



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

TRATAMIENTO DE UN EFLUENTE MUNICIPAL
SECUNDARIO CON OZONO Y ULTRAFILTRACIÓN
PARA RECARGA DE ACUÍFERO
EFECTO SOBRE LA MATERIA ORGÁNICA

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA AMBIENTAL - AGUA

P R E S E N T A :

ING. JUAN FERNANDO MUÑOZ PAREDES

TUTOR:

DRA. MARÍA TERESA ORTA L. DE VELÁSQUEZ

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dra. Blanca Jiménez Cisneros

Secretario: Dr. Alfonso Durán Moreno

Vocal: Dra. María Teresa Orta Ledesma

1^{er}. Suplente: M.I. Esperanza Ramírez Camperos

2^{do}. Suplente: Dra. Alejandra Martín Domínguez

Lugar donde se realizó la tesis:

LABORATORIO DE BIOPROCESOS E INGENIERÍA AMBIENTAL INSTITUTO DE
INGENIERÍA, UNAM

TUTOR DE TESIS:

Dra. MARÍA TERESA ORTA L. DE VELÁSQUEZ

Durante la realización de este trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (271323) y del Instituto de Ingeniería UNAM.

A mi mamá Sofía, por toda la admiración que me merece, por todo su amor, apoyo y comprensión, por estar siempre cerca de mí, porque a ella le debo todo lo que soy, sencillamente por ser la mejor mamá del mundo.

A mi hermana Sofía, por todo su cariño, por sus palabras de aliento, por su constante apoyo y su buen humor, porque siempre me imprime optimismo y felicidad.

A mi tía Alicia, por su ternura y amor, por su sabiduría y sus enseñanzas, por consentirme y dedicarme todo su tiempo.

A mi tía Josefina y mis primos Luis A. y Ana María, por toda su ayuda, cariño y dedicación, por sus palabras de apoyo en los momentos difíciles.

A la memoria de mi padre Alfonso, por el amor que me brindó en vida y por la formación que me otorgó, llena de valores y honestidad.

AGRADECIMIENTOS

A la Dra. María Teresa Orta Ledesma, por su colaboración en la dirección de esta Tesis de grado, por sus comentarios y sus valiosas enseñanzas.

Al Dr. Alfonso Duran Moreno y a la M. en I. Esperanza Ramírez Camperos, por sus aportes y consejos para la realización de este trabajo.

A la Dra. Blanca Jiménez y a la Dra. Alejandra Martín por sus valiosos comentarios para la conclusión de este trabajo.

Al Dr. Ignacio Monje Ramírez, por su apoyo y colaboración en el manejo de la unidad de ozono.

A la M en C. Isaura Yáñez Noguez, por su ayuda y colaboración para el desarrollo del trabajo de laboratorio.

Al M en C. Rafael Madrid Ríos, por su colaboración en el análisis estadístico de la información.

A la M en I. María Guadalupe Urquiza Moreno, por su colaboración en la realización de los análisis de carbono orgánico total (COT).

A la Dra. Rosa María Ramírez Zamora, por su colaboración en el préstamo de algunos equipos de laboratorio.

A Cristina Araoz Trejo, por su valiosa cooperación en la realización de los trámites y demás gestiones durante la realización de la Maestría.

A mis amigos de la Maestría: Adriana Roe, David Martínez, Edgar Doroteo, Fabián Neira, Gildardo Bermeo, Leonel Amábilis, Raúl Ramírez, Rubí García y Yunuen Mendoza, por su amistad y compañía durante estos dos años de estudio.

A mis compañeros del Instituto de Ingeniería: Atenas Diosdado, Cecilia Sánchez, Erick García, Esperanza Gil, Germán Castro, Karen Velásquez, Miguel Valencia, Vanesa Redondo, por su amistad y apoyo en las jornadas de laboratorio.

A todos mis demás amigos y compañeros de la Maestría y del Instituto de Ingeniería.

Al CONACYT por el apoyo económico otorgado para la realización de esta Maestría y por brindarme la oportunidad de estudiar en México.

CONTENIDO

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
JUSTIFICACIÓN	4
OBJETIVOS	6
CAPÍTULO 1	
ANTECEDENTES	7
1.1 Fuentes de abastecimiento de agua potable en el Valle de México	7
1.2 Sobreexplotación del acuífero del Valle de México	7
1.3 Recarga natural del acuífero	8
1.4 Recarga artificial del acuífero	8
1.5 Tratamiento y reuso de aguas residuales en la ciudad de México D.F.	9
1.6 Normatividad oficial para recarga de acuíferos	10
1.7 Aplicaciones de ozono y la ultrafiltración en el tratamiento de aguas residuales con fines de reuso	11
CAPITULO 2	
MARCO TEORICO	16
2.1 Oxidación Química con ozono	16
2.2 Propiedades del ozono	17
2.3 Reactividad del ozono con la materia orgánica	18
2.4 Generación de ozono	20
2.5 Componentes básicos del sistema de ozonación	22
2.6 Cinética de Reacción	23
2.6.1 Cinética de las reacciones de oxidación con ozono	24
2.7 Tecnología de membranas	25
2.7.1 Clasificación de las membranas	26
2.7.1.1 Mecanismo de preparación	26
2.7.1.2 Morfología	27
2.7.1.3 Geometría	28
2.7.1.4 Naturaleza química	28
2.7.2 Materiales de membranas	29

2.7.3	Procesos de membrana	30
2.7.4	Membranas de Ultrafiltración	31
2.7.4.1	Configuración tubular	31
2.7.4.2	Membrana de fibra hueca	32
2.7.4.3	Membranas de placas	33
2.7.4.4	Membranas en espiral	34
2.7.5	Mecanismos de ensuciamiento de membranas	35
CAPITULO 3		
METODOLOGÍA		37
3.1	Caracterización del efluente secundario de la planta de tratamiento de Aguas Residuales de Cerro de la Estrella	37
3.2	Métodos Analíticos	37
3.3	Experimentos con membrana	39
3.4	Arreglo experimental	40
3.5	Pruebas de ozonación y ultrafiltración	42
3.5.1	Análisis del tipo de ensuciamiento de la membrana	43
3.6	Análisis de la materia orgánica disuelta	44
3.7	Evaluación de la calidad del efluente final	45
3.8	Diseño experimental-Análisis estadístico	46
3.9	Análisis de costos	47
3.9.1	Costo del sistema de ozonación	47
3.9.1.1	Costos de capital	48
3.9.1.2	Costos de mantenimiento y operación	49
3.9.2	Costo de la operación de filtración	50
3.9.2.1	Costos de capital	51
3.9.2.2	Costos de mantenimiento y operación	52
CAPITULO 4		
RESULTADOS		54
4.1	Caracterización del efluente secundario de estudio	54
4.2	Pruebas preliminares de ultrafiltración	55

4.2.1 Prueba preliminar de filtración para 4 horas	55
4.2.2 Prueba preliminar de filtración para 8 horas	56
4.3 Determinación de la línea base de operación	57
4.4 Pruebas de ozonación y ultrafiltración del diseño experimental	57
4.4.1 Pruebas de ozonación y ultrafiltración del diseño experimental para un tiempo de contacto de ozono de 10 minutos	59
4.4.2 Pruebas de ozonación y ultrafiltración del diseño experimental para un tiempo de contacto de ozono de 20 minutos	66
4.4.3 Comparación entre pruebas de filtración para agua sin ozono y agua ozonada para 8 horas de operación	73
4.4.4 Análisis del tipo de ensuciamiento de la membrana	75
4.4.4.1 Análisis del tipo de ensuciamiento de la membrana para agua residual sin ozonar	75
4.4.4.2 Análisis del tipo de ensuciamiento de la membrana para agua residual ozonada	76
4.5 Fraccionamiento de la materia orgánica disuelta	77
4.6 Resultados de remoción en pruebas de ozonación	79
4.7 Análisis estadístico	81
4.8 Costos	89
4.8.1 Costos de ozonación	89
4.8.1.1 Costos de capital	89
4.8.1.2 Costos de mantenimiento y operación	90
4.8.2 Costos de ultrafiltración	92
4.8.2.1 Costo de capital	92
4.8.2.2 Costo de mantenimiento y operación	93
CAPITULO 5	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	95
BIBLIOGRAFÍA	98
ANEXOS	103

INDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1.1 Fuentes de suministro de agua en el Estado de México	7
2.1 Resonancia de la molécula del ozono	19
2.2 Rutas de reacción del ozono con compuestos orgánicos y formación de oxidantes secundarios	19
2.3 Generación de ozono por corona de descarga	21
2.4 Componentes de un sistema de generación de ozono	22
2.5 Membranas porosas isotrópicas	27
2.6 Membrana asimétrica	28
2.7 Membrana mixta	28
2.8 Proceso de filtración con membranas	31
2.9 Membrana tubular	32
2.10 Membrana de fibra hueca	33
2.11 Configuración de membrana de placas	34
2.12 Membrana en espiral	35
2.13 Mecanismos de ensuciamiento de membrana	35
3.1 Equipos empleados en ozonación	41
3.2 Sistema de ozonación	42
3.3 Diagrama del fraccionamiento de la materia orgánica disuelta (MOD)	45
3.4 Costos para la producción de ozono	49
4.1 Muestreo de agua residual y efluente secundario	54
4.2 Variación de la presión para 4 horas de filtración	55
4.3 Variación del flux para 4 horas de filtración	55
4.4 Variación de la presión para 8 horas de filtración	56
4.5 Variación del flux para 8 horas de filtración	56
4.6 Línea base para una presión de 3 psi	57
4.7 Línea base para una presión de 6 psi	57
4.8 Equipo para prueba de ozonación	58
4.9 Equipo para prueba de ultrafiltración	58
4.10 Curva de demana de ozono para experimento No. 4 y 8	59

4.11 Flux Vs tiempo de ultrafiltración a 3 psi	61
4.12 Flux Vs tiempo de ultrafiltración a 6 psi	62
4.13 Curva de demanda de ozono para experimento No. 1 y 5	62
4.14 Flux Vs tiempo de ultrafiltración a 3 psi	63
4.15 Flux Vs tiempo de ultrafiltración a 6 psi	64
4.16 Curva de demanda de ozono para experimento No. 6 y 7	66
4.17 Flux Vs tiempo de ultrafiltración a 3 psi	68
4.18 Flux Vs tiempo de ultrafiltración a 6 psi	69
4.19 Curva de demana de ozono para experimento No. 2 y 3	69
4.20 Flux Vs tiempo de ultrafiltración a 3 psi	70
4.21 Flux Vs tiempo de ultrafiltración a 6 psi	71
4.22 Comportamiento del flux para agua sin ozonar y agua ozonada para 10 minutos de tiempo de contacto de ozono	73
4.23 Comportamiento del flux para agua sin ozonar y agua ozonada para 20 minutos de tiempo de contacto de ozono	74
4.24 Tipo de ensuciamiento de la membrana para agua residual sin ozonar	75
4.25 Tipo de ensuciamiento de la membrana para agua residual ozonada	76
4.26 Distribución de la materia orgánica disuelta	78
4.27 Porcentaje de remoción para tiempo de contacto de ozono de 10 y 20 minutos	80
4.28 Diagrama de Pareto estandarizado para el porcentaje de remoción en Demanda Química de Oxígeno (DQO)	85
4.29 Interacción factor A (Concentración de ozono) y factor C (Presión de ultrafiltración)	86
4.30 Interacción factor B (Tiempo de contacto de ozono) y factor C (Presión de ultrafiltración)	86
4.31 Interacción A*B*C a 3 psi	87
4.32 Interacción A*B*C a 6 psi	88

INDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1.1 Plantas municipales de tratamiento de aguas residuales en operación en el Distrito Federal	9
1.2 Calidad del Agua Residual Tratada para Recarga Artificial (NOM 014 - CONAGUA - 2003)	11
2.1 Propiedades fisicoquímicas del ozono	18
2.2 Requerimientos típicos de energía para un sistema de ozonación	23
2.3 Materiales y características de aplicación de membranas	30
2.4 Leyes de bloquero de poro	36
3.1 Factores y niveles de tratamiento	47
3.2 Número de experimentos y valores codificados	48
4.1 Parámetros fisicoquímicos analizados en el efluente secundario	54
4.2 Parámetros fisicoquímicos pruebas de ozonación y ultrafiltración para un tiempo de contacto de 10 minutos	59
4.3 Prueba No.8 Ultrafiltración a 3 psi	60
4.4 Prueba No. 4 Ultrafiltración a 6 psi	61
4.5 Prueba No. 1 Ultrafiltración a 3 psi	63
4.6 Prueba No. 5 Ultrafiltración a 6 psi	64
4.7 Parámetros fisicoquímicos pruebas de ozonación y ultrafiltración para un tiempo de contacto de 20 minutos	66
4.8 Prueba No. 6 Ultrafiltración a 3 psi	67
4.9 Prueba No. 7 Ultrafiltración a 6 psi	68
4.10 Prueba No. 3 Ultrafiltración a 3 psi	70
4.11 Prueba No. 2 Ultrafiltración a 6 psi	71
4.12 Fraccionamiento de la materia orgánica disuelta	77
4.13 Estudios relacionados con el fraccionamiento de la materia orgánica disuelta para agua sin ozonar	79
4.14 Expresiones empleadas en la tabla de análisis de varianza	81
4.15 ANOVA para el total del experimento	83
4.16 ANOVA para el total de tratamientos e interacciones	84

4.17 Costo de capital para la generación de ozono	90
4.18 Costos de mantenimiento y operación para generación de ozono	91
4.19 Costo de capital para ultrafiltración	93
4.20 Costos de mantenimiento y operación para ultrafiltración	94

RESUMEN

La reutilización de aguas residuales urbanas es una práctica muy extendida en numerosos países áridos o semiáridos, de manera que hoy día este tipo de aguas han entrado a formar parte del ciclo hidrológico y a ser consideradas como recursos hídricos alternativos que deben ser tenidos en cuenta en todo balance. La depuración previa de estas aguas, en sus diferentes niveles, mejora su calidad y abre notablemente las posibilidades de su reuso.

En este trabajo de investigación se abordó el tratamiento de un efluente secundario de la planta de tratamiento de aguas residuales de Cerro de la Estrella, localizada en la Delegación Iztapalapa de la Ciudad de México D.F., dicho tratamiento se realizó mediante dos procesos fisicoquímicos: ozonación y ultrafiltración.

Para la ozonación se trabajó con dos concentraciones de ozono en fase gaseosa y dos tiempos de contacto de ozono, para la ultrafiltración se trabajó con dos presiones de operación. Todas las pruebas se realizaron por lote, la ozonación se realizó en un reactor de vidrio de 1.8 litros de volumen y la ultrafiltración se realizó con una membrana Zenón de fibra hueca, de 0.8 μm de tamaño de poro, se realizaron las pruebas siguiendo un diseño de experimentos de tipo factorial 2^k .

Entre los resultados más importantes se encuentra que el ozono sí ayuda a eliminar la materia orgánica del efluente secundario de estudio, se alcanzaron remociones del orden del 85% en color, 63% en turbiedad, 71% en DQO, 27% en COT y 78% en UV_{254} .

El comportamiento del flux de la membrana de ultrafiltración mejora con el uso del ozono, es así como para el tiempo de operación de 4 horas el flux se reduce en un 16% en comparación con un 42% si no se hubiera ozonado. El tipo de ensuciamiento de la membrana de ultrafiltración correspondió al tipo de formación de la torta.

INTRODUCCIÓN

Los acuíferos son la principal fuente de abastecimiento de agua potable en la zona metropolitana de Ciudad de México, pero la tasa de extracción supera la tasa de recarga natural ocasionando uno de los mayores problemas que enfrenta actualmente el Distrito Federal, el cual es la continua demanda de agua para consumo humano. Esto ha generado la sobre explotación del acuífero, del cual se extrae más del 70 % del agua que la población del Distrito Federal recibe para su consumo.

El territorio del Distrito Federal se divide en zona urbana 42 % y suelo de conservación 58 %. Esta última zona, que incluye básicamente las montañas que rodean la ciudad, se integra así: 44% de bosques, 38% de áreas agropecuarias y pastizales y un 13% ocupado por una progresiva urbanización que en las últimas décadas, ha avanzado sin freno alguno. En este suelo de conservación es donde se efectúa la mayor parte de la recarga de los acuíferos que abastecen el 60% del consumo de agua de la Ciudad de México. El 40% restante proviene de las cuencas de los ríos Lerma y Cutzamala.

