra	Condición	Dosis PAA, mg/L
1	Concentración 2	15	9	Concentración 2	15
2	Concentración 2	15	10	Concentración 4	25
3	Concentración 3	20	11	Concentración 5	30
4	Concentración 5	30	12	Concentración 1	10
5	Concentración 3	20	13	Concentración 4	25
6	Concentración 4	25	14	Concentración 5	30
7	Concentración 3	20	15	Concentración 1	10
8	Concentración 1	10			

4.5 Efecto de la radiación Ultravioleta. Prueba en planta piloto

Esta prueba se realizó con el fin de determinar el efecto de irradiar con luz UV al efluente del sedimentador primario de la planta piloto, con una lámpara de presión media y en continuo, para alcanzar la eficiencia de desinfección deseada.

Preparación de la prueba

La preparación de la prueba en planta se realizó de la misma manera indicada en la sección 4.4.

Procedimiento

Se realizaron las corridas en la planta piloto exponiendo al efluente del sedimentador primario a diferentes dosis de radiación (UV). En términos generales, la dosis (UV) será inversamente proporcional al flujo de operación de la planta piloto.

La prueba se realizó a los siguientes flujos, que coinciden con los utilizados en la prueba combinada (sección 4.6):

- Flujo 1: 0.35 L/s
- Flujo 2: 0.50 L/s
- Flujo 3: 0.65 L/s

Se analizó el contenido de coliformes totales de cada muestra, y se comparó con el valor de la muestra sin desinfectar. Los análisis bacteriológicos se determinaron por triplicado. Los análisis de calidad fisicoquímica se hicieron por duplicado (Tabla 4-7).

Tabla 4-7 Calidad del agua a determinar en la prueba de UV en planta

Parámetro	Agua cruda	Agua desinfectada
pH	✓	✓
Conductividad eléctrica	✓	✓
Temperatura	✓	✓
Turbiedad	✓	✓
SST	✓	
DQO	✓	
Coliformes totales	✓	✓

Eficiencia de desinfección

La eficiencia de desinfección se determina mediante la relación entre la concentración resultante de coliformes totales una vez que han pasado por la lámpara de UV (N_{UV}), dividido entre la concentración inicial del agua a tratar (N_o):

Ec. 4-11
$$\eta_{\text{desinfección UV}} = \frac{N_{UV}}{N_o}$$

A partir de la inactivación de microorganismos alcanzada se calculó la dosis (UV), en mJ/cm^2 , a la que fue expuesta el agua utilizando las curvas CB (sección 4.3).

4.6 Efecto combinado PAA-UV. Prueba en planta piloto

Esta prueba se realiza con el fin de determinar el efecto de aplicar en forma combinada ácido peracético y radiación ultravioleta, con una lámpara de presión media y en continuo, para la desinfección del efluente del sedimentador primario de la planta piloto.

Preparación de la prueba

La preparación de la prueba en planta se realizó de la misma forma que se indica en la sección 4.4 de este informe.

Procedimiento

Se realizaron las corridas en la planta piloto adicionando diferentes concentraciones de PAA al efluente del sedimentador y controlando el flujo de descarga (de manera que se controlaba también la intensidad de radiación UV aplicada). Se consideraron las siguientes cantidades de PAA a aplicar en este experimento:

- Concentración inicial 1: 10 mg PAA/L; PAA bajo
- Concentración inicial 2: 20 mg PAA/L; PAA medio
- Concentración inicial 3: 30 mg PAA/L; PAA alto

Se consideraron los siguientes gastos para controlar la Dosis (UV):

- Flujo 1: 0.35 L/s; UV bajo
- Flujo 2: 0.50 L/s; UV medio
- Flujo 3: 0.65 L/s; UV alto

La combinación de estos factores produce 9 condiciones experimentales (Tabla 4-8).

Tabla 4-8 Condiciones experimentales en la prueba combinada PAA-UV

Condición	Dosis inicial de ácido peracético	Tiempo de exposición a la radiación UV
1	baja	alto
2	media	alto
3	alta	alto
4	baja	medio
5	media	medio
6	alta	medio
7	baja	bajo
8	media	bajo
9	alta	bajo

La cantidad de solución de PAA que se aplicó al efluente del sedimentador de la planta piloto se definía de acuerdo con la fuerza de la solución valorada diariamente con el método descrito en la sección 4.2.1, controlando el flujo de descarga de la

bomba dosificadora de desinfección. La cantidad aplicada se determinó de acuerdo con los resultados de la prueba de la determinación del efecto del PAA en planta (sección 4.4).

La dosis (UV) se controló con el flujo de la bomba de alimentación a la unidad de desinfección con radiación ultravioleta.

Para cada muestra, se reporta el flujo de operación de la planta, la fuerza de la solución de PAA aplicada, el gasto de la bomba dosificadora y el gasto de la bomba de descarga a la unidad de desinfección. También se tiene el registro de la cantidad de sulfato de aluminio y polielectrolito que se utilizaron.

El orden en que se aplicaron las concentraciones de PAA y los tiempos de exposición a la radiación UV fueron aleatorios. En la Tabla 4-9 se muestra el programa de muestreo seguido.

Se tomaron muestras antes y después del paso por la lámpara de UV para determinar la eficiencia de desinfección de este tratamiento combinado. Después de transcurrido el tiempo de contacto especificado (10 minutos), se realizaron las determinaciones de calidad del agua indicadas en la Tabla 4-10.

Al igual que en las pruebas anteriores en planta, una alícuota de la muestra desinfectada (muestra activada) era destinada para analizar el PAA residual por el método colorimétrico descrito en la sección 4.2.2. Al resto de la muestra de agua desinfectada obtenida se le aplicó tiosulfato de sodio y catalasa para detener la acción germicida de los agentes químicos aplicados (muestra desactivada).

Los análisis bacteriológicos de las muestras se realizaron por triplicado. Los análisis de calidad fisicoquímica del agua se hicieron por duplicado

Tabla 4-9 Programa de muestreo en la prueba combinada PAA-UV en planta

Muestra	Condición	mg/L de PAA	Q (L/s)	Muestra	Condición	mg/L de PAA	Q (L/s)
1	6	30	0.50	15	2	20	0.35
2	3	30	0.35	16	9	30	0.65
3	8	20	0.65	17	5	20	0.50
4	4	10	0.50	18	7	10	0.65
5	1	10	0.35	19	6	30	0.50
6	2	20	0.35	20	3	30	0.35
7	9	30	0.65	21	8	20	0.65
8	5	20	0.50	22	4	10	0.50
9	7	10	0.65	23	1	10	0.35
10	6	30	0.50	24	2	20	0.35
11	3	30	0.35	25	9	30	0.65
12	8	20	0.65	26	5	20	0.50
13	4	10	0.50	27	7	10	0.65
14	1	10	0.35				

Tabla 4-10 Calidad del agua a determinar en la prueba combinada PAA-UV en planta

Parámetro	Agua cruda	Agua desinfectada	
		activada	desactivada
pH	✓		✓
Conductividad eléctrica	✓		✓
Temperatura	✓		✓
Turbiedad	✓		✓
SST	✓		
DQO	✓		
Coliformes totales	✓		✓
PAA residual		✓	

Eficiencia de desinfección

La eficiencia de desinfección se determinó mediante la relación entre la concentración resultante de coliformes totales después de adicionar el PAA y desinfectar con radiación UV, una vez transcurrido el tiempo de contacto de 10 minutos, (N_{PAA-UV}), dividido entre la concentración inicial del agua a desinfectar (N_o):

Ec. 4-12
$$\eta_{\text{desinfección PAA-UV}} = \frac{N_{PAA-UV}}{N_o}$$

5 Resultados

La experimentación de este proyecto se llevó a cabo en dos fases: la fase preliminar se realizó en el laboratorio de Calidad del Agua y Residuos; y la fase definitiva en la planta piloto de tratamiento de aguas residuales de la UAM Azcapotzalco.

El procesamiento de los resultados se hizo utilizando el paquete estadístico Statgraphics Plus[®], el paquete para ajuste de curvas CurveExpert 1.3[®], y las utilerías de la hoja de cálculo Excel[®].

5.1 Experimentación preliminar

La experimentación preliminar tenía por objeto el aproximarse al desempeño de los agentes desinfectantes con el agua proveniente del sedimentador primario de la planta piloto y determinar el orden de magnitud de la efectividad de estos agentes para realizar las pruebas en continuo.

Asimismo, esta fase sirvió para practicar y afinar algunas de las técnicas analíticas que serían requeridas posteriormente.

5.1.1 Efecto del PAA. Resultados en laboratorio

Se hicieron corridas preliminares con aplicaciones de ácido peracético en el intervalo de 2 a 6 mg de PAA/L, valores en el orden de magnitud de las que se reportan en la literatura (Chen, *et al.*, 2005; Gehr, *et al.*, 2003; Liberti, *et al.*, 2000).

Estas corridas fueron poco exitosas, obteniéndose efectos mínimos en la desinfección del agua de la planta piloto. Se realizó entonces una prueba exploratoria de la demanda inmediata de PAA, con el fin de estimar el intervalo de aplicación del ácido peracético en el que podrían obtenerse resultados de desinfección observables. La prueba se llevó a cabo de acuerdo al procedimiento descrito en la sección 4.2.3, y las condiciones fueron las siguientes:

- Concentración de ácido peracético: 20 mg/L
- Tiempo de contacto: 45 s

Los resultados se muestran en la Tabla 5-1 y se presentan gráficamente en la Figura 5-1.

Tabla 5-1 Demanda inmediata de PAA en función de la DQO del agua

DQO, mg/L	PAA residual, mg/L
13	13.30
26	10.60
52	8.16
78	6.72
104	4.09
130	2.43

Figura 5-1 Demanda inmediata (45 s) de PAA en función de la DQO del agua

Se realizaron pruebas adicionales para observar el comportamiento del residual de ácido peracético respecto al tiempo. Éstas se llevaron a cabo aplicando las concentraciones iniciales que serían utilizadas en la experimentación en planta piloto:

10, 20 y 30 mg/L. En todos los casos se aproximó la curva a un modelo recíproco, de la forma indicada en la Ec. 5-1, que representa adecuadamente el comportamiento de los resultados obtenidos en el laboratorio.

Ec. 5-1
$$C_t = \frac{1}{a \cdot t + b}$$

Donde:

C_t , Concentración de PAA residual al tiempo t , mg/L

t , tiempo de contacto, min

a, b , coeficientes de regresión

Los resultados se presentan en la Figura 5-2, Figura 5-3 y Figura 5-4, que corresponden a las concentraciones iniciales de 10, 20 y 30 mg/L, respectivamente. Los coeficientes de regresión, de correlación y el error estándar de los ajustes de curva realizados se presentan en la Tabla 5-2, y en la Figura 5-5 se comparan las tres curvas obtenidas.

Tabla 5-2 Modelos de regresión para el PAA residual

Parámetro	Co, mg/L		
	10	20	30
a	3.78	2.06	0.161
b	0.10	0.05	0.033
R ²	0.999	0.999	0.986
Error estándar	0.115	0.110	1.064

Puede observarse que la curva ajustada para una concentración de 30 mg PAA/L es la que presenta la menor correlación y el mayor error estándar lo que se refleja gráficamente en la Figura 5-4 al representar los valores del PAA residual en escala logarítmica.

Figura 5-2 PAA residual en función del tiempo, Co = 10 mg/L

Figura 5-3 PAA residual en función del tiempo, Co = 20 mg/L

Figura 5-4 PAA residual en función del tiempo, $C_o = 30 \text{ mg/L}$

El área bajo cada una de las curvas⁷ de la Figura 5-5 representa la cantidad de ácido peracético residual durante el tiempo de contacto, e indica el tiempo en que se le permitió al agente desinfectante ejercer su acción germicida. En la experimentación en la planta piloto se decidió fijar el tiempo en 10 minutos. El producto del tiempo de contacto por el residual del ácido peracético ($C_t \cdot t$, expresado en $\text{mg PAA} \cdot \text{min/L}$) será utilizado para reportar la eficiencia de desinfección por este agente (Tabla 5-3).