El agua del Río Lerma y el Cutzamala antes de llegar a la ciudad recorre de 60 a 154 kilómetros de distancia a una altura de 1000 metros, lo que requiere de 102 plantas de bombeo para que llegue a la población. La mayoría de las fuentes de abastecimiento están ubicadas al poniente, al norte y al sur de la Ciudad, lo cual provoca que exista una distribución irregular del agua y ocasiona que el oriente de la zona metropolitana de la ciudad de México sufra escasez del líquido. (Consejo de población del D.F., Secretaría de Gobierno, 2004)

Es necesario crear conciencia de que el abasto de agua para la zona metropolitana del valle de México está llegando rápidamente a su límite, por lo que se tendrá que ampliar el bienestar social y el crecimiento económico con los mismos volúmenes de dotación actuales. Pero la política de uso del agua vigente es insostenible, es necesario implementar mejores alternativas de manejo ya que resulta dispendioso traer agua de 300 metros de profundidad sobreexplotando el acuífero o traerla de 127 kilómetros de distancia y bombearla a mil metros de altura, para usarla una sola vez y desalojarla fuera de la cuenca disponiéndola en riego agrícola sin ningún tratamiento. Si el volumen que ahora se inyecta

la red fuera utilizado dos veces, no tendríamos que sobreexplotar el acuífero del Valle de México, la ciudad no se hundiría, las redes que distribuyen el agua tampoco se quebrarían, ni se agrietaría el subsuelo lo que está facilitando la penetración de aguas residuales que contaminan los acuíferos.

En este trabajo de investigación se realizó el estudio sobre el efecto de dos procesos fisicoquímicos sobre un efluente secundario de una planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de México D.F., la cual recibe agua residual del sistema de drenaje, con el fin de determinar la eficiencia de los dos procesos en la remoción de materia orgánica, así como también se analizó el comportamiento del flux en la membrana de ultrafiltración.

El trabajo se divide en cinco capítulos, el primer capítulo consiste en una descripción de los antecedentes sobre el abastecimiento de agua en la ciudad de México y otros aspectos de interés, en el segundo capítulo se describe lo concerniente al marco teórico en los temas de oxidación química con ozono y a la ultrafiltración, en el tercer capítulo se explica detalladamente la metodología y equipos utilizados en el trabajo, en el capítulo cuatro se presentan los resultados de la investigación con su respectivo análisis y finalmente en el capítulo cinco se redactan las conclusiones de este trabajo con las respectivas recomendaciones.

JUSTIFICACIÓN

Debido a la creciente demanda de agua subterránea y a su lenta renovación, en los últimos 100 años la reserva de acuíferos fue sobreexplotada y sigue disminuyendo al ritmo actual a una tasa de 5,400 millones de m³/año. Durante las primeras décadas de sobreexplotación se presentó un gran impacto ecológico representado en la disminución de manantiales, desaparición de lagos y humedales, eliminación de vegetación nativa y pérdida de ecosistemas.

Para solucionar el problema del abastecimiento de agua, muchas ciudades importantes se abastecen minando los acuíferos subyacentes, también se ha incrementado la importación de agua de cuencas adyacentes, sin embargo estas soluciones han resultado insuficientes.

Actualmente el volumen de agua que se extrae de los acuíferos en la ciudad de México es mayor que el que se recupera naturalmente por la lluvia, cada segundo se extraen del subsuelo 45 m³ y sólo se reponen 25 m³. En consecuencia se compacta el suelo y propicia el hundimiento de 10 centímetros por año, aunque en ciertos lugares como Xochimilco, Tláhuac, Ecatepec, Nezahualcóyotl y Chalco el suelo se ha compactado hasta 40 centímetros en tan solo un año; por ello el agua que se extrae contiene cada vez mayor cantidad de minerales, que la hacen de menor calidad. Registros estadísticos muestran hundimientos anuales de 15 a 25 cm alrededor del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México.

En las zonas de acuíferos que han sido sobreexplotados se generan un gran número de problemas sociales, que afectan la calidad de vida de la población. A medida que la población crece se continuará con la necesidad de tener fuentes de agua disponibles para todos los tipos de uso; por lo tanto es necesario dar la importancia que se merece al tema de la administración racional de la reserva del agua subterránea, para lo cual hay que tener en cuenta aspectos como el reuso, estrategias para la estabilización de acuíferos sobreexplotados y la aplicación de la tecnología de recarga artificial para preservar e incrementar la reserva de agua subterránea.

Es así como la recarga artificial se convierte en un método a tener en cuenta para solucionar todos estos problemas. Es un método que se aplica con varios objetivos como el de atenuar el efecto de la sobreexplotación, prevenir el abatimiento de los niveles de agua, asentamientos del terreno e intrusión salina, dar tratamiento natural al agua en el subsuelo, manejar los acuíferos como vasos de almacenamiento y regulación y utilizar el subsuelo como una red de acueductos. Desde el punto de vista técnico la recarga de un acuífero, depende en gran parte de que exista agua para tal fin, de que la calidad del agua de recarga no afecte la calidad del agua subterránea nativa o que sea factible su tratamiento para prevenir el riesgo de contaminación.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto del ozono y la ultrafiltración en la transformación y/o remoción de la materia orgánica de un efluente secundario, con fines de recarga.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar la eficiencia en la transferencia de ozono, considerando dos concentraciones de ozono en fase gaseosa y dos tiempos de contacto.
- Evaluar el efecto de las variables concentración de ozono en fase gaseosa y tiempo de contacto para el caso de estudio, en la remoción y transformación de materia orgánica.
- Evaluar las condiciones de operación (presión, flux) de la membrana de ultrafiltración.
- Realizar el análisis estadístico de la información e identificar las variables que afectan el proceso.
- Estimar el costo de la aplicación de ozono y de la ultrafiltración.

Antecedentes

1.1 Fuentes de abastecimiento de agua potable en el Valle de México

En la zona metropolitana de la Ciudad de México viven aproximadamente 18.5 millones de habitantes, de los cuales 9 millones residen en el Distrito Federal. Se requieren 59 m³/s para cubrir el 98% de las tomas domiciliarias en el D.F. y 90% en los 17 municipios conurbados del Estado de México. En el D.F. se distribuyen 35.4 m³/s, de los cuales el 69% provienen de fuentes subterráneas: 55% del acuífero del Valle de México y 14% del Acuífero del Lerma. El 31% restante corresponde a fuentes superficiales, básicamente de la Cuenca del río Cutzamala (Jiménez, 2001).

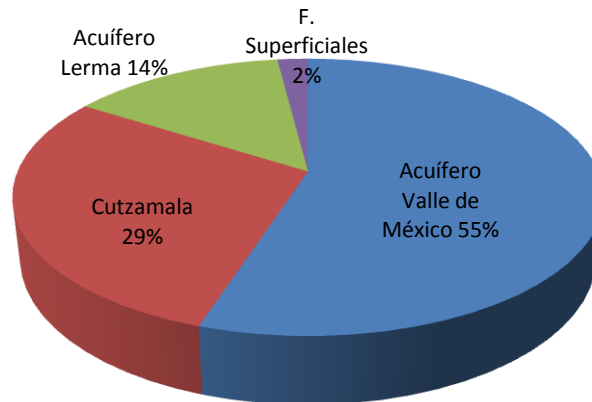


Figura 1.1 Fuentes de suministro de agua en el Estado de México (Jiménez, 2001)

1.2 Sobreexplotación del acuífero del Valle de México

El acuífero de la Ciudad de México se encuentra ubicado al sur poniente de la cuenca del Valle de México, ocupando el 17% de la superficie de la cuenca, de un total de 1,437 km² (CNA, 2000).

La ciudad de México y su área conurbada dependen principalmente para el suministro de agua potable, de la explotación del acuífero; realizando extracciones a una profundidad entre 100 y 400 metros a razón de 10 m³/s.

La excesiva extracción de agua subterránea para consumo de la ciudad ha superado ya los niveles de recarga natural, que se da por medio de la precipitación pluvial e infiltración a través del subsuelo, ocasionando problemas ambientales, estructurales y sociales, afectación de las redes de distribución y drenaje, que se traducen en constantes fugas y pérdidas, daños estructurales en casas de habitación y edificios y un detrimento en la calidad del agua que se extrae del subsuelo (CNA, 2000).

El agua que se extrae se usa de la siguiente forma: 67% es destinada a fuentes domésticas, el 17% es destinado a industrias y el 16% se destina a comercios y servicios (Jiménez, 2001).