Tabla 5-3 Producto PAA residual por tiempo de contacto

$C_o, \text{ mg/L}$	10	20	30
$C_t \cdot t, \text{ mg PAA} \cdot \text{min/L}$	1.568	2.262	24.15

Cabe destacar que el valor de $24.15 \text{ mg PAA} \cdot \text{min/L}$ para el producto $C_t \cdot t$, en la prueba con una concentración inicial de 30 mg PAA/L refleja el hecho de que durante los primeros minutos queda todavía una cantidad importante de ácido peracético por reaccionar, concentración que disminuye sensiblemente conforme avanza el tiempo.

⁷ Las áreas bajo las curvas fueron obtenidas por el método de integración.

Figura 5-5 Comparación de curvas de PAA residual en función del tiempo

Finalmente, se realizó un análisis normalizando los resultados del residual del ácido peracético (PAA residual entre Dosis de PAA aplicada, C/C_0). En la Tabla 5-4 se muestran los resultados promedio normalizados de las pruebas realizadas, mientras que el resto de la información se presenta en el anexo 8.4.1.

La información fue procesada para obtener una curva que reflejara el comportamiento promedio normalizado, la que se muestra en la Ec. 5-2, y se presenta en forma gráfica en la Figura 5-6. El coeficiente de correlación fue de 0.999 y el error estándar calculado fue de 6.85×10^{-4} .

Ec. 5-2

$$\frac{C_t}{C_o} = \frac{1 + 24.17 t}{1 + 376.51 t + 9.62 t^2}$$

Donde:

C_t , Concentración de PAA residual al tiempo t , mg/L

C_o , Concentración de PAA aplicado al tiempo $t = 0$, mg/L

t , tiempo de contacto, min

Tabla 5-4 Resultados normalizados de la prueba de comportamiento del PAA residual

Tiempo, min	C/C _o	Tiempo, min	C/C _o
0.0	1.000	9.0	0.051 ± 4.65E-03
1.5	0.063 ± 4.14E-03	10.5	0.051 ± 4.99E-03
3.0	0.061 ± 5.86E-03	12.0	0.049 ± 5.02E-03
4.5	0.059 ± 4.98E-03	13.5	0.048 ± 5.21E-03
6.0	0.056 ± 4.96E-03	15.0	0.047 ± 5.34E-03
7.5	0.054 ± 5.34E-03

Figura 5-6 Comportamiento del PAA residual en función del tiempo

Es importante observar que la variación del PAA residual es mínima después de 1 minuto, por lo que el PAA residual puede medirse y reportarse a este tiempo.

Finalmente se realizó la prueba preliminar del efecto desinfectante del ácido peracético y el tiempo de contacto de acuerdo a lo descrito en la sección 4.2.4. En la Tabla 5-5 se reportan los resultados de coliformes totales remanentes después del tiempo de contacto establecido.

Tabla 5-5 Coliformes totales, UFC/100 mL. Prueba en laboratorio del efecto del PAA

Tiempo de contacto, min	Concentración PAA, mg/L		
	10	15	20
1.5	3.55E+07	3.20E+07	2.83E+07
3.0	3.40E+07	2.37E+07	1.17E+07
4.5	2.90E+07	2.33E+06	7.30E+06
6.0	3.50E+07	8.00E+06	7.72E+05
7.5	1.60E+07	7.00E+06	1.00E+04

La eficiencia de desinfección del ácido peracético se presenta en la Tabla 5-6 considerando que la densidad inicial de coliformes totales en el agua sedimentada era de 5.07×10^7 UFC/100 mL. La Figura 5-7 presenta las tendencias determinadas en esta prueba. En el anexo 8.4.1 se presenta el complemento de los resultados de los análisis de laboratorio de esta prueba.

Tabla 5-6 Eficiencia de desinfección, $-\log(N/N_0)$. Prueba en laboratorio del efecto del PAA

Tiempo de contacto, min	Concentración PAA, mg/L		
	10	15	20
1.5	0.1545	0.1996	0.2524
3.0	0.1732	0.3306	0.6353
4.5	0.2423	1.336★	0.8414
6.0	0.1607★	0.8017	1.8173
7.5	0.5006	0.8597	3.7048
★ Valores excluidos para estimar las tendencias mostradas en la Figura 5-7

Figura 5-7 Eficiencia de desinfección PAA. Prueba en laboratorio

5.1.2 Efecto de la UV. Resultados en laboratorio

Se realizaron diferentes pruebas de inactivación de coliformes totales en laboratorio (Tabla 5-7) siguiendo la metodología descrita en la sección 4.3.

Tabla 5-7 Calidad bacteriológica del agua en prueba UV en laboratorio

Prueba 31/5/7			prueba 5/7/7		
Fluencia, mJ/cm ²	N, UFC/100 mL	-log N/No	Fluencia, mJ/cm ²	N, UFC/100 mL	-log N/No
0	6.00E+06	0.000	0	4.11E+06	0.000
5	1.20E+06	0.699	5	1.30E+05	1.500
10	4.78E+05	1.099	10	2.18E+04	2.277
15	2.65E+04	2.355	15	1.09E+04	2.579
20	4.65E+03	3.111	20	4.45E+03	2.966
25	3.38E+03	3.250	25	2.50E+03	3.216
30	8.30E+03	2.859	30	1.09E+03	3.579

Los resultados de las pruebas realizadas se pueden observar en la Figura 5-8. La Tabla 5-8 presenta los resultados de obtenidos para los coeficientes de regresión ajustado al modelo logístico, así como el coeficiente de correlación y el error estándar para cada prueba.

Tabla 5-8 Coeficientes de regresión para las curvas CB

Prueba	1	2
Transmitancia UV, %	28	41
No, UFC CT/100 mL	6.0×10^6	3.8×10^6
a	0.253	5.731
b	-0.984	-0.622
c	5.4×10^{-4}	3.6×10^{-2}
Coeficiente de correlación	0.958	0.997
Error estándar	1.045	0.258

Se determinó también el grado de inactivación ($-\log(N/N_0)$) obtenido en las pruebas, dividiendo la concentración de microorganismos remanentes entre la concentración inicial, para cada una de las fluencias UV utilizadas durante la prueba. La Tabla 5-9 presenta los resultados del análisis de varianza del modelo de regresión de los datos de la prueba con el aparato de luz colimada. El coeficiente de correlación resultante fue de 0.9697. Dado que el valor p de la tabla ANOVA es menor a 0.01, existe una relación estadísticamente significativa al 99% de nivel de confianza, entre la fluencia germicida promedio aplicada y la inactivación de coliformes totales. Asimismo, el coeficiente de correlación indica una relación moderadamente fuerte entre las variables.

Tabla 5-9 Análisis de varianza del modelo de regresión prueba UV laboratorio

	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrada	F	p
Modelo	17.38	1	17.38	173.51	$< 10^{-4}$
Residual	1.10	11	0.10		
Total	18.48	12

Figura 5-8 Curvas CB. Pruebas en laboratorio

La Ec. 5-3 describe la curva que presentó el mejor ajuste a los datos de inactivación, misma que se presenta en forma gráfica en la Figura 5-9. Cabe indicar que se eliminó el dato identificado con "X" en la gráfica, lo que mejoró sensiblemente el ajuste de la

curva. Asimismo, en esta misma Figura 5-9, las curvas segmentadas representan los límites de confianza, y las líneas punteadas marcan los límites de predicción. Esta ecuación se utilizará en las siguientes secciones para determinar la fluencia equivalente a la que los microorganismos fueron expuestos en las pruebas de desinfección realizadas en planta piloto.

$$\text{Ec. 5-3} \quad -\log\left(\frac{N}{N_o}\right) = -0.0488 + 0.641\sqrt{H'}$$

Donde:

$-\log(N/N_o)$, inactivación de microorganismos

N , Concentración final de microorganismos, UFC/100 mL

N_o , Concentración inicial de microorganismos, UFC/100 mL

H' , fluencia germicida promedio, mJ/cm^2

Figura 5-9 Eficiencia promedio de desinfección UV. Pruebas en laboratorio

5.2 Experimentación en planta piloto

Se realizaron tres experimentos de inactivación de coliformes totales en la planta piloto de aguas residuales de la UAM Azcapotzalco. Los dos primeros se orientaron a definir el efecto desinfectante de cada uno de los agentes que se probaron en este proyecto: ácido peracético y radiación ultravioleta. El último experimento se realizó para determinar el efecto de la aplicación combinada de ambos agentes desinfectantes.

5.2.1 Calidad del agua a desinfectar

Para caracterizar el efluente del sedimentador primario, se tomaron mediciones de los siguientes parámetros que definen y describen el agua producida en la planta piloto:

- Turbiedad
- Sólidos suspendidos totales (SST)
- Conductividad eléctrica (CE)
- Demanda química de oxígeno (DQO)
- pH
- Transmitancia UV (T)

La Tabla 5-10 presenta los valores medios obtenidos en la caracterización y el intervalo en que la media puede obtenerse para un 95% de confianza. En la sección 8.4.6 se amplía la información sobre la caracterización realizada.

Tabla 5-10 Resumen de la calidad del agua del efluente del sedimentador primario

Parámetro	Valor medio
Turbiedad, UT	17.49 ± 1.07
SST, mg/L	11.63 ± 0.88
Conductividad eléctrica, $\mu\text{mho/cm}$	$1,426.7 \pm 15.8$
pH, unidades	6.69 ± 0.04
DQO, mg/L	154.6 ± 6.04
Transmitancia, %	23.38 ± 0.66

5.2.2 Efecto del PAA. Resultados en planta piloto

Se diseñó un experimento por bloques completamente al azar, con 5 tratamientos (dosis iniciales de PAA) y 3 réplicas, para determinar la eficiencia de desinfección de coliformes totales (variable respuesta). El tiempo de contacto de la prueba se fijó en 10 minutos, y la prueba se realizó como se indica en la sección 4.4.

El producto $C_t \cdot t$ se obtuvo como se indica en la sección 5.1.1, y se reporta en la Tabla 5-11. En la Figura 5-10 se presenta el diagrama de dispersión de la inactivación de coliformes totales lograda después de 10 minutos y a los que se les había adicionado ácido peracético resultando las concentraciones de PAA residuales descritas en la Tabla 5-12.

Tabla 5-11 PAA residual en las pruebas de desinfección con PAA en planta piloto

C_o , mg PAA/L	$C_t \cdot t$, mg PAA residual $\cdot$ min/L
10	1.57
15	1.67
20	2.26
25	4.40
30	24.15

Tabla 5-12 Diseño de experimentos PAA en planta

Factor	Bloque: Muestreo		
$C_t \cdot t$, mg PAA residual $\cdot$ min/L	1	2	3
1.57	Y_{11}	Y_{21}	Y_{31}
1.67	Y_{12}	Y_{22}	Y_{32}
2.26	Y_{13}	Y_{23}	Y_{33}
4.40	Y_{14}	Y_{24}	Y_{34}
24.15	Y_{15}	Y_{25}	Y_{35}
Donde: Y_{ij} = tratamiento i,j i = bloque j = Agente químico aplicado			

Se realizó el análisis de varianza de los datos observándose que existe una diferencia significativa entre las medias al 95% de confianza.

Tabla 5-13 Análisis de varianza del experimento con PAA en planta

	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrada	F	p
Entre grupos	70.6397	4	17.6599	20.11	0.0001
Al interior	8.7831	10	0.8783		
Total	79.4228	14			

También se realizó el análisis de contrastes, observándose que cuando el producto PAA residual por tiempo de contacto presentaba valores hasta 2.26 mg·min/L no se presentan diferencias significativas. Sin embargo, cuando los productos $C_t \cdot t$ presentaron valores de 4.40 y 24.15 mg·min/L sí resultó una diferencia significativa respecto a las condiciones en donde éste producto era menor a 2.26 mg·min/L.