1.3 Recarga natural del acuífero

La recarga natural del acuífero se da principalmente en suelos de conservación del Valle de México, al sur poniente de la entidad, el cual recibe en promedio un volumen de lluvia de 1,674 millones de metros cúbicos por año (Mm³/año), aunque el 60.5% se pierde por evapotranspiración. Se estima que aproximadamente 321 Mm³/año (19.2%) se quedan en una percolación somera, dando lugar al nacimiento de manantiales, participando eventualmente en el ciclo de recarga y/o en aprovechamiento por los ecosistemas. Solo 209 Mm³/año (12.5%) alcanzan una percolación profunda que permiten recargar los acuíferos. Otros 23 Mm³/año (1.4%) aparecen como manantiales los cuales son captados para incorporarlos a la red de distribución. Finalmente 107 Mm³/año (6.4%) escurren por las cañadas y terminan finalmente en el drenaje urbano (CNA, 2000).

1.4 Recarga artificial del acuífero

Algo muy importante a considerar en el uso de agua tratada para recarga, es la presencia de agentes químicos y microbiológicos que pueden ser dañinos para la salud humana y para el ambiente. Cuatro son los factores de calidad que son prioritarios en el agua de recarga: los patógenos, el contenido mineral, los metales pesados y los compuestos orgánicos traça. Los microorganismos patógenos y los compuestos orgánicos traça son de

particular interés en la recarga artificial de acuíferos que son utilizados para el suministro público (WHO, 2003).

La recarga artificial es una técnica utilizada en varios países Europeos, Estados Unidos y Australia. En Europa se han ensayado distintos esquemas de recarga artificial desde 1870 en Alemania, y desde 1879 en Holanda; el número de experiencias hasta el año 2002 está entre setenta y ochenta (Fernandez et al, 2005).

1.5 Tratamiento y reuso de aguas residuales en la Ciudad de México D.F.

La ciudad de México produce aproximadamente 24 m³/s de aguas residuales, 65% son de origen doméstico, 20% del sector industrial y 15% del sector de servicios y comercios; de este flujo generado sólo el 26% recibe algún tipo de tratamiento. Existen 27 plantas de tratamiento en la ciudad. En la tabla 1.1 se listan algunas de las principales plantas de tratamiento que actualmente funcionan, indicando el proceso de tratamiento empleado y reuso de su efluente. El 83% del agua tratada se destina para riego de áreas verdes y actividades recreativas, el 10% se utiliza en la industria, el 5% para el riego agrícola y el 2% para usos comerciales (Secretaria del Medio Ambiente D.F., 2004).

Tabla 1.1 Plantas municipales de tratamiento de aguas residuales en operación en el Distrito Federal (Adaptada de Comisión Nacional del Agua, 2007)

Nombre Ubicación	Capacidad Instalada (L/s)	Proceso de Tratamiento	Reúso del efluente
Coyoacán	400	Lodos Activados	Mantener el nivel de los canales de Xochimilco, riego de áreas verdes en Coyoacán, Benito Juárez y Alvaro Obregón
San Juan de Aragón Gustavo A. Madero	500	Lodos Activados	Áreas verdes, llenado de Lago de Aragón y Alameda Oriente
CD. Deportiva Iztacalco	230	Lodos Activados	Áreas verdes e industrial

Cerro de la Estrella Iztapalapa	4,000	Lodos Activados	Riego agrícola en Tláhuac, Mixquic y San Juan de Ixtayopan, mantener nivel de canales de Xochimilco
Bosques de las lomas Miguel Hidalgo	55	Lodos Activados	Áreas verdes Delegación Miguel Hidalgo
Lomas de Chapultepec Miguel Hidalgo	160	Lodos Activados	Áreas verdes de la 1ª y 2ª sección del bosque de Chapultepec. Llenado de lagos y corredor turístico de Paseo de la Reforma
Parque el Llano Tlahuac	250	Lodos Activados	Riego agrícola y recarga de Acuífero
San Lorenzo Tlahuac	225	Lodos Activados	Llenado de canales y recarga de Acuífero
San Luis Tlaxial Temalco Xochimilco	150	Lodos Activados	Agrícola y áreas verdes

1.6 Normatividad oficial para la recarga de acuíferos

La normatividad oficial Mexicana para recarga de acuíferos es la siguiente:

NOM-014-CONAGUA-2003

La cual establece los requisitos que deben cumplir: la calidad del agua, la operación y el monitoreo utilizados en los sistemas de recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada.

El numeral 6.3 de esta norma establece los requisitos que el agua debe cumplir para recarga.

Tabla 1.2 Calidad del Agua Residual Tratada para Recarga Artificial
(NOM 014-CONAGUA-2003)

Tipo de contaminante	Tipos de Sistemas de Recarga	
	Superficial / Subsuperficial	Directa
Microorganismos patógenos	Remoción o inactivación de microorganismos entero patógenos	Remoción o inactivación total de microorganismos entero patógenos
Contaminantes regulados por norma	Límites permisibles NOM-127-SSA1-1994	Límites permisibles NOM-127-SSA1-1994
Contaminantes no regulados por norma	$DBO_5 \leq 30\text{mg/L}$, $COT = 16\text{ mg/L}$	$COT \leq 1\text{mg/L}$

NOM-015-CONAGUA-2007

Infiltración artificial de agua a los acuíferos. Características y especificaciones de las obras y del agua.

1.7 Aplicaciones del ozono y de la ultrafiltración en el tratamiento de aguas residuales con fines de reuso.

El ozono es un poderoso oxidante que preferiblemente oxida las moléculas que contienen dobles enlaces carbono carbono y alcoholes aromáticos. Este puede romper la estructura de la materia orgánica natural y propiciar la transformación de los componentes de alto peso molecular en otros de bajo peso, como ácidos carboxílicos, carbohidratos y aminoácidos (Wang Xudong et al., 2007).

La oxidación química degrada componentes orgánicos y no produce ningún residuo adicional. En esta clase de oxidación, el oxidante más común es el ozono, peróxido de hidrógeno, radiación UV y procesos avanzados de oxidación. Específicamente el ozono es un poderoso oxidante para el agua y las aguas residuales, una vez disuelto en el agua reacciona con una gran cantidad de componentes orgánicos de dos formas diferentes: por oxidación directa como ozono molecular o por una reacción indirecta a través de la

formación de oxidantes secundarios como radicales libres, especialmente radicales hidroxilos. Los tratamientos fisicoquímicos son ampliamente utilizados en la actualidad, debido a su bajo costo y a su bajo impacto en el ambiente; al igual que la tecnología de membranas ha incrementado en los últimos tiempos, con la constante reducción de costos y la extensión de las posibilidades de aplicación (Benítez et al., 2008).

El uso de la ozonación en el tratamiento de aguas reduce la formación de trihalometanos y ácidos haloacéticos. Ayuda a la formación de mayor cantidad de componentes polares e incrementa la biodegradabilidad. Por otro lado la filtración con membranas es un método efectivo para remover partículas, microorganismos y materia orgánica de las aguas. Comparado con métodos tradicionales la filtración con membranas mejora la calidad del agua, minimiza la cantidad de desinfectante, son más compactas, tienen un mayor control operacional y de mantenimiento y generan menos cantidad de lodos (Karnik B.S. et al., 2005).

La tecnología de membranas es una alternativa potencial para la recuperación del efluente de plantas de tratamiento de aguas residuales. Entre sus principales beneficios están la alta tasa de remoción y los bajos requerimientos de terreno. Sin embargo con sistemas de membranas, se requiere un pretratamiento ya que pueden ser bloqueadas por muchas clases de sustancias presentes en el influente, especialmente para los sistemas de ósmosis inversa (You Shu-Hai et al., 2007).

Los procesos de membranas son considerados hoy en día para la aplicación en tratamiento de agua y aguas residuales, muestran muchas ventajas como bajo costo de energía y baja inversión de capital. Con las membranas se pueden remover contaminantes orgánicos e inorgánicos, la baja permeabilidad causada por el taponamiento de la membrana es uno de los puntos de atención en la tecnología de separación de membranas (Wang Shutao et al., 2008).

Ernst et al., (1998) publicaron resultados relacionados con la aplicación de ozono en el tratamiento de un efluente biológico terciario en combinación con nanofiltración con fines de reúso en la recarga de acuíferos. En esta combinación el ozono es utilizado para oxidar la materia orgánica remanente del proceso de nanofiltración, con el propósito de incrementar la biodegradabilidad del efluente, para su disposición o tratamiento posterior.