La Figura 5-11 presenta los diagramas de caja para los datos de inactivación de coliformes totales por la aplicación de ácido peracético. En estos diagramas se observa, de una manera conjunta, la comparación de medias de los tratamientos y el grado de dispersión de los mismos. En el anexo 8.4.2 se presentan los datos estadísticos de las pruebas realizadas.

Figura 5-10 Diagrama de dispersión de la inactivación con PAA. Prueba en planta piloto

Figura 5-11 Diagrama de caja, efecto PAA, prueba en planta piloto

5.2.3 Efecto de la UV. Resultados en planta

Con el fin de exponer a los microorganismos presentes en el agua a desinfectar a diferentes fluencias UV y, de esta forma, establecer el efecto de este agente desinfectante, es necesario correlacionar este factor con algún parámetro de operación que pueda controlarse en la planta piloto. Dado que la fuente de emisión de radiaciones UV es la misma para todas las corridas, se decidió variar el tiempo de contacto y, por lo tanto, se asumió que la fluencia UV sería función del flujo de operación. Esta aseveración no es completamente cierta, puesto que, como lo menciona Gehr (2007), la fluencia UV también depende de la calidad del agua a desinfectar (efecto del tipo y tamaño de partículas, así como de la Transmitancia UV); del comportamiento hidrodinámico dentro del reactor de desinfección; y de la cantidad inicial de microorganismos presentes en el momento de la prueba.

Para determinar el efecto de la radiación UV, se consideraron los datos generados en la prueba del efecto combinado ácido peracético-radiación UV, necesarios para poder identificar la fluencia promedio recibida en cada condición de operación. Los gastos de operación de la planta de tratamiento variaron en el intervalo de 0.35 a 0.65 L/s (21 a 39 L/min) durante la realización de estas pruebas. La fluencia resultante se calculó aplicando la Ec. 5-3 a partir de la inactivación de coliformes totales. La Tabla 5-14 presenta los resultados obtenidos.

Tabla 5-14 Fluencia recibida por los microorganismos. Pruebas en planta piloto

Q, L/min	No, UFC CT/100 mL	N, UFC CT/100 mL	-log(N/No)	Fluencia, mJ/cm ²
21	6.42E+06	6.50E+04	1.994	10.16
21	6.42E+06	4.00E+04	2.205	12.37
21	6.42E+06	4.50E+04	2.154	11.81
21	5.85E+07	6.70E+05	1.941	9.64
21	5.85E+07	3.50E+05	2.223	12.56
21	5.85E+07	3.10E+05	2.276	13.15
21	5.83E+06	6.50E+04	1.953	9.75
21	5.83E+06	1.30E+04	2.652	17.75
21	5.83E+06	8.75E+03	2.824	20.08
30	6.42E+06	2.23E+05	1.460	5.54
30	6.42E+06	1.50E+05	1.631	6.87
30	5.85E+07	1.60E+06	1.563	6.32
30	5.85E+07	8.60E+05	1.833	8.62
30	5.85E+07	4.85E+05	2.081	11.04
30	5.83E+06	2.50E+05	1.368	4.89
30	5.83E+06	1.85E+05	1.499	5.83
30	5.83E+06	9.50E+04	1.788	8.21
39	6.42E+06	3.85E+05	1.222	3.93
39	6.42E+06	1.05E+05	1.786	8.19
39	6.42E+06	1.68E+05	1.583	6.48
39	5.83E+06	2.65E+05	1.343	4.71
39	5.83E+06	2.20E+05	1.423	5.28
39	5.83E+06	1.33E+05	1.644	6.97

La información fue procesada estadísticamente, agrupando los resultados en función del gasto de operación de la planta piloto. La Figura 5-12 presenta el diagrama de caja, donde también se ilustran dos valores estadísticos extremos (*"statistical outliers"*), mientras que la Figura 5-13 muestra la comparación de medias. La dispersión que se observa en los datos con el gasto de 21 L/min se debe a que el resultado de la Ec. 5-3 es muy sensible a pequeños cambios en la inactivación (-log(N/No)) para valores superiores a 2. La Tabla 5-15 presenta los valores de la fluencia UV promedio.

Tabla 5-15 Fluencia UV promedio. Prueba en planta piloto

Gasto, L/min	Fluencia UV promedio, mJ/cm ²
21	13.03 ± 1.205
30	7.165 ± 0.715
39	5.923 ± 0.643

Figura 5-12 Diagrama de caja para la Fluencia UV. Prueba en planta piloto

Figura 5-13 Comparación de medias de la fluencia UV. Prueba en planta piloto

Se realizó el análisis de varianza de la inactivación de coliformes totales respecto a la fluencia UV promedio (Tabla 5-16) observándose que existe una diferencia significativa entre las medias al 95% de confianza.

Tabla 5-16 Análisis de varianza de la inactivación de CT respecto a la fluencia UV

	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrada	F	p
Entre grupos	2.463	2	1.231	18.18	$< 10^{-4}$
Al interior	1.355	20	0.068		
Total	3.818	22			

Del análisis de contrastes, se puede observar que se presentan diferencias estadísticamente significativas para la fluencia promedio de 13.03 mJ/cm² respecto a las otras dos condiciones, lo que se puede observar gráficamente en la Figura 5-14.

Figura 5-14 Diagrama de caja para Inactivación de Coliformes Totales. Prueba en planta piloto

5.2.4 Efecto combinado del PAA-UV. Prueba en planta

Finalmente se realizó una prueba para determinar el efecto combinado de ambos agentes desinfectantes, aplicando primero el ácido peracético e, inmediatamente después pasando el agua a la desinfección con Luz UV. Se dio un tiempo de contacto de 10 minutos después de que el agua había pasado por la cámara de UV, para permitir que el ácido peracético y los radicales libres que hubieran podido formarse reaccionaran y llevaran a cabo su acción germicida.

Como se indicó anteriormente (Sección 4.6), en este experimento se consideraron las cantidades de PAA a aplicar y los gastos de operación de la planta piloto mostrados en la Tabla 5-17. La combinación de estos factores produce 9 condiciones experimentales (Tabla 5-18).

Tabla 5-17 Factores considerados en la prueba combinada PAA-UV

Concentración inicial de PAA	Flujo de operación Planta Piloto
Concentración 1: 10 mg PAA/L; PAA bajo	Flujo 1: 0.35 L/s; UV alto
Concentración 2: 20 mg PAA/L; PAA medio	Flujo 2: 0.50 L/s; UV medio
Concentración 3: 30 mg PAA/L; PAA alto	Flujo 3: 0.65 L/s; UV bajo

Tabla 5-18 Condiciones experimentales en la prueba combinada PAA-UV

		Efecto UV. Factor 2. $f(Q)$		
		bajo	medio	alto
Efecto PAA Factor 1 $f(PAA \text{ inicial})$	bajo	Condición 1	Condición 4	Condición 7
	medio	Condición 2	Condición 5	Condición 8
	alto	Condición 3	Condición 6	Condición 9

Para determinar la fluencia UV a la que estuvieron expuestos los microorganismos en cada tratamiento se tomó una muestra irradiada a las condiciones de flujo de operación establecidas y, posteriormente, se realizó la adición de ácido peracético para poder evaluar el efecto de ambos agentes desinfectantes. Las condiciones experimentales fueron, entonces, las indicadas en la Tabla 5-19.

Tabla 5-19 Condiciones experimentales en la prueba combinada PAA-UV

		Fluencia UV promedio, mJ/cm^2		
		5.93	7.17	13.03
Producto C_{it} , $mg \cdot min/L$	1.568	Condición 1	Condición 4	Condición 7
	2.262	Condición 2	Condición 5	Condición 8
	24.154	Condición 3	Condición 6	Condición 9

La Figura 5-15 muestra el diagrama de dispersión de los resultados de la inactivación agrupados por cantidad de ácido peracético aplicada. De la misma manera la Figura 5-16 presenta el diagrama de dispersión de los resultados de la inactivación agrupados por la exposición a la radiación UV. La aparente dispersión de los resultados que se observa en ambas gráficas se debe a que éstos son diagramas de dispersión agrupados por efecto, aún cuando la información que se utiliza para generarlos incluye el efecto del otro factor desinfectante (en tres niveles).

En la Tabla 5-20 se presenta el análisis de varianza de la inactivación al exponer simultáneamente al agua sedimentada a los dos factores experimentales que se

probaron. Se observa que tres valores de p son menores de 0.05, indicando que éstos son significativos: PAA, UV y PAA·UV.

Figura 5-15 Diagrama de dispersión PAA. Prueba combinada en planta

Figura 5-16 Diagrama de dispersión UV. Prueba combinada en planta

Tabla 5-20 Análisis de varianza de la inactivación. Prueba combinada PAA-UV

Factor	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrada	F	p
A: UV	13.80	1	13.80	39.23	$< 10^{-4}$
B: PAA	12.37	1	12.37	35.16	$< 10^{-4}$
AB	1.58	1	1.58	4.50	0.046
Bloques	0.39	2	0.197	0.56	0.579
Error total	7.39	21	0.352		
Total	32.87	26			

Con los datos experimentales se generó el modelo de superficie de respuesta (presentado en la Figura 5-17), que describe, en un 77.51% el comportamiento observado:

$$-\log\left(\frac{N}{N_o}\right) = -0.515 + 0.15 \cdot A - 4.2 \cdot 10^{-3} \cdot B + 7.5 \cdot 10^{-3} \cdot A \cdot B$$

Donde:

$-\log(N/N_o)$, inactivación de microorganismos

N , Concentración final de microorganismos, UFC/100 mL

N_o , Concentración inicial de microorganismos, UFC/100 mL

A , Fluencia (UV) promedio, mJ/cm^2

B , Factor PAA residual por tiempo de contacto, $\text{mg} \cdot \text{min}/\text{L}$

Figura 5-17 Superficie de respuesta estimada aplicación PAA-UV

Finalmente, en la Figura 5-18, se observan los contornos de la superficie de respuesta.

Figura 5-18 Contornos de la superficie de respuesta estimada aplicación PAA-UV

En la sección 8.4.4 se presenta la calidad del agua a desinfectar en estas pruebas.

6 Discusión de resultados

En este capítulo se comparan y discuten los resultados obtenidos en la fase experimental del proyecto, con los objetivos generales y particulares del estudio.

6.1 Eficiencia de desinfección

Como se indica en la sección 3.3, la norma oficial mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, establece que los coliformes fecales no deben exceder el valor de 240 NMP/100 mL para aguas que se utilizarán en riego de áreas verdes con contacto directo.

El promedio de coliformes totales en el efluente del sedimentador de la planta piloto, durante las pruebas de este proyecto, fue de $2.37 \times 10^7 \pm 1.5 \times 10^7$ UFC/100 mL, para un intervalo de confianza del 95%. En la Tabla 6-1 se presenta el resumen del análisis estadístico realizado de los coliformes totales, el que se presenta en su totalidad en la sección 8.4.5.

Tabla 6-1 Resumen estadístico básico de la calidad bacteriológica del agua sedimentada

Número de datos	16
Promedio	2.37×10^7 UFC/100 mL
Desviación estándar	2.82×10^7 UFC/100 mL
Mínimo	1.25×10^6 UFC/100 mL
Máximo	8.98×10^7 UFC/100 mL

En la planta piloto se ha observado que la fracción de coliformes fecales respecto a los coliformes totales es de aproximadamente 0.5, por lo que el orden de magnitud de la inactivación de coliformes fecales que se debe alcanzar para cumplir con lo establecido por la NOM-003-SEMARNAT-1997, es:

$$\text{Ec. 6-1} \quad -\log\left(\frac{N}{N_o}\right) = -\log\left(\frac{240}{1.19 \cdot 10^7}\right) \geq 4.7 \cong 5$$

Por lo que en este análisis de resultados se contrasta la habilidad de los agentes desinfectantes probados durante la experimentación para alcanzar el número de unidades logarítmicas (logs) de inactivación: 5 logs de reducción, es decir una eficiencia de desinfección superior al 99.999%.