Con un consumo de 1.7 mgO₃/mg DQO se logró incrementar de manera importante la asimilación de dicha materia por los microorganismos.

Tanaka et al., (2001) analizaron la eficiencia de la oxidación química en materia orgánica contenida en un efluente secundario municipal, utilizando procesos como ozono, ozono/radiación UV, radiación UV/óxido de titanio (TiO₂). Evaluaron el efecto de la presencia de carbonatos, conocidos como atrapadores de radicales OH, los cuales inhiben la oxidación de materia orgánica. Para los métodos que involucran ozono obtienen una remoción del 50% de DQO en un tiempo de 1 hora (Dosis de ozono=756 mg/L agua), en cuanto a carbono orgánico total (COT), la remoción mayor fue de 80% para el proceso de ozonación/radiación UV después de tres horas de tiempo de contacto sin carbonatos, aunque la presencia de estos reducen el porcentaje de remoción en un 30%.

Bataller et al., (2005) presentaron resultados a nivel laboratorio del tratamiento de un efluente secundario con ozono. En este estudio se evaluó el efecto de la dosis aplicada y tiempo de contacto sobre el parámetro de calidad de aguas residuales DQO. La remoción de DQO fue del 50% aplicando una dosis de 53.3 mg O₃/L agua en un tiempo de contacto de 10 minutos.

Karnik B.S. et al. (2005) analizaron el efecto combinado de la ozonación y la ultrafiltración en la remoción de materia orgánica natural de una fuente superficial. El uso de ozonación antes de la filtración reduce el ensuciamiento de la membrana e incrementa el flujo de permeado. Utilizaron un flujo de agua de 2.75 L/min, flujo de ozono de 100mL/min y una dosis de ozono de 2.5mg/L. Como resultado obtuvieron que la ozonación/filtración produjo una remoción superior al 50% en la concentración de carbono orgánico disuelto (COD).

Lee C.W. et al., (2007) evaluaron el efecto de un proceso híbrido de ultrafiltración y coagulación, para el reuso de un efluente secundario. Las partículas de tamaño 0.2 a 1.2 μm causaban un impacto significativo en el ensuciamiento de la membrana. La ultrafiltración se llevo a cabo a una presión constante de 1bar, obteniendo una reducción del Flux del 32% para la primera hora de operación.

You Shu-Hai et al., (2007) estudiaron el mecanismo de la remoción de contaminantes que causan el taponamiento de membranas de ultrafiltración con ozono, empleando un efluente terciario. Su estudio concluyó que sin ozonación el flujo de permeado disminuía en un 40% después de una hora de operación pero con ozonación el flujo de permeado se mantenía en un 90% del flujo inicial. Se mantuvo el flujo de gas en 8.79 mg/min y el contenido de ozono residual en el efluente se mantuvo en 4.02mg/L.

Barredo Damas et al., (2005) analizaron el proceso de ozonación de aguas residuales de la industria textil seguida de un proceso de tratamiento fisicoquímico. La ozonación se llevo a cabo en un recipiente de 25 litros con una producción de ozono de 1gO₃/h con una duración de cada experimento de 30 y 60 minutos. El experimento de coagulación fue desarrollado con Al₂O₃ al 12%, con un tiempo de mezcla rápida de 3 minutos, posteriormente a 30 rpm durante 15 minutos. Para el proceso de 30 minutos se observo que la Demanda Química de Oxígeno (DQO) se redujo en un 58% y la Turbiedad se redujo en un 95%, para el proceso a 60 minutos los resultados de remoción en los parámetros anteriores resultaron ser iguales.

Moza Sylwia et al., (2006) investigaron la aplicación de la ozonación y la ultrafiltración en el tratamiento de agua superficial. Los experimentos de ultrafiltración fueron desarrollados a una presión de 0.3 MPa con un flujo de alimentación de 60L/h y las dosis de ozono utilizadas fueron de 1 a 3 mg/L. El mejor resultado de tratamiento resultó con una dosis de ozono de 2 mg/L, con una remoción total en el parámetro densidad óptica que se mide a una absorbancia UV₂₅₄ y una remoción de carbono orgánico total (COT) del 96%.

Wang Xudong et al. (2007) estudiaron el efecto de la preozonación de un efluente secundario en el taponamiento de membranas de ultrafiltración. La dosis de ozono aplicada fue de 20mg/L y el tiempo de contacto de ozono fue de 1, 5, 10 y 20 minutos. El carbono orgánico total (COT) fue reducido con el incremento del tiempo de contacto, la concentración de este parámetro bajó de 9.44 a 4.7 mg/L en 20 minutos. El parámetro UV₂₅₄ es un índice para evaluar las sustancias orgánicas insaturadas que usualmente son hidrocarburos aromáticos disueltos, sustancias orgánicas carbonílicas que incluyen ácidos húmicos y presentó una remoción del 64% para un periodo de contacto de 5 minutos.

Benítez et al., (2008) analizaron la ozonación y la filtración de membranas para el tratamiento de aguas residuales de la industria del corcho. Dos esquemas se estudiaron: primero la ozonación seguida de una etapa de ultrafiltración (UF); y el segundo una filtración con membrana seguida de la oxidación química con ozono. El ozono fue generado a una presión de 4.7 kPa equivalente a 0.05mgO₃/mg DQO, el gas fue alimentado al tanque de reacción a un flujo constante de 40L/h. En la ozonación/UF se lograron remociones del 100% en color, 90% en Absorbancia a 254 nm y 42-57% en Demanda química de Oxígeno (DQO). En la filtración/oxidación química se alcanzó una remoción del 90% en color y en Absorbancia a 254 nm y una remoción del 80% en Demanda química de Oxígeno (DQO).

Wang Shutao et al., (2008) estudiaron el proceso de ozonación y biofiltración en un efluente secundario. Emplearon una dosis de ozono de 10mg/L y un tiempo de contacto de 4 minutos. Durante la operación se observó que la ozonación mejora la biodegradabilidad del efluente secundario. Los resultados mostraron eficiencias en la remoción de Carbono Orgánico Disuelto (COD), Nitrógeno amoniacal, Carbono orgánico total (COT), UV 254nm y color de 58, 90, 25, 75 y 90% respectivamente.

CAPÍTULO 2

Marco Teórico

2.1 Oxidación química con ozono

El ozono fue descubierto en 1840 cuando el científico alemán Schonbein nombró la sustancia con el nombre griego “ozein”, que significa “oler”, debido a su olor característico. Aunque fue descubierto en esta fecha se requirieron cerca de 50 años para que los científicos conocieran las propiedades biocidas de este oxidante.

El ozono fue empleado por primera vez en Oudsoorn Holanda en el tratamiento de agua para consumo humano en 1893 a nivel planta piloto. En 1906 la planta de Bon Voyage en Niza, Francia, instaló la oxidación con ozono para desinfectar agua superficial a fin de asegurar una limpieza bacteriana sin introducir olores y sabores al agua natural (Rice 2002); dicho método fue implementado en plantas que se construyeron posteriormente en este lugar y consecuencia de ello, Niza fue nombrada “lugar de nacimiento del ozono” como sistema de tratamiento de agua potable. Hacia 1970, las tres plantas de tratamiento existentes fueron reemplazadas por una de grandes dimensiones la cual sigue utilizando ozono. A partir de esta fecha, el uso de este oxidante en la potabilización de agua siguió creciendo de manera importante. A comienzos del siglo XX, el ozono ya era utilizado en todo el mundo en más de 3000 plantas con una amplia gama de aplicaciones. (Rice, 2002).

En el caso particular del tratamiento de aguas el ozono ha sido aplicado con los siguientes fines (Langlais, 1991):

- Desinfección
- Oxidación de compuestos que imparten color, sabor y olor al agua
- Como ayuda de la coagulación y filtración
- Oxidación de hierro y manganeso
- Oxidación de compuestos orgánicos (fenoles, cianuro, plaguicidas, hidrocarburos etc)
- Control de precursores de subproductos de desinfección

- Incremento de la biodegradabilidad de la materia orgánica

El ozono es un agente oxidante particularmente poderoso, desde el punto de vista termodinámico y cinético. El ozono ha sido usado para una gran variedad de aplicaciones, incluyendo la remoción de componentes inorgánicos y orgánicos, desinfección y coagulación. En Europa ha sido utilizado desde inicios del siglo XX y se ha establecido que más de 3000 plantas de tratamiento de agua potable y residual utilizan esta tecnología (AWWA, 1990).