6.1.1 Desinfección con ácido peracético

En la Figura 6-1 se muestra el grado de inactivación promedio que se alcanzó en las pruebas de desinfección con ácido peracético. Puede observarse que se requerían aplicaciones mayores a 25 mg/L, que arrojan un producto C_{t} mayor a 4.40 mg*min/L para alcanzar reducciones superiores a 5 logs de magnitud. El análisis estadístico de estos resultados también indicó que las medias de estos tratamientos, producían resultados con diferencias significativas (sección 5.2.1).

Esta información contrasta con lo reportado por Caretti y Lubello (2003), en donde con una aplicación de 2 hasta 8 mg/L de PAA y con tiempo de contacto de 10 a 30 minutos, alcanzaron reducciones de coliformes totales de 1.48 a 3.99 logs. Cabe mencionar, que el agua desinfectada en ese estudio, provenía de un sistema de tratamiento secundario seguido de filtración, en donde la turbiedad presentó un valor promedio de 1.9 UT, y la materia orgánica mostró un valor promedio de 37 mg DQO /L, es decir una calidad del agua sensiblemente superior a la del efluente del tratamiento primario avanzado de la planta piloto.

Por otro lado, en el estudio realizado por Chen *et al.*, (2005), el agua a desinfectar provenía del tratamiento primario avanzado de la planta de la Ciudad de Montreal, Canadá, con un efluente que variaba dentro del intervalo de 17 a 28 mg SS/L, y respecto al contenido de materia orgánica éste variaba en el intervalo de 67 a 132 mg DQO/L. La cantidad de PAA aplicada fue de 2 a 4 mg/L con un tiempo de contacto de 30 minutos. La inactivación de coliformes fecales reportada varió de 3 a 4 logs.

Figura 6-1 Grado de inactivación logrado por el PAA solamente

Gehr, *et al.*, (2003) reportan el efecto de la calidad del agua y manifiestan la dificultad de desinfección apropiada de los efluentes de sistemas de tratamiento primario avanzado. Por ejemplo, en pruebas adicionando desde 1.5 hasta 6.0 mg PAA/L, a un efluente con una DQO de 123 a 240 mg/L; SS en el intervalo de 16 a 45 mg/L; turbiedad de 16 a 31 UT; y una transmitancia de 4.5 a 29%; solamente se obtuvieron niveles de inactivación de 1 log aproximadamente.

Es evidente el impacto de la calidad del agua, y la demanda inmediata de ácido peracético, en la efectividad de este desinfectante.

6.1.2 Desinfección con radiación ultravioleta

En ninguna de las pruebas realizadas exclusivamente con el equipo de luz ultravioleta se alcanzó el grado de inactivación requerido (Figura 6-2 y sección 5.2.3).

Figura 6-2 Grado de inactivación logrado por la UV solamente

Puede observarse que se detectaron diferencias significativas cuando los microorganismos recibían una fluencia (UV) promedio superior a 7.17 mJ/cm². Chen *et al.*, (2005) reportan de 2 a 3 logs de reducción, utilizando una fluencia de 10 a 20 mJ/cm² resultados que son comparables a los encontrados en este estudio.

En la Figura 6-3 se muestra las curvas de respuesta de los coliformes totales en función de la fluencia (UV) a la que han sido expuestos. Esta curva es típica y coincide con lo reportado por Loge, *et al.*, (2001) y Gehr, *et al.*, (2003). Cada curva corresponde a una concentración inicial de microorganismos coliformes totales.

Figura 6-3 Coliformes totales remanentes después de la desinfección con UV

6.1.3 Desinfección con PAA-UV

En la Figura 6-4 se muestran los resultados promedio de la prueba combinada PAA-UV. Como se mencionó anteriormente, la información estadística de esta prueba se presenta en la sección 8.4.4.

La Figura 6-5 presenta el diagrama de efectos principales sobre la variable respuesta: inactivación. Se observa que en el caso bajo estudio, ambos factores tienen una influencia similar en la inactivación de coliformes totales, variando su impacto de 1.8 a 3.5 logs de reducción. Esto mismo se puede observar en la superficie de respuesta presentada anteriormente (Figura 5-17), donde se observan pendiente de crecimiento similares en ambos factores.

De la Figura 5-18 se puede observar también, que cualquier combinación que produzca una inactivación mayor a 5 logs, cumplirá con la calidad bacteriológica

requerida en la NOM-003-SEMARNAT-1997 para utilizar el agua residual tratada en riego de áreas verdes.

Figura 6-4 Grado de inactivación logrado por la aplicación combinada de PAA-UV

Sólo en las pruebas en donde se aplicaron concentraciones iniciales de 30 mg/L de ácido peracético y un flujo de operación bajo en la planta piloto, lo que resulta en un producto $C_t t = 24.15$ mg·min/L y una fluencia UV promedio de 13.03 mJ/cm², se alcanzaron inactivaciones de coliformes totales del orden de 5 logs, esto se observa claramente en la Figura 6-6, en cambio, en los otros casos no se logró alcanzar la reducción de coliformes totales requerida.

Figura 6-5 Diagrama de efectos principales de la inactivación. Prueba combinada PAA-UV

Figura 6-6 Diagrama de interacción de efectos. Prueba combinada PAA-UV

Chen *et al.*, (2005) reportan de 4 a 5 logs de reducción en el efluente del tratamiento primario avanzado de la planta de la ciudad de Montreal, Canadá, utilizando bajas concentraciones de PAA (2 a 4 mg/L) y una fluencia comparable a lo reportado en este estudio (10 a 20 mJ/cm²).

En contraste, Caretti y Lubello (2003) muestran reducciones hasta de 6 logs de organismos coliformes totales en sus experimentos en donde variaron la cantidad de PAA aplicado entre 0 y 8 mg PAA/L en conjunto con fluencias que variaron de 0 a 300 mJ/cm².

En ambos estudios se demuestra que la aplicación de ácido peracético antes de la unidad de luz ultravioleta es la configuración de operación que produce las mayores tasas de inactivación.

Es evidente que el sistema de desinfección combinado PAA-UV es capaz de alcanzar la inactivación requerida por la NOM-003-SEMARNAT-1997, a partir de agua residual tratada en un sistema de tratamiento primario avanzado. Sin embargo, también es innegable que en la medida en que se mejore la calidad del agua a desinfectar, se tendrá una mayor efectividad en la desinfección con menores dosis de agentes químicos y físicos, aspectos que impactan directamente el costo de esta alternativa de desinfección.

6.2 Efecto sinérgico

En nuestro caso, el efecto sinérgico se entiende como el grado de inactivación alcanzado cuando se utilizan los dos agentes desinfectantes en conjunto, y éste será mayor que la simple suma de los efectos de cada uno de ellos.

Li (2001) (citado por Chen *et al.*, 2005) propone la siguiente expresión para evaluar el efecto sinérgico:

$$\text{Ec. 6-2} \quad \text{Sinergia} = I_r - (I_{r1} + I_{r2})$$

Donde:

I_r , inactivación bruta de los desinfectantes combinados, unidades logarítmicas

I_{r1} , inactivación alcanzada por el primer desinfectante, unidades logarítmicas

I_{r2} , inactivación alcanzada por el segundo desinfectante, unidades logarítmicas

Con esta propuesta, un valor positivo de sinergia, indica efectivamente que la aplicación combinada de los agentes químicos es mejor que la suma de los efectos independientes de cada agente desinfectante.

En la Figura 6-1 se presentaron los datos de inactivación promedio obtenidos por la aplicación de ácido peracético exclusivamente, mientras que en la Figura 6-2 se hizo lo propio con la información de los experimentos con radiación ultravioleta únicamente.

La Figura 6-7 incorpora –suma– los efectos de cada agente desinfectante obtenidos en las pruebas de los efectos por separado, reproduciendo las condiciones que se definieron para el experimento de la aplicación combinada de PAA-UV (ver sección 5.2.4).

En la Figura 6-8 se comparan los resultados de la prueba combinada, respecto a la suma de resultados independientes. De aquí se puede observar que en este trabajo no se encontró evidencia de que hubiera un efecto sinérgico de la aplicación combinada de los agentes desinfectantes.

Esto contrasta con lo reportado por Caretti y Lubello (2003), quienes indican que existe un efecto sinérgico en la aplicación combinada del PAA y la radiación UV. Estos investigadores subrayan que el grado de inactivación alcanzado cuando se utilizan estos dos agentes desinfectantes en conjunto, es mayor que la simple suma de los efectos de cada uno de ellos.

Adicionalmente, Caretti y Lubello (2003) también demostraron que el efecto de inactivación que se logra es mucho mayor cuando se aplica primero el ácido peracético y se expone después la corriente a la luz UV, que cuando se opera en el orden inverso. Esto último también fue confirmado por Chen *et al.*, (2005).

Figura 6-7 Suma de efectos individuales de desinfección

Sin embargo, estos investigadores (Chen *et al.*, 2005), tampoco encontraron evidencia clara de que se tuviera un efecto sinérgico, situación similar a la que aquí se ha encontrado.

Pero por otra parte, también es evidente que en este trabajo hubo repetidas pruebas en donde la aplicación de ambos agentes desinfectantes produjo mejores resultados que el uso de uno sólo de ellos (Tabla 6-2 y Figura 6-9).

Se puede decir entonces que, a dosis bajas de PAA, el efecto del uso de UV es mucho más relevante; mientras que en la condición de altas aplicaciones de PAA, la importancia relativa de la UV disminuye sensiblemente.

Figura 6-8 Comparación de efectos de los agentes desinfectantes utilizados

Tabla 6-2 Inactivación promedio. Todos los tratamientos

Prueba	Efecto UV, mJ/cm²	Efecto PAA, mg·min/L	Inactivación promedio	Error estándar
A	-	1.57	0.415	0.075
B	-	1.67	0.623	0.023
C	-	2.26	1.169	0.488
D	-	4.40	3.858	1.095
E	-	24.15	5.979	0.139
F	5.93	-	1.500	0.085
G	7.17	-	1.653	0.083
H	13.03	-	2.247	0.102
I	5.93	1.57	1.464	0.280
J	5.93	2.26	1.540	0.280
K	5.93	24.15	2.063	0.280
L	7.17	1.57	1.154	0.280
M	7.17	2.26	2.198	0.280
N	7.17	24.15	3.146	0.280
O	13.03	1.57	2.168	0.280
P	13.03	2.26	3.163	0.280
Q	13.03	24.15	4.642	0.280

Es muy posible que la calidad del agua a desinfectar juegue un papel preponderante en el efecto sinérgico, puesto que los estudios de desinfección realizados con efluentes de tratamiento primario avanzado no demuestran tal efecto; mientras que en el estudio de desinfección con efluente de tratamiento secundario más filtración, este efecto sinérgico fue observado con claridad. Pudiera ser también que la materia orgánica, así como el material suspendido presente en el agua a desinfectar, reaccionen instantáneamente con el PAA, y que el tiempo que transcurre entre el punto de aplicación del PAA y la irradiación con UV, disminuya la disponibilidad real del PAA y, por tanto, su posibilidad de activación por la UV como lo resaltan Caretti y Lubello en su artículo (2003).

Figura 6-9 Comparación de eficiencia de inactivación. Todos los tratamientos

7 Síntesis y conclusiones

Las dificultades que se enfrentan para satisfacer las demandas de agua para los diferentes usos que la sociedad requiere, obliga a la continua búsqueda de alternativas para administrar adecuadamente este recurso natural.

En las zonas urbanas con marcada escasez en la disponibilidad del agua, como el caso de la zona metropolitana del Valle de México, el reúso del agua residual tratada es una alternativa siempre atractiva a considerar. Sin embargo, este reúso de las aguas residuales tratadas no está exento de problemas y debe realizarse de manera apropiada, de tal forma que se proteja la salud de los usuarios y el ambiente. Las instancias gubernamentales han realizado su labor normativa estableciendo criterios de calidad para el agua residual tratada que se reúse en servicios al público.

Independientemente del tipo de tratamiento del agua que se realice, es necesario garantizar la calidad microbiológica del agua tratada para todas aquellas actividades en que el uso de esta agua pueda poner en peligro la salud de la población o de los usuarios. Por esto, el proceso de desinfección cobra especial relevancia, puesto que es la última barrera técnica que se tiene para producir un agua residual tratada apta para el reúso que se le destine.

Este trabajo se centró precisamente en el proceso de desinfección, buscando alternativas para eliminar algunos aspectos objetables de la generalizada práctica de desinfección con cloro y sus derivados.

Se plantearon las siguientes restricciones y peculiaridades en este proyecto:

- Desinfectar el efluente de un sistema de tratamiento primario avanzado
- Realizar las pruebas en continuo y en la planta piloto de la UAM Azcapotzalco
- Se utilizaría ácido peracético y luz ultravioleta, de manera separada y en conjunto
- Utilizar un equipo de UV con lámpara de alta intensidad y presión media

Los experimentos realizados permiten concluir que sí es factible alcanzar la calidad bacteriológica definida en la norma oficial mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece que no se debe exceder el valor de 240 NMP/100 mL para aguas que se utilizarán en riego de áreas verdes con contacto directo.

Para las condiciones de esta experimentación, se estima que se pueden obtener reducciones de coliformes totales de 4 logs o mayores, aplicando el proceso combinado PAA-UV, cuando la cantidad inicial de ácido peracético es mayor o igual a 25 mg/L y la fluencia (UV) promedio recibida por los microorganismos es mayor a 12 mJ/cm².

En el caso bajo estudio, la cantidad de ácido peracético aplicado, tuvo una mayor influencia en la inactivación de coliformes totales, variando su impacto de 1 a 5 logs de reducción; mientras que la radiación UV mostró un impacto menos importante ya que al aumentar la fluencia (UV) solamente se observó un incremento de 1.5 a 2.5 logs por este factor. Cabe recalcar que se observó una relación inversa entre el gasto de operación de la planta piloto y la fluencia (UV) resultante.

Se obtuvieron reducciones de coliformes totales mayores a 4.5 logs solamente aplicando 30 mg PAA/L como concentración inicial. Es notorio el impacto de la calidad del agua y el efecto que tiene la demanda inmediata de ácido peracético, en la efectividad del uso de este desinfectante. Esto tendrá que evaluarse con mayor precisión, sobre todo al incorporar la evaluación económica del proceso y el efecto que tiene mejorar la calidad del agua a desinfectar. Esta evaluación deberá contemplar, por un lado, los costos de inversión y operación de unidades complementarias de tratamiento asociadas a la mejora de la calidad del agua a desinfectar y, por otro lado, establecer los posibles ahorros derivados de menores requerimientos de almacenamiento y dosificación de ácido peracético.

En los experimentos en los que se aplicó exclusivamente la radiación UV se obtuvieron reducciones del orden de 2.5 logs cuando la fluencia (UV) aplicada era mayor a 13

mJ/cm². La calidad del agua juega un papel determinante en la efectividad de desinfección con UV. En posteriores investigaciones se deberá buscar cómo mejorar la transmitancia del agua tratada en sistemas de tratamiento primario avanzado, para aumentar la efectividad de este agente desinfectante.

No se encontró evidencia de un efecto sinérgico al aplicar ambos agentes desinfectantes en conjunto, respecto a la suma de los efectos cuando se utilizan por separado.

Es posible que la calidad del agua a desinfectar juegue un papel preponderante en el efecto sinérgico, puesto que este estudio, y los resultados de estudios de desinfección reportados en la literatura técnica realizados con efluentes de tratamiento primario avanzado no demuestran un efecto sinérgico; mientras que en el reporte del estudio de desinfección de efluentes de tratamiento secundario más filtración, este efecto sinérgico fue observado con claridad. Pudiera ser que la materia orgánica y el material suspendido presente en el agua a desinfectar, reaccionen instantáneamente con el PAA, y que el tiempo que transcurre entre el punto de aplicación del PAA y la irradiación con UV, disminuya la disponibilidad real del PAA, y por tanto su posibilidad de activación por la UV como lo resaltan Caretti y Lubello en su artículo (2003).

No era el objeto de este trabajo buscar la mejor combinación de los agentes desinfectantes para alcanzar un determinado nivel de desinfección, sin embargo esta labor es altamente deseable para futuras experimentaciones, en donde se incorpore, además, el efecto de factores tales como:

- La mejora de la calidad del agua
- El costo de operación
- La confiabilidad del proceso
- La definición de mecanismos de medición y control que permitan mejorar, en términos económicos y funcionales, la operación de estos sistemas de desinfección

Otros aspectos relevantes a considerar para futuras experimentaciones, son:

- Evaluar el efecto de estos sistemas de desinfección con otros agentes microbiológicos tales como protozoarios, virus y helmintos
- El efecto de recremento de microorganismos por fotoreparación, "reparación oscura" y regeneración
- Problemas operativos a largo plazo, tales como:
 - La pérdida de capacidad de irradiación por acumulación de residuos en las fundas de cuarzo de las lámparas UV, y
 - El efecto de los agentes desinfectantes químicos para limitar este problema
 - La medición apropiada de la cantidad de agentes desinfectantes usados para garantizar la apropiada desinfección de microorganismos patógenos

El tema desarrollado en este proyecto es totalmente relevante y da pie a una serie de investigaciones posteriores que será necesario ir planteando y desarrollando.

8 Anexos

8.1 Nomenclatura

Símbolo	Descripción	Unidad	Unidad alternativa
A	Número de Avogadro (Ec. 3-6)	fotones/einstein	
A	Absorbancia total (Ec. 4-5)		
a	Coeficiente empírico (Ec. 3-17, Ec. 5-1 y Ec. 4-9)		
α	Coeficiente de absorbancia (Ec. 3-15)	cm^{-1}	
b	Coeficiente empírico (Ec. 3-17, Ec. 5-1 y Ec. 4-9)		
c	Coeficiente empírico (Ec. 3-17 y Ec. 4-9)		
C	Velocidad de la radiación electromagnética en vacío (Ec. 3-6)	nm/s	
C	Concentración del desinfectante al tiempo t (Ec. 3-10)	mg/L	
C_0	Concentración inicial del desinfectante al tiempo $t = 0$ (Ec. 3-11, Ec. 3-13 y Ec. 5-2)	mg/L	
C_t	Concentración de PAA residual al tiempo t (Ec. 5-1 y Ec. 5-2)	mg/L	
E	Coeficiente de dispersión longitudinal (Ec. 3-17)	cm^2/s	
E'_{avg}	Tasa de "fluencia" germicida promedio (Ec. 4-7 y Ec. 4-8)	W/m^2	mW/cm^2
E_λ	Energía radiante asociada con determinada longitud de onda	kcal/einstein	
E_0	Irradiación en el centro del tubo de luz colimada (Ec. 4-7)	W/m^2	mW/cm^2
F_a	Factor de calidad del agua (Ec. 4-5, Ec. 4-7 y)		
F_D	Factor de divergencia (Ec. 4-6 y Ec. 4-7)		
F_P	Factor Petri (Ec. 4-4 y Ec. 4-7)		
F_R	Factor de reflectancia (Ec. 4-7)		
h	Constante de Planck (Ec. 3-6)	$\text{kcal}\cdot\text{s}$	
H	Profundidad del líquido (Ec. 3-15)	cm	
H'	Fluencia (UV) germicida promedio (Ec. 4-8, Ec. 4-9)	J/m^2	mJ/cm^2
$\bar{I}$	Intensidad de radiación promedio (Ec. 3-14 y Ec. 3-15)	mW/cm^2	
I_{avg}	Intensidad UV promedio espacial	mW/cm^2	

Símbolo	Descripción	Unidad	Unidad alternativa
	dentro de la zona de irradiación (Ec. 3-17)		
I_c	Irradiación en el centro del rayo de luz colimada (Ec. 4-4)	mW/cm ²	
I_i	Irradiación del rayo de luz colimada en el punto i (Ec. 4-4)	mW/cm ²	
I_o	Intensidad de radiación incidente (Ec. 3-15)	mW/cm ²	
I_r	Inactivación bruta de los desinfectantes combinados (Ec. 6-2)	unidades logarítmicas	
I_{r1}	inactivación alcanzada por el primer desinfectante (Ec. 6-2)	unidades logarítmicas	
I_{r2}	Inactivación alcanzada por el segundo desinfectante (Ec. 6-2)	unidades logarítmicas	
$I(t)$	Función de intensidad dependiente del tiempo (Ec. 3-16)	mW/cm ²	
k	Tasa de remoción (Ec. 3-8)	s ⁻¹	d ⁻¹
k	Tasa de remoción (Ec. 3-9)	d ⁻¹	
k	Constante de la ley de la tasa de inactivación (Ec. 3-10 y Ec. 3-13)		
k	Constante de inactivación de primer orden (Ec. 3-14)	cm ² /mW·s	
k'	Constante (base e) de primer orden de la tasa de desaparición del desinfectante (Ec. 3-11, Ec. 3-12 y Ec. 3-13)	min ⁻¹	
L	Distancia del centro de la lámpara a la superficie del agua (Ec. 4-6)	cm	
l	Espesor de la muestra (Ec. 4-6)	cm	
λ	Longitud de onda de la energía radiante (Ec. 3-6)	nm	
m	Constante para la ley de generalizada de la tasa de inactivación (Ec. 3-10, Ec. 3-11 y Ec. 3-12)		
m	Coeficiente empírico (Ec. 3-17)		
N	Concentración de microorganismos al tiempo t (Ec. 3-8 y Ec. 3-9)	Organismos/L	
N	Concentración de organismos viables (Ec. 3-14)	Organismos/L	
N	Densidad de microorganismos después de la irradiación (Ec. 3-17)	UFC/100 mL	
n	Constante para la ley de la tasa de inactivación (Ec. 3-10 y Ec. 3-13)		
n	Número total de puntos medidos (Ec. 4-4)		
η	Factor de eficiencia (Ec. 3-11 y Ec. 3-12)		
$\eta_{\text{desinfección PAA}}$	Eficiencia de desinfección con ácido peracético (Ec. 4-3 y Ec. 4-10)		

Símbolo	Descripción	Unidad	Unidad alternativa
$\eta_{\text{desinfección PAA-UV}}$	Eficiencia de desinfección combinada PAA-UV (Ec. 4-12)		
$\eta_{\text{desinfección UV}}$	Eficiencia de desinfección por radiación UV (Ec. 4-11)		
N_o	Concentración inicial de microorganismos (Ec. 3-8 y Ec. 3-9)	Organismos/L	
N_o	Densidad de microorganismos antes de la irradiación (Ec. 3-17)	UFC/100 mL	
N_o	Densidad de microorganismos antes de la desinfección (Ec. 4-3, Ec. 4-10, Ec. 4-11 y Ec. 4-12)	UFC/100 mL	
N_{PAA}	Concentración de microorganismos después de realizar la desinfección con ácido peracético (Ec. 4-3 y Ec. 4-10)	UFC/100 mL	
$N_{\text{PAA-UV}}$	Concentración de microorganismos después de realizar la desinfección combinada con ácido peracético y radiación UV (Ec. 4-12)	UFC/100 mL	
N_{UV}	Concentración de microorganismos después de realizar la desinfección con radiación UV (Ec. 4-11)	UFC/100 mL	
SS	Concentración de sólidos suspendidos en el efluente (Ec. 3-17)	mg/L	
T	Tiempo total de contacto (Ec. 3-11 , Ec. 3-12 y Ec. 3-13)	min	
t	Tiempo transcurrido (Ec. 3-8)	s	d
t	Tiempo transcurrido (Ec. 5-1 y Ec. 5-2)	min	
t	Tiempo de exposición a la luz colimada (Ec. 4-8)	s	
t_d	Tiempo de retención hidráulico en el cuerpo de agua basado en su descarga (Ec. 3-9)	s	d
τ	Tiempo de exposición (Ec. 3-16)	s	
u	Velocidad del agua residual (Ec. 3-17)	cm/s	
x	Longitud de la zona de irradiación en la dirección del flujo (Ec. 3-17)	cm	