El ozono molecular reacciona selectivamente con componentes orgánicos y usualmente no los descompone completamente en dióxido de carbono y agua. Se ha encontrado que componentes orgánicos como los ácidos carboxílicos y aldehídos permanecen después de la ozonación. La remoción total de estos componentes se ha dado en condiciones de procesos avanzados de oxidación con ozono obteniendo una completa oxidación de estos compuestos a dióxido de carbono y agua (AWWA, 1990).

Gracias a su poder oxidante el ozono es altamente efectivo en la inactivación de bacterias, rotavirus, quistes de protozoarios. Es un oxidante de hierro, manganeso y sulfitos. Puede mejorar los procesos de clarificación y la remoción de turbiedad. Es utilizado de manera exitosa, en el control de color, sabor y olor del agua.

2.2 Propiedades del ozono

A condiciones de presión y temperatura estándar el ozono es producido en forma gaseosa, es incoloro con un olor desagradable característico, detectable por el olfato humano a partir de concentraciones de 0.02 a 0.05 ppm (en volumen).

Es aproximadamente 14 veces más soluble que el oxígeno en agua. La solubilidad es influenciada por la presencia de impurezas, como cationes de metales pesados, óxidos metálicos, temperatura y presión, generalmente un aumento de la presión o la disminución de la temperatura eleva la solubilidad del ozono en la fase acuosa.

En aguas muy puras, el ozono tiene una vida media relativamente larga del orden de horas, sin embargo, en aguas que contienen impurezas, como aguas residuales, la vida

media del ozono puede durar solo unos pocos segundos debido a la demanda del ozono por las impurezas propensas a ser oxidadas (Rice, 2002).

Tabla 2.1 Propiedades fisicoquímicas del ozono (Roustan, 2007).

PROPIEDAD	VALOR
Peso molecular	48
Potencial de oxidación a 25°C en solución alcalina	2.07 V
Temperatura crítica	-12.1°C
Presión crítica	5.46 MPa
Densidad crítica	0.436 kg/dm ³
Punto normal de ebullición	-111.9 °C
Punto de fusión	-192.7°C
Densidad del gas (0°C y 1 atm)	1.354 kg/ dm ³
Densidad del líquido	1.354 kg/ dm ³
Densidad del sólido	1.728 kg/ dm ³
Momento dipolar	0.58 D
Propiedades magnéticas	Diamagnético (gas)
	Paramagnético (Líquido)
	Paramagnético (Sólido)
Constante de Henry (agua a 20°C)	4.16 adimensional
Difusividad en el agua (20°C)	10.1 MPa m ³ /kgmol
	1.70x10 ⁻⁹ m ² /s

2.3 Reactividad del ozono con la materia orgánica

La molécula de ozono está compuesta por tres átomos de oxígeno, sus enlaces forman un ángulo de 117.5°, con una longitud de enlace de 0.272Å, representado como una

estructura estabilizada por la resonancia de las cuatro formas siguientes (Roustan, 2007).

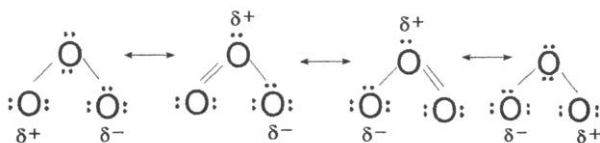


Figura 2.1 Resonancia de la molécula del ozono (Ramírez, 2008).

En medio acuoso el ozono es capaz de oxidar compuestos orgánicos siguiendo dos rutas de reacción. Por reacción directa el ozono ataca en forma molecular (O_3), las reacciones indirectas ocurren por la descomposición del ozono en radicales libres ($OH\cdot$) bajo condiciones de pH básicas o mediante el uso de promotores de las reacciones de descomposición (H_2O_2 , UV, algunos metales).

Ambas reacciones pueden ocurrir de manera simultánea predominando una u otra como resultado de las condiciones de reacción y de los constituyentes químicos presentes en el agua.

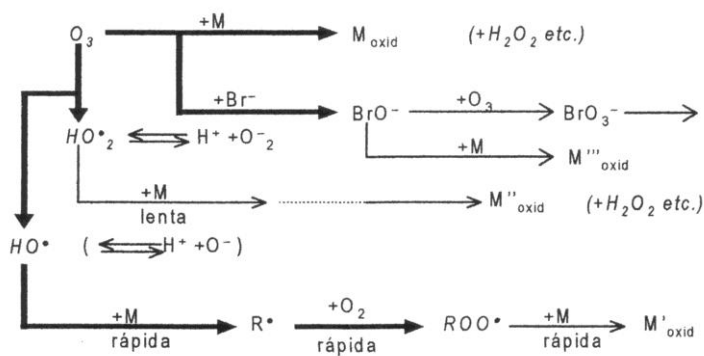


Figura 2.2 Rutas de reacción del ozono con compuestos orgánicos y formación de oxidantes secundarios (Ramírez, 2008).

En las reacciones electrofílicas el ataque del ozono ocurre en sitios de alta densidad electrónica. Los compuestos aromáticos sustituidos con donadores de electrones (OH , NH_2 , y otros similares), los productos nitrogenados y sulfurados son altamente reactivos

con el ozono. En cambio, los que se encuentran sustituidos con grupos aceptores de electrones (-COOH, -NO₂) son poco reactivos.

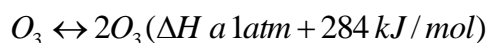
En el caso de las reacciones nucleofílicas, estas se dan particularmente en sitios con deficiencia electrónica, principalmente sobre aquellos carbonos con grupos aceptores de electrones. En teoría, es posible este tipo de reacción pero en la realidad existen muy pocos ejemplos.

Las reacciones directas de ozono sobre estructuras orgánicas son selectivas a compuestos con enlaces insaturados (aromáticos y alifáticos) y con grupos funcionales específicos. Los subproductos de la ozonación de compuestos orgánicos son generalmente compuestos más polares, los cuales son más solubles en agua, menos volátiles y menos lipofílicos. Sin embargo, el ozono puede desdoblar compuestos orgánicos que contienen grupos olefínicos a cetonas pequeñas y aldehídos (Hoigné et al., 1981).

Los principales productos que se han detectado de la ozonación de compuestos orgánicos y materia natural son compuestos con grupos aldehídos, cetonas y ácidos carboxílicos, en general, susceptibles a una degradación biológica (Monje, 2004).

2.4 Generación de ozono

Debido a que el ozono es una molécula inestable, debe producirse en el lugar en donde se llevará a cabo la aplicación. La formación de ozono es una reacción endotérmica que requiere considerables cantidades de energía para llevarse a cabo de la siguiente forma:

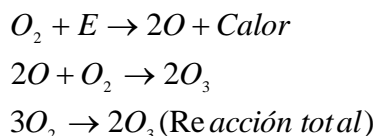


Los tres métodos principales para la generación comercial de ozono son:

- Radiación ultravioleta (UV)
- Corona de descarga
- Electrolisis del agua

En este trabajo se utilizó un equipo cuyo principio de generación se basa en el sistema de corona de descarga por lo cual se describirá este principio.

En este sistema el oxígeno (O₂) se hace pasar a través de un generador de ozono en donde la energía aplicada disocia una molécula de oxígeno, ésta se une con otras dos moléculas de oxígeno para crear dos moléculas de ozono.



La reacción total es de equilibrio, sin embargo, si la temperatura dentro de un generador de ozono excede 35°C, la reacción inversa predomina, por esta razón es indispensable contar con un sistema de enfriamiento para remover el calor liberado durante la reacción.

La generación de ozono por corona de descarga también se conoce como descarga eléctrica silenciosa. Está compuesta por una fuente de poder que proporciona la energía necesaria para llevar a cabo la disociación de oxígeno, una zona de descarga por donde se hace pasar el gas de alimentación, un material dieléctrico para evitar cortocircuitos y un mecanismo de disipación del calor generado como subproducto de la reacción exotérmica de producción del ozono, esto último se hace utilizando una corriente de agua de enfriamiento.

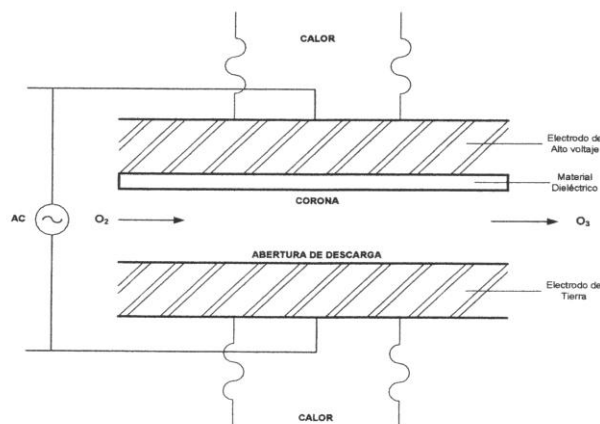


Figura 2.3 Generación de ozono por corona de descarga (Ramírez, 2008).

El sistema eléctrico del generador debe controlar el rango de energía requerido para cada célula de generación sin exponer el sistema y el ambiente circundante a voltajes excesivos. Comercialmente son utilizados dos tipos básicos de geometría de la corona, cilindros concéntricos y placas paralelas. Este diseño de generador también se clasifica en el rango de frecuencias a las cuales trabajan:

Frecuencia baja	50-60 Hertz
Frecuencia media	60 - 1000 Hertz
Frecuencia alta	> 1000 Hertz hasta cerca de 2000 Hertz

2.5 Componentes básicos del sistema de ozonación

El sistema de ozonación debe ser capaz de producir las cantidades requeridas de oxidante, e introducirlas al sistema de contacto para un tratamiento efectivo de los contaminantes presentes en el agua. De igual manera, se debe prestar atención a los lineamientos de seguridad y a la naturaleza corrosiva del ozono en aire o en solución (Rice, 2002).

A continuación se presentan los componentes básicos de un sistema de ozonación.

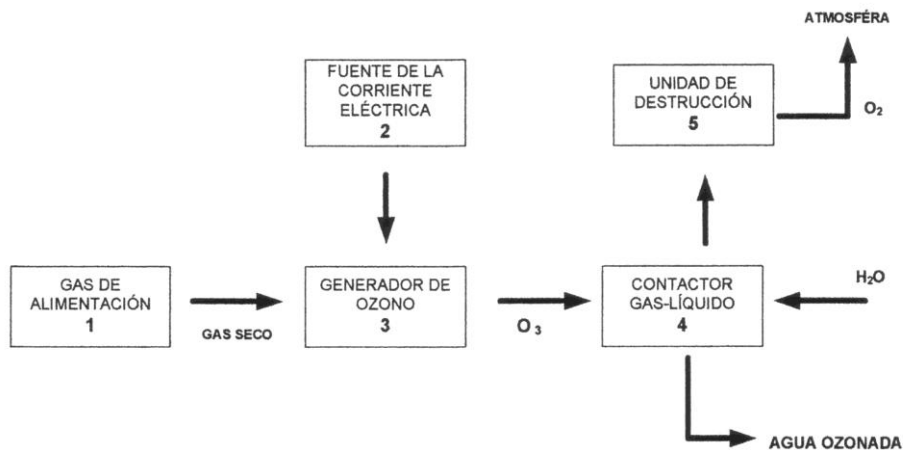


Figura 2.4 Componentes de un sistema de generación de ozono (Rice, 2002).

Gas de alimentación: puede ser aire, oxígeno de alta pureza, o aire enriquecido con oxígeno, a fin de asegurar un gas de alta calidad, libre de aceites, partículas y humedad.

Fuente de corriente eléctrica: ésta provee los requerimientos de energía para convertir el oxígeno en ozono, siendo esta la principal actividad en el consumo de electricidad, así como el suministro al equipo auxiliar del sistema de ozonación.

Tabla 2.2 Requerimientos típicos de energía para un sistema de ozonación
(Metcalf y Eddy, 2003).

Componente	kWh / kg ozono
Preparación del gas de alimentación	4.4 - 6.6
Generación de ozono:	
Aire	13.2 - 19.8
Oxígeno puro	6.6 - 13.2
Contacto ozono - agua	2.2 - 6.6
Usos restantes (Destrucción, controles instrumentos, etc)	1.2 - 2.2

Generador de ozono: equipo donde se produce el ozono.

Contactador gas-líquido: donde el ozono se inyecta al agua, por medio de difusores porosos en el fondo del equipo con el fin de entrar en contacto íntimo con la materia contaminante para su oxidación y/o desinfección.

Unidad de destrucción de ozono: mediante la cual el ozono remanente proveniente del equipo de contacto, se destruye convirtiéndolo en oxígeno, antes de liberarlo a la atmósfera, en algunos casos el oxígeno generado se recircula para producir ozono. En el capítulo 3 se describe el equipo de ozonación utilizado.

2.6 Cinética de reacción

La cinética química es el estudio de la velocidad y el mecanismo por medio de los cuales una especie química se transforma en otra (Smith, 1998). La velocidad es la masa en moles de un producto formado o de un reactante consumido por unidad de tiempo. El

mecanismo es la secuencia de eventos químicos individuales cuyo resultado global produce la reacción observada (Smith, 1998).

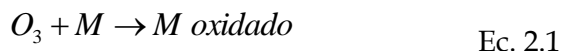
La velocidad de reacción puede ser afectada por diversas variables, como la temperatura, presión y la composición química (Levenspiel, 1998). Dado que el modo de expresar las leyes cinéticas depende del tipo de reacción que se va a efectuar, las reacciones químicas se clasifican de acuerdo con el número y el tipo de fases involucradas en dos grandes grupos: sistemas homogéneos y sistemas heterogéneos.

Una reacción es homogénea si se efectúa en una sola fase y es heterogénea si al menos se requiere la presencia de dos fases para que transcurra a la velocidad que lo hace (Levenspiel, 1998); siendo indiferente que la reacción heterogénea tenga lugar en una, dos o más fases, o en la interfase; lo que interesa es que se necesitan al menos dos fases para que la reacción transcurra del modo que lo hace.

2.6.1 Cinética de las reacciones de oxidación con ozono

La cinética de reacción del ozono con componentes orgánicos e inorgánicos es típicamente, de segundo orden; de primer orden con respecto a la concentración del ozono y a cada reactante (Beltrán Heredia et al., 2001).

Para la reacción general del ozono con un componente orgánico o inorgánico (M).



La desaparición de M en presencia de una concentración determinada de ozono $[O_3]$ se puede escribir como:

$$-\frac{d[M]}{dt} = k_M [M][O_3] \quad \text{Ec. 2.2}$$

Si consideramos un reactor batch o de flujo pistón la velocidad de eliminación de M es igual al logaritmo de la concentración residual relativa de M, que disminuye en forma lineal con el tiempo t, durante el cual una concentración de ozono dada está presente:

$$-Ln \frac{[M]}{[M]_0} = k_M [O_3] t \quad \text{Ec. 2.3}$$

Para aplicaciones prácticas se debe considerar que la eficiencia de la reacción directa del ozono con los contaminantes solamente puede definirse cuando el decremento relativo en la concentración de este último, está basado en la medición del ozono que actúa durante el tiempo establecido del proceso. Si la concentración de contaminantes [M] en el agua se encuentra en mayor proporción o en exceso con respecto al ozono, esta puede considerarse como un valor constante, por lo tanto, la velocidad de reacción puede simplificarse a una cinética de pseudo-primer orden con respecto a la concentración de M (Levenspiel, 1998; Benítez, 2004).

$$Ln \frac{[M]}{[M]_0} = -kt \quad \text{Ec 2.4}$$

Donde k es la constante cinética de pseudo-primer orden, $[M]_0$ es la concentración de la materia contaminante al tiempo inicial, [M] la concentración a un tiempo de ozonación determinado t.

2.7 Tecnología de membranas

Una membrana es una fase permeable o semi-permeable, frecuentemente un sólido polimérico que restringe el movimiento de ciertas especies. Esta fase agregada es esencialmente una barrera entre la corriente de alimentación, que contiene las especies por separar y la corriente de producto. Esta membrana o barrera controla las tasas relativas de transporte de varias especies a través de sí misma y por ello, como con todas las separaciones, da un producto reducido en ciertos componentes y un segundo producto concentrado en estos componentes.

Los procesos de membranas, conocidos como procesos avanzados, permiten la remoción de contaminantes específicos. En particular, la tecnología de membranas ha simplificado y compactado los sistemas de tratamiento y ha hecho posible, la separación de compuestos orgánicos de bajo peso molecular que se presentan en muy bajas concentraciones en las

aguas tratadas o en fuentes no convencionales de suministro y que se relacionan con serios problemas de salud.