8.2 Características físicas y químicas del Ácido Peracético

Las características físicas y químicas del ácido peracético son (Parger, 1998):

Clasificación CAS ⁸	79-21-0
Otros nombres	peróxido acético acetil hidroperóxido desoxon 1 esosteril ácido etanoperóxico mezcla ácida de peróxido de hidrógeno y peroxiacético
Fórmula	C ₂ H ₄ O ₃
Peso molecular	76.06
Color y forma	Líquido incoloro (menos de 40%)
Olor	Acre, picante
Densidad	1.226 @ 15°C
Viscosidad	3.28 cP @ 78°F
Punto de ebullición	105°C
Punto de fusión	0.1°C
Constante de disociación	pK _a = 8.20 @ 25°C
Temperatura de auto ignición	200°C (ácido peracético menos de 40%)
Límite y potencial explosivo	explota a 110°C
Riesgo de explosión	severo cuando se expone a calor o por reacción química espontánea
Solubilidad	Muy soluble en agua, éter, ácido sulfúrico; soluble en etanol
Presión de vapor	14.5 mm Hg @ 25°C
Coef. partición Octanol/agua	log K _{ow} = -0.924 (est).
Corrosividad	Corrosivo a la mayoría de los metales, incluyendo el aluminio

⁸ CAS: Chemical Abstract Service. American Chemical Society.

8.3 Anexo Fotográfico

Fotografía 8-1 Valoración de PAA en laboratorio

Fotografía 8-2 Determinación del PAA residual

Fotografía 8-3 Prueba de demanda inmediata de PAA

Fotografía 8-4 Equipo de luz colimada

Fotografía 8-5 Determinación del factor Petri del equipo de luz colimada

Fotografía 8-6 Prueba de irradiación UV en laboratorio

Fotografía 8-7 Unidad de desinfección PAA-UV en planta piloto

Fotografía 8-8 Control UV y unidad de microfiltración en planta piloto

Fotografía 8-9 Bomba dosificadora de desinfectante

Fotografía 8-10 Unidad de medición de agua a desinfectar en planta piloto

Fotografía 8-11

Toma de muestra antes de desinfectar. Pruebas en planta piloto

Fotografía 8-12

Detalle de toma de muestra antes de desinfectar

Fotografía 8-13 Toma de muestra después de desinfección. Pruebas en planta piloto

Fotografía 8-14 Detalle de Toma de muestra después de desinfección

8.4 Anexo de resultados

8.4.1 Efecto PAA. Prueba en laboratorio

Tabla 8-1 Resultados del comportamiento del PAA residual respecto al tiempo

t, min	PAA residual, mg/L		
0.0	20.000	30.000	30.000
1.5	1.106	1.915	2.088
3.0	1.011	1.842	2.125
4.5	0.988	1.840	1.985
6.0	0.928	1.758	1.889
7.5	0.883	1.650	1.876
9.0	0.852	1.592	1.754
10.5	0.830	1.566	1.757
12.0	0.793	1.519	1.705
13.5	0.766	1.504	1.679
15.0	0.736	1.536	1.621

Figura 8-1 PAA residual normalizado

Tabla 8-2 **Calidad del agua sedimentada. Efecto PAA prueba en laboratorio**

Parámetro	
pH, unidades	7.35
C. E., $\mu\text{mho/cm}$	1791
Temperatura, $^{\circ}\text{C}$	19
Turbiedad, UT	47
SST, mg/L	37
DQO, mg/L	278
Coliformes totales, UFC/100 mL	5.07E+07

Tabla 8-3 **Calidad del agua desinfectada. Efecto PAA prueba en laboratorio.**

Cantidad PAA, 10 mg/L					
Tiempo, min	1.5	3	4.5	6	7.5
pH, unidades	6.99	7.18	7.12	7.17	7.11
C. E., $\mu\text{mho/cm}$	1911	1916	1915	1904	1931
Turbiedad, UT	65	61	66	68	68
Coliformes totales, UFC/100 mL	3.55E+07	3.40E+07	2.90E+07	3.50E+07	1.60E+07
PAA residual, mg/L	0.3636	0.6477	0.9318	0.5966	0.3068
Cantidad PAA, 15 mg/L					
Tiempo, min	1.5	3	4.5	6	7.5
pH, unidades	7.02	6.96	9.97	7.02	7.03
C. E., $\mu\text{mho/cm}$	1941	1927	1910	1975	1943
Turbiedad, UT	62	52	59	54	56
Coliformes totales, UFC/100 mL	3.20E+07	2.37E+07	2.33E+06	8.00E+06	7.00E+06
PAA residual, mg/L	-0.0341	0.4205	0.4773	1.1591	-0.0909
Cantidad PAA, 20 mg/L					
Tiempo, min	1.5	3	4.5	6	7.5
pH, unidades	6.88	7.05	7.15	7.12	7.17
C. E., $\mu\text{mho/cm}$	1950	1946	1949	1938	1923
Turbiedad, UT	39	46	53	45	71
Coliformes totales, UFC/100 mL	2.83E+07	1.17E+07	7.30E+06	7.72E+05	1.00E+04
PAA residual, mg/L	-0.0909	0.8750	1.6136	1.6136	-0.0909

8.4.2 Efecto UV. Prueba en planta

Tabla 8-4 Estadística descriptiva de la inactivación causada por UV en planta piloto

Fluencia promedio, mJ/cm ²	Cuenta	Promedio	Mediana	Media Geométrica	Varianza
5.93	6	1.500	1.503	1.488	0.043
7.17	8	1.653	1.597	1.639	0.055
13.03	9	2.247	2.205	2.229	0.094
Total	23	1.846	1.788	1.803	0.174
Fluencia promedio, mJ/cm ²	Desviación estándar	Error estándar	Mínimo	Máximo	Intervalo
5.93	0.209	0.085	1.222	1.786	0.564
7.17	0.235	0.083	1.368	2.081	0.713
13.03	0.307	0.102	1.941	2.824	0.883
Total	0.417	0.087	1.222	2.824	1.602
Fluencia promedio, mJ/cm ²	Asimetría	Kurtosis			
5.93	0.033	- 1.138			
7.17	0.772	0.055			
13.03	1.045	0.215			
Total	0.673	0.062			

8.4.3 Efecto PAA. Prueba en planta

Tabla 8-5 Calidad del agua sedimentada. Efecto PAA prueba en planta piloto

Parámetro	
pH, unidades	7.71
C. E., $\mu\text{mho/cm}$	1955
Temperatura, °C	19
Turbiedad, UT	45
SST, mg/L	35
DQO, mg/L	243
Coliformes totales, UFC/mL	3.48E+06

Tabla 8-6 Calidad del agua desinfectada. Efecto PAA prueba en planta piloto

Cantidad PAA, 10 mg/L			
pH, unidades	6.91	6.87	6.9
C. E., $\mu\text{mho/cm}$	1903	1871	1858
Turbiedad, UT	50	50	52
Coliformes totales, UFC/mL	1.00E+06	1.43E+06	1.97E+06
Cantidad PAA, 15 mg/L			
pH, unidades	6.98	6.86	6.88
C. E., $\mu\text{mho/cm}$	2057	2028	1917
Turbiedad, UT	46	44	52
Coliformes totales, UFC/mL	7.98E+05	8.00E+05	7.47E+05
Cantidad PAA, 20 mg/L			
pH, unidades	6.88	6.7	6.82
C. E., $\mu\text{mho/cm}$	2078	1885	1930
Turbiedad, UT	49	43	55
Coliformes totales, UFC/mL	7.57E+05	6.33E+05	2.50E+04
Cantidad PAA, 25 mg/L			
pH, unidades	6.68	6.79	6.81
C. E., $\mu\text{mho/cm}$	1847	1888	1882
Turbiedad, UT	48	54	51
Coliformes totales, UFC/mL	6.87E+04	4.50E+01	9.00E+00
Cantidad PAA, 30 mg/L			
pH, unidades	6.8	6.7	6.77
C. E., $\mu\text{mho/cm}$	2040	1881	1875
Turbiedad, UT	51	54	54
Coliformes totales, UFC/mL	1.00E+00	2.00E+00	3.00E+00

Tabla 8-7 Estadística descriptiva de la inactivación causada por PAA en planta piloto

Efecto PAA, mg*min/L	Cuenta	Promedio	Mediana	Varianza	Desviación estándar
1.57	3	0.415	0.421	0.017	0.130
1.67	3	0.623	0.600	0.002	0.039
2.26	3	1.169	0.740	0.716	0.846
4.4	3	3.858	4.585	3.599	1.897
24.15	3	5.979	5.937	0.058	0.241
Total	15	2.409	0.740	5.673	2.382
Efecto PAA, mg*min/L	Error estándar	Mínimo	Máximo	Intervalo	Asimetría estándar
1.57	0.075	0.282	0.542	0.260	- 0.151
1.67	0.023	0.599	0.668	0.069	1.224
2.26	0.488	0.623	2.144	1.520	1.199
4.4	1.095	1.705	5.284	3.579	- 1.040
24.15	0.139	5.761	6.238	0.477	0.533
Total	0.615	0.282	6.238	5.956	1.158

8.4.4 Efecto PAA-UV. Prueba en planta

Tabla 8-8 Calidad del agua sedimentada. Efecto PAA-UV prueba en planta piloto

Fecha	Transmitancia UV, %	pH, unidades	C. E., $\mu\text{mho/cm}$	Turbiedad, UT	Sólidos Suspendidos, mg/L	pH, unidades
14/06/2007	23.04	6.80	1,623	25	22	211
14/06/2007	25.58	6.67	1,582	24	24	205
14/06/2007	27.72	6.79	1,518	24	23	175
26/06/2007	19.83	6.55	1,466	28	16	163
26/06/2007	21.43	6.95	1,452	26	15	172
26/06/2007	19.57	6.96	1,431	22	14	154
28/06/2007	29.77	6.83	1,479	27	21	230
28/06/2007	32.41	6.41	1,407	21	15	210
28/06/2007	31.21	6.79	1,379	22	14	214

Tabla 8-9 Calidad del agua desinfectada. Efecto PAA-UV prueba en planta piloto. Parte 1

Fecha	Efecto UV, mJ/cm^2	Efecto PAA, mg-min/L	Transmitancia UV, %	pH, unidades	C. E., $\mu\text{mho/cm}$	Turbiedad, UT
14-Jun	5.93	1.57	26.032	6.69	1560	22
26-Jun	5.93	1.57	22.868	6.9	1455	19
28-Jun	5.93	1.57	32.871	6.79	1419	19
14-Jun	5.93	2.26	26.765	6.74	1569	21
26-Jun	5.93	2.26	22.973	6.92	1452	21
28-Jun	5.93	2.26	32.959	6.71	1415	21
14-Jun	5.93	24.15	24.18	6.55	1587	23
26-Jun	5.93	24.15	22.275	6.27	1460	20
28-Jun	5.93	24.15	31.361	6.46	1474	23
14-Jun	7.17	1.57	25.469	6.64	1574	22
26-Jun	7.17	1.57	22.747	6.86	1462	19
28-Jun	7.17	1.57	32.42	6.82	1444	21
14-Jun	7.17	2.26	27.556	6.78	1550	20
26-Jun	7.17	2.26	22.855	6.89	1431	23
28-Jun	7.17	2.26	32.769	6.7	1398	20
14-Jun	7.17	24.15	23.26	6.48	1608	23
26-Jun	7.17	24.15	22.028	6.86	1470	21
28-Jun	7.17	24.15	30.693	6.43	1486	23
14-Jun	13.03	1.57	27.813	6.8	1515	21
26-Jun	13.03	1.57	22.909	6.98	1435	22
28-Jun	13.03	1.57	32.478	6.74	1390	19
14-Jun	13.03	2.26	24.814	6.7	1585	24
26-Jun	13.03	2.26	22.692	6.81	1458	19
28-Jun	13.03	2.26	31.878	6.8	1448	22