Los procesos de membranas son altamente utilizados para la aplicación en el tratamiento de agua y agua residual, mostrando grandes ventajas en su uso, como un bajo costo de energía, baja inversión de capital y un alto rendimiento y duración de la membrana con un bajo nivel de mantenimiento.

2.7.1 Clasificación de las membranas

El funcionamiento de la membrana depende de su estructura. Ésta determina esencialmente los mecanismos de separación y por tanto, la aplicación de la membrana.

En general se pueden clasificar de acuerdo con los siguientes criterios:

2.7.1.1 Mecanismo de separación

Fundamentalmente hay tres tipos de mecanismos de separación que dependen de alguna propiedad específica de los componentes que serán removidos o retenidos selectivamente por la membrana:

- Separación fundamentada en grandes diferencias de tamaño. Las operaciones son Microfiltración, Ultrafiltración y Diálisis.
- Separación basada en las diferencias de solubilidad y difusividad de los materiales en la membrana.
- Separación teniendo en cuenta la diferencia de carga en las especies a separar.

La clasificación de las membranas basada en mecanismos de separación reduce a tres las clases principales: membranas porosas (efecto criba), membranas no porosas o densas (mecanismo solución-difusión) y membranas cargadas eléctricamente (efecto electroquímico) (Aptel y Buckley, 1998).

Membranas porosas

En estas membranas se presentan poros finos de la siguiente forma:

Macroporos, mayores de 50nm

Mesoporos, en el rango de 2 a 50 nm

Microporos, menores de 2 nm

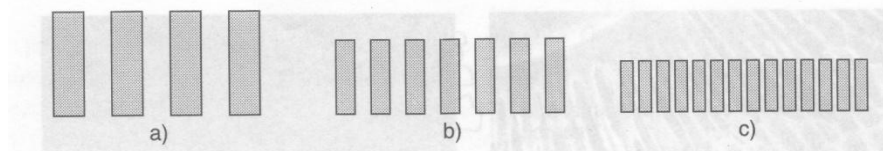


Figura 2.5 Membranas porosas isotrópicas a) macroporos; b) mesoporos; c) microporos (Aptel y Buckley, 1998)

Membranas no porosas

Estas membranas pueden considerarse como medios densos. La difusión de especies tiene lugar en el volumen libre que está presente entre las cadenas macromoleculares del material de la membrana.

Membranas de intercambio iónico

Son un tipo especial de membranas no porosas. Consisten en geles muy hinchados portadores de cargas positivas o negativas. Entonces una membrana con cargas positivas se denomina membrana de intercambio aniónico y una con cargas negativas se llama membrana de intercambio catiónico.

2.7.1.2 Morfología

Las membranas anisotrópicas constan de una capa muy fina, llamada película, soportada por otra capa subyacente más espesa y porosa. La capa pelicular es responsable de las funciones principales de la membrana, ya que el flujo y la selectividad sólo dependen de la estructura de esta capa. Su espesor está en el rango de 0.1 a 0.5 μm . Se pueden distinguir dos tipos de membranas anisotrópicas así:

Membranas asimétricas: son anisotrópicas preparadas con base en un mismo material.

Membranas mixtas: Son anisotrópicas donde la capa superior y la subcapa son de materiales diferentes. Generalmente la capa porosa es una membrana asimétrica.

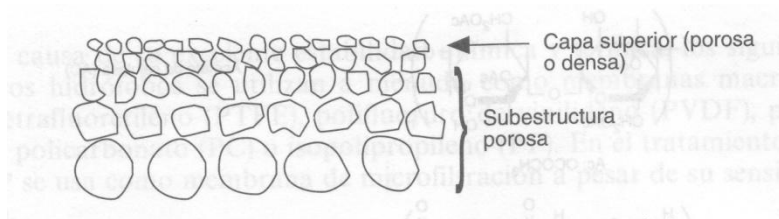


Figura 2.6 Membrana Asimétrica (Aptel y Buckley, 1998).

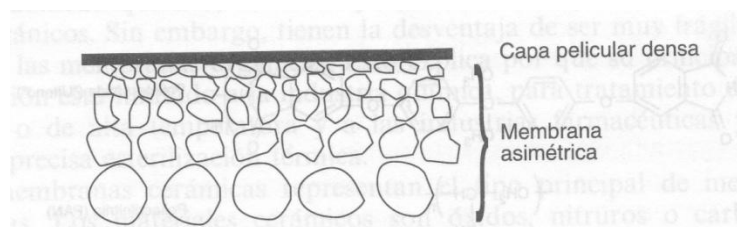


Figura 2.7 Membrana mixta (Aptel y Buckley, 1998).

2.7.1.3 Geometría

Las membranas pueden prepararse en dos formas geométricas: plana y cilíndrica. Con base en las diferencias dimensionales, pueden distinguirse así:

Membranas tubulares con diámetro interno mayor de 3 mm

Membranas tubulares de fibra hueca con diámetro interno menor de 3 mm

Las fibras huecas son geoméricamente las membranas tubulares más pequeñas disponibles, con diámetros exteriores entre 80 y 500 μm .

2.7.1.4 Naturaleza química

Membranas orgánicas

Básicamente todos los polímeros pueden ser utilizados, pero por necesidades de proceso y vida de la membrana, sólo se utiliza en la práctica un número limitado. Los usados más ampliamente son la celulosa y sus derivados. En el tratamiento de agua, las membranas de ésteres de celulosa tienen la ventaja de ser relativamente resistentes al cloro, y a pesar de

su sensibilidad a los ácidos, a la hidrólisis alcalina, a la temperatura y a la degradación biológica, se utilizan ampliamente para desalación, desendurecimiento, desinfección y clarificación.

Membranas inorgánicas

Los materiales inorgánicos generalmente poseen mayor estabilidad química, mecánica y térmica en comparación con los polímeros orgánicos. Sin embargo, tienen la desventaja de ser muy frágiles y más caros que las membranas orgánicas. Esto explica por qué su principal campo de aplicación está limitado a la industria química, para tratamiento de fluidos agresivos o de alta temperatura y las industrias farmacéuticas y lácteas donde se precisa esterilización térmica.

Las membranas cerámicas representan el tipo principal de membranas inorgánicas. Los materiales cerámicos son óxidos, nitruros o carburos de metales, tales como aluminio, zirconio o titanio.

2.7.2 Materiales de Membranas

Los materiales que se usan para fabricar membranas deben tener las siguientes propiedades:

Resistencia química, estabilidad mecánica, estabilidad térmica, alta permeabilidad, alta selectividad y operación estable.

Las membranas que se utilizan en los procesos dirigidos por presión se fabrican de una gran variedad de materiales. Estos incluyen polímeros, cerámicas, vidrio y metales. No todos los materiales se pueden usar en la fabricación de membranas para todos los procesos, por ejemplo, hay membranas de ósmosis inversa y nanofiltración hechas de polímeros, pero el vidrio sólo se puede usar para fabricar membranas de ultrafiltración (Scott y Hughes, 1996).

Tabla 2.3 Materiales y características de aplicación de membranas (Scott y Hughes, 1996).

<i>MATERIAL</i>	<i>APLICACIÓN</i>	<i>CARACTERISTICA</i>
Polisulfonas	Microfiltración	pH operación: 1.5-12
	Ultrafiltración	T max=80°C
		Resistencia media Oxidantes
Acetato de Celulosa	Primera membrana de osmosis	pH operación: 3-7
	Inversa	T max = 30-35°C
	Ultrafiltración	Hidrofílica y biodegradable
Polisulfona sulfonada	Nanofiltración	Alta tolerancia al cloro
Película delgada de Poliamida	Ósmosis inversa	pH operación: 2-12
	Nanofiltración	T max= 80°C
Difluoruro de Polivinilideno		Baja tolerancia cloro libre
	Microfiltración	pH operación: 1.5-12
	Ultrafiltración	T máx=80°C
Cerámica		Resistencia alta oxidantes
	Microfiltración	pH operación: 1-14
	Ultrafiltración	Mayor tiempo de vida
	Nanofiltración	

2.7.3 Procesos de membrana

Los procesos de membrana han sido descritos en distintos libros sobre tratamiento de agua. En sentido amplio se definen como una corriente de alimentación que se divide en dos: permeado y rechazo.

La corriente de alimentación es el agua que ingresa al sistema de filtración para ser purificada, el permeado también conocido como agua producida, es el agua que pasa a través de la membrana (depurada) y finalmente, la corriente que contiene los solutos y partículas separadas se conoce como concentrado, retenido, rechazo o corriente