Fecha	Efecto UV, mJ/cm ²	Efecto PAA, mg·min/L	Transmitancia UV, %	pH, unidades	C. E., μmho/cm	Turbiedad, UT
14-Jun	13.03	24.15	26.954	6.7	1536	22
26-Jun	13.03	24.15	22.31	6.89	1431	22
28-Jun	13.03	24.15	32.646	6.66	1417	20

Tabla 8-10 Calidad del agua desinfectada. Efecto PAA-UV prueba en planta piloto. Parte 2

Fecha	Efecto UV, mJ/cm ²	Efecto PAA, mg·min/L	Sólidos Suspendidos, mg/L	DQO, mg/L	PAA residual, mg/L
14-Jun	5.93	1.57	17	230	0.210
26-Jun	5.93	1.57	14	202	0.040
28-Jun	5.93	1.57	15	202	0.217
14-Jun	5.93	2.26	18	205	0.229
26-Jun	5.93	2.26	13	171	0.276
28-Jun	5.93	2.26	16	171	0.424
14-Jun	5.93	24.15	21	225	0.137
26-Jun	5.93	24.15	13	226	2.713
28-Jun	5.93	24.15	18	226	3.142
14-Jun	7.17	1.57	19	213	0.118
26-Jun	7.17	1.57	14	192	0.010
28-Jun	7.17	1.57	17	192	0.114
14-Jun	7.17	2.26	19	214	0.026
26-Jun	7.17	2.26	16	205	0.365
28-Jun	7.17	2.26	16	205	0.276
14-Jun	7.17	24.15	22	229	0.247
26-Jun	7.17	24.15	12	202	2.315
28-Jun	7.17	24.15	18	202	3.024
14-Jun	13.03	1.57	20	212	- 0.011
26-Jun	13.03	1.57	14	192	0.010
28-Jun	13.03	1.57	12	192	0.099
14-Jun	13.03	2.26	19	233	0.118
26-Jun	13.03	2.26	14	226	0.129
28-Jun	13.03	2.26	15	226	0.247
14-Jun	13.03	24.15	18	212	0.173
26-Jun	13.03	24.15	16	209	2.492
28-Jun	13.03	24.15	17	209	3.319

Tabla 8-11 Calidad bacteriológica del agua a desinfectar (Coliformes totales)

Muestra	No, UFC/100 mL	No promedio, UFC/100 mL
AC1.1	8.00E+06	8.08E+06
AC1.2	1.00E+07	
AC1.3	6.25E+06	
AC2.1	7.25E+07	5.34E+07
AC2.2	5.25E+07	
AC2.3	3.53E+07	
AC3.1	1.30E+07	5.83E+06
AC3.2	2.43E+06	
AC3.3	2.08E+06	

Tabla 8-12 Calidad bacteriológica del agua desinfectada. Efecto PAA-UV, prueba en planta

Muestra	Efecto UV, mJ/cm ²	Efecto PAA, mg·min/L	No promedio, UFC CT/100 mL	N, UFC CT/100 mL
1	7.17	24.15	8.08E+06	5.45E+04
2	5.93	24.15	8.08E+06	1.50E+02
3	13.03	2.262	8.08E+06	2.53E+05
4	7.17	1.568	8.08E+06	3.05E+06
5	5.93	1.568	8.08E+06	3.50E+04
6	5.93	2.262	8.08E+06	2.05E+04
7	13.03	24.15	8.08E+06	4.75E+04
8	7.17	2.262	8.08E+06	6.00E+04
9	13.03	1.568	8.08E+06	1.15E+05
1	7.17	24.15	5.34E+07	1.28E+04
2	5.93	24.15	5.34E+07	1.33E+03
3	13.03	2.262	5.34E+07	5.08E+05
4	7.17	1.568	5.34E+07	2.85E+06
5	5.93	1.568	5.34E+07	7.55E+05
6	5.93	2.262	5.34E+07	4.33E+04
7	13.03	24.15	5.34E+07	2.40E+05
8	7.17	2.262	5.34E+07	2.68E+05
9	13.03	1.568	5.34E+07	3.55E+06
1	7.17	24.15	5.83E+06	1.33E+03
2	5.93	24.15	5.83E+06	1.50E+02
3	13.03	2.262	5.83E+06	4.73E+05
4	7.17	1.568	5.83E+06	1.00E+05
5	5.93	1.568	5.83E+06	3.00E+04
6	5.93	2.262	5.83E+06	9.25E+02
7	13.03	24.15	5.83E+06	1.43E+05
8	7.17	2.262	5.83E+06	4.00E+04
9	13.03	1.568	5.83E+06	2.50E+05

Tabla 8-13 Estadística básica de la inactivación causada por PAA-UV en planta piloto

Efecto UV, mJ/cm ²	Efecto PAA, mg·min/L	Promedio	Error estándar	Límite superior 95% I. C.	Límite inferior 95% I. C.	Cuenta
5.93	1.57	1.464	0.280	0.875	2.053	3
5.93	2.26	1.540	0.280	0.950	2.129	3
5.93	24.15	2.063	0.280	1.474	2.653	3
7.17	1.57	1.154	0.280	0.565	1.743	3
7.17	2.26	2.198	0.280	1.608	2.787	3
7.17	24.15	3.146	0.280	2.556	3.735	3
13.03	1.57	2.168	0.280	1.578	2.757	3
13.03	2.26	3.163	0.280	2.573	3.752	3
13.03	24.15	4.642	0.280	4.053	5.231	3

Tabla 8-14 Estadística básica por nivel, prueba combinada PAA-UV

Nivel		Cuenta	Promedio	Error estándar	Límite inferior	Límite superior
Todos los tratamientos		27	2.393			
Efecto UV, mJ/cm ²	5.93	9	1.689	0.162	1.349	2.029
	7.17	9	2.166	0.162	1.826	2.506
	13.03	9	3.324	0.162	2.984	3.664
Efecto PAA, mg·min/L	1.57	9	1.595	0.162	1.255	1.935
	2.26	9	2.300	0.162	1.960	2.640
	24.15	9	3.284	0.162	2.943	3.624

8.4.5 Estadística de la calidad bacteriológica del agua a desinfectar

Tabla 8-15 Estadística básica de la calidad bacteriológica del agua a desinfectar

Cuenta	16
Promedio	2.37 x10 ⁷
Media geométrica	1.05 x10 ⁷
Varianza	7.96 x10 ¹⁴
Desviación estándar	2.82 x10 ⁷
Error estándar	7.05 x10 ⁶
Mínimo	1.25 x10 ⁶
Máximo	8.98 x10 ⁷
Intervalo	8.85 x10 ⁷
Asimetría estándar	2.102
Kurtosis estándar	0.477

Dados los coeficientes de asimetría y kurtosis estándar, se puede decir que los datos se describen razonablemente bien por una distribución normal.

Figura 8-2 Diagrama de caja de los Coliformes totales antes de desinfectar

Figura 8-3 Grafica de probabilidad normal de los Coliformes totales antes de desinfectar

8.4.6 Calidad del agua del efluente del sedimentador de la planta piloto

Se tomaron mediciones de los siguientes parámetros que caracterizan y describen el agua producida en la planta piloto, y se utilizó para el proyecto de desinfección:

- Turbiedad
- Sólidos suspendidos totales (SST)
- Conductividad eléctrica (CE)
- Demanda química de oxígeno (DQO)
- pH
- Transmitancia (T)

En la Tabla 8-16 se muestran los estadísticos de los parámetros de calidad del agua a desinfectar analizados en el laboratorio.

La Tabla 8-17 muestra los resultados de la campaña de caracterización que se realizó.

Tabla 8-16 Estadísticos de la calidad del agua del efluente del sedimentador primario

Estadístico	Turbiedad, UT	SST, mg/L	C. E., $\mu\text{mho/cm}$	pH, unidades	DQO, mg/L	Transmitancia, %
Promedio	17.49	11.63	1,426.74	6.69	154.60	23.38
Mediana	18	11	1431	6.76	154	23.22
Moda		9		6.83		
Varianza	39.96	27.01	8,762.96	0.07	1,276.07	15.49
Desviación estándar	6.32	5.20	93.61	0.26	35.72	3.94
Error estándar	1.07	0.88	15.82	0.04	6.04	0.67
Mínimo	6	5	1275	6	99	14.42
Máximo	28	24	1623	7.08	230	32.41
Coefficiente de asimetría	-0.34	0.82	0.12	-0.52	0.25	0.17
Kurtuosis	-0.90	0.16	-0.77	-0.21	-0.80	0.24

Tabla 8-17 Resultados de calidad del agua del efluente del sedimentador primario

Turbiedad, UT	SST, mg/L	C. E., $\mu\text{mho/cm}$	pH, unidades	DQO, mg/L	Transmitancia, %
25	22	1,623	6.80	211	23.04
24	24	1,582	6.67	205	25.58
24	23	1,518	6.79	175	27.72
28	16	1,466	6.55	163	19.83
26	15	1,452	6.95	172	21.43
22	14	1,431	6.96	154	19.57
27	21	1,479	6.83	230	29.77
21	15	1,407	6.41	210	32.41
22	14	1,379	6.79	214	31.21

Turbiedad, UT	SST, mg/L	C. E., $\mu\text{mho/cm}$	pH, unidades	DQO, mg/L	Transmitancia, %
21	15	1,488	6.83	180	17.78
12	9	1,527	7.02	182	17.84
9	9	1,482	7.04	179	17.63
7	6	1,456	7.08	160	18.84
8	7	1,419	6.96	136	20.36
6	5	1,582	6.86	119	21.64
6	5	1,496	6.94	126	22.34
8	6	1,568	7.03	137	23.21
12	9	1,317	6.40	99	22.82
14	8	1,275	6.45	101	23.67
11	5	1,301	6.40	104	24.78
16	8	1,289	6.00	109	27.34
22	12	1,308	6.37	109	28.42
19	14	1,304	6.26	116	27.37
17	11	1,327	6.48	118	25.83
16	10	1,329	6.42	122	23.91
18	9	1,320	6.53	140	24.05
16	8	1,311	6.78	165	24.66
23	14	1,394	6.52	178	14.42
23	15	1,397	6.45	189	20.48
20	12	1,427	6.60	177	22.27
20	11	1,423	6.76	161	23.35
22	13	1,431	6.83	148	23.08
17	9	1,469	6.89	136	23.22
16	8	1,472	6.74	144	24.25
14	5	1,487	6.69	142	24.28

La Figura 8-4 muestra los diagramas de caja de los parámetros analizados en la caracterización realizada, de donde se puede observar gráficamente la dispersión de los resultados obtenidos. La Figura 8-5 presenta los histogramas de estos parámetros de calidad del agua; y en la Figura 8-6 se muestran las correspondientes gráficas de probabilidad normal.

Figura 8-4 Diagramas de caja de la calidad del efluente del sedimentador primario

Figura 8-5 Histogramas de la calidad del efluente del sedimentador primario

Figura 8-6 Gráficas de probabilidad normal de la calidad del efluente del sedimentador primario

8.5 Planta piloto de tratamiento de aguas residuales

La planta piloto de aguas residuales de la UAM Azcapotzalco, tiene una capacidad para operar a 0.50 L/s como gasto medio de diseño y 0.75 L/s como gasto máximo.

Las unidades de proceso son las siguientes:

Coagulación-floculación, incluye sistema de preparación y dosificación de productos químicos

Sedimentación de alta tasa

Filtración en medio simple (antracita)

Microfiltración (filtros cartucho)

Desinfección con luz ultravioleta (lámpara de media presión)

Desinfección química

La planta piloto se diseñó considerando una calidad promedio del agua influente de 220 mg DBO₅/L y 340 mg SST/L. En trabajos previos (Valle y Zavala, 2005), la calidad promedio del agua influente fue 930 mg DQO/L, 212 mg SST/L y turbiedad de 109 UTN; mientras que el efluente de la sedimentación fue de 310 mg DQO/L, 25 mg SST/L y turbiedad de 50 UTN.

Los productos químicos que se utilizan normalmente para la operación de la planta piloto son: sulfato de aluminio (coagulante) y un polielectrolito.

A continuación se describen las principales características de la planta piloto.

Tabla 8-18 Características de la unidad de mezclado rápido

Característica	
Número de cámaras de mezclado rápido	1
Tiempo de retención	30 s
Volumen útil por cámara de floculación	22.5 L
Gradiente promedio de operación	650 s ⁻¹

Característica	
Tipo de agitador en cámara de floculación	Agitador de velocidad variable con propela tipo marino de 3 aspas
Potencia teórica del agitador	50 W
Intervalo de velocidad de operación	1,000 a 2,800 rpm

Tabla 8-19 Características de la unidad de floculación

Característica	
Número de cámaras de floculación	2
Tiempo de retención por cámara de floculación	15 min
Tiempo total de retención	30 min
Volumen útil por cámara de floculación	675 L
Tipo de agitador en cámara de floculación	impulsor tipo Hidrofoil de alta capacidad de bombeo
Intervalo del gradiente de operación	20-80 s ⁻¹
Lado (por celda)	0.90 m
Longitud total	1.80 m
Tirante útil	0.83 m
Altura total del tanque	1.00 m

Tabla 8-20 Características de la unidad de sedimentación de alta tasa

Característica	
Número de unidades	1
Tipo	flujo laminar con placas paralelas
Carga hidráulica de diseño	72 m ³ /m ² ·d
Área superficial	0.90 m ²
Lado	0.95 m
Tirante abajo de la zona de placas paralelas	1.79 m
Proyección vertical de la zona de placas paralelas	1.04 m
Tirante arriba de la zona de placas paralelas	0.67 m
Bordo libre	0.20 m
Altura total del tanque	3.70 m

Tabla 8-21 Características de la unidad de filtración

Característica	
Número de unidades	2
Tipo	gravedad, medio simple, operado a gasto constante
Carga hidráulica de diseño	250 m ³ /m ² ·d

Característica	
Diámetro de las unidades de filtración	0.406 m (16")
Altura total	4.00 m
Carga hidráulica de operación	1.80 m
Medio filtrante será con un de, con un	antracita
Espesor medio filtrante	1.80 m
Características medio filtrante	
• tamaño efectivo	1.5 mm
• coeficiente de uniformidad	1.1 a 1.2
Retrolavado	a presión con agua tratada
Tasa de retrolavado	30 gpm/pie ²
Tiempo de retrolavado	15 min

Fotografía 8-15 Vista de la planta piloto. Tren de tratamiento básico.

Fotografía 8-16 Unidad de medición de flujo en el influente

Fotografía 8-17 Unidad de mezcla rápida y floculación

Fotografía 8-18 Vista de la unidad de sedimentación de alta tasa

Fotografía 8-19 Unidad de preparación de productos químicos (Coagulante y polielectrolito)

Fotografía 8-20

Unidad de desinfección

9 Bibliografía

9.1 Referencias

APHA, AWWA & WEF, (1992), Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 18th Edition, American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, USA

Blumenthal, U. J., Mara, D. D., Peasey, A., Ruíz-Palacios, G., Stott, R., (2000), Guidelines for the microbiological quality of treated wastewater used in agriculture: recommendations for revising WHO guidelines, *Bulletin of the World Health Organization*, 78 (9)

Bolton, J. R., Linden, K. G., (2003), Standardization of methods for fluence (UV dose) determination in bench-scale UV experiments, *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 129, No. 3, 209-215

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

Chen, D., Dong, S., Gehr, R., (2005), Alternative disinfection mechanisms for wastewaters using combined PAA/UV processes, Disinfection 2005; WEF Specialty Conference Series, Mesa, Arizona, February 6-9, 2005

CNA, (2004), Estadísticas del Agua en México 2004, Segunda Edición, Comisión Nacional del Agua, México

Constantino, R. M. (Ed.), (2006), Agua: Seguridad Nacional e Instituciones, conflictos y riesgos para el diseño de las políticas públicas, Senado de la República, ILSEN, UAM, México

- Falsanisi, D., Gehr, R., Santoro, D., Dell'Erba, A., Notarnicola, M., Liberti, L., (2006), Kinetics of PAA demand and its implications on disinfection of wastewaters, *Water Quality Research Journal of Canada*, Vol. 41, No. 4, 398-409
- Gehr, R., Wagner, M., Veerasubramanian, P., Payment, P., (2003), Disinfection efficiency of peracetic acid, UV and ozone after enhanced primary treatment of municipal wastewater, *Water Research*, Vol. 37, 4573-4586
- Gehr, R., (2007), Collimated beam tests: their limitations for assessing wastewater disinfectability by UV, and a proposal for an additional evaluation parameter, paper approved for publication *Journal of Environmental Engineering Science*, 6, 1-6
- Gyürék, L. L., Finch, G. R., (1998), Modeling water treatment chemical disinfection kinetics, *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 124, No. 9, 783-793
- Hach Co., (1999), DR/820, DR/850 & DR/890 Portable Data Logging Colorimeter Instrument Manual 1st ed, Rev 5, 48440-18, USA
- Hach Co., (2005), DR/890 Colorimeter Procedures Manual, 7 ed, 48470-22, USA
- Helmer, R., Hespanhol, I., (Ed.), (1997), Water pollution control – A guide to the use of water quality management principles, World Health Organization, E & FN Spoon, London, UK
- Lefevre, F., Audic, J. M., Ferrand, F., (1992), Peracetic acid disinfection of secondary effluents discharged off coastal seawater, *Water Science and Technology*, Vol. 25, No. 12, 155-164
- Liberti, L., López, A., Notarnicola, M., Barnea, N., Pedahzur, R., Fattal, B., (2000), Comparison of advanced disinfection methods for municipal wastewater reuse in agriculture, *Water Science and Technology*, Vol. 42, No. 1-2, 215-220

- Liberti, L., Notarnicola, M., (1999), Advanced treatment and disinfection for municipal wastewater reuse in agriculture, *Water Science and Technology*, Vol. 40, No. 4-5, 235-245
- Loge, F. J., Bourgeois, K., Emerick, R. W., Darby, J. L., (2001), Variations in wastewater quality parameters influencing UV disinfection performance: relative impact on filtration, *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 127, No. 9, 832-837
- Lubello, C., Gori, R., Nicese, F. P., Ferrini, F., (2004), Municipal-treated wastewater reuse for plant nurseries irrigation, *Water Research*, Vol. 38, 2939-2947
- Martin, N., Gehr, R., (2005), Photoreactivation Following Combined Peracetic Acid-UV Disinfection of a Physicochemical Effluent, Proceedings of Third International Congress on Ultraviolet Technologies, IUVA, Whistler, British Columbia, May 24-27.
- Metcalf & Eddy, Inc., (2003), Wastewater engineering: treatment and reuse, Fourth Edition, McGraw-Hill Companies Inc., New York, USA
- Monarca, S., Feretti, D., Collivignarelli, C., Guzzella, L., Zerbini, I., Bertanza, G., Pedrazzani, R., (2000), The influence of different disinfectants on mutagenicity and toxicity of urban wastewater, *Water Research*, Vol. 34, No. 17, 4261-4269
- Parger, Jan C. (Ed.), (1998), Environmental Contaminant Reference Databook, Volumes 1-3, John Wiley & Sons
- Santoro, D., Gehr, R., Bartrand, T., Liberti, L., Notarnicola, M., Dell'Erba, A., Falsanisi, D., Haas, C., (2007), Wastewater disinfection by Peracetic Acid: Assessment of models for tracking residual measurements and inactivation, *Water Environment Research*, Vol. 79
- Trojan Technologies, Inc., MicroLab–Collimated beam test method. Rev.0022

US EPA, (1999a), Alternative disinfectants and oxidants guidance manual, U. S. Environmental Protection Agency, EPA 815-R-99-014, Cincinnati, OH, USA

US EPA, (1999b), Combined sewer overflow technology fact sheet: Alternative disinfection methods, U. S. Environmental Protection Agency - Municipal Technology Branch, EPA 832-F-99-033, Washington, DC, USA

Valle H., B. L., Zavala R., R., (2005), Determinación de las condiciones de operación de la planta piloto de la UAM Azcapotzalco, Proyecto terminal de Ingeniería Ambiental, UAM

WEF (1996), Wastewater disinfection, Manual of Practice FD-10, Water Environment Federation, Alexandria, VA, USA

9.2 Artículos consultados

Blatchley III, E. R., Wood, W. L., Schuerch, P., (1995), UV pilot testing: intensity distributions and hydrodynamics, *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 121, No. 3, 258-262

Chapra, S. C., Canale, R. P., Amy, G. L., (1997), Empirical models for disinfection by-products in lakes and reservoirs, *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 123, No. 7, 714-715

Chiu, K., Lyn, D. A., Savoye, P., Blatchley III, E. R., (1999), Integrated UV disinfection model based on particle tracking, *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 125, No. 1, 7-16

- Dykstra, T. S., Chauret, C., Gagnon, G. A., (2002), Hydraulic calibration and fluence determination of model ultraviolet disinfection system, *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 128, No. 11, 1046-1055
- Gnirss R., Dittrich J., (2000), Microfiltration of municipal wastewater for disinfection and advance phosphorous removal: results from trials with different small-scale pilot plants, *Water Environment Research*, Vol. 72, No. 5, 602-609
- Kuo, J., Chen, C., Nellor, M., (2003), Standardized collimated beam testing protocol for water/wastewater ultraviolet disinfection, *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 129, No. 8, 774-778
- Lazarova, V., Savoye, P., Janex, M. L., Blatchley III, E. R., Pommepuy, M., (1999), Advanced wastewater disinfection technologies: Sate of the art and perspectives, *Water Science and Technology*, Vol. 40, No. 4-5, 203-213
- Loge, F. J., Darby, J. L., Tchobanoglous, G., (1996), UV disinfection of wastewater: probabilistic approach to design, *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 122, No. 12, 1078-1084
- Sellami, M. H., Hassen, A., Sifaoui, M. S., (2003), Modelling of UV radiation field inside a photoreactor designed for wastewater disinfection experimental validation, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, Vol. 78, 269-287
- Vines, J. R. L., Jenkins, P. D., Foyer, C. H., French, M. S., Scott, I. M., (2003), Physiological effects of peracetic acid on hydroponic tomato plants, *Ann. Appl. Biol.*, No. 143, 153-159
- Wagner, M., Brumelis, D., Gehr, R., (2002), Disinfection of wastewater by hydrogen peroxide or peracetic acid: Development of procedures for measurement of residual disinfectant and application to a physicochemically treated municipal effluent, *Water Environment Research*, Vol. 74, No. 1, 33-50

9.3 Normas consultadas

NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 6 de enero de 1997, y su ratificación publicada en el Diario Oficial de la Federación el 23 de abril de 2003.

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, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 3 de junio de 1998, y su ratificación publicada en el Diario Oficial de la Federación el 23 de abril de 2003.

NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 21 de septiembre de 1998, y su ratificación publicada en el Diario Oficial de la Federación el 23 de abril de 2003.

NOM-127-SSA1-1994, Salud Ambiental, Agua para uso y consumo humano, Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 18 de enero de 1996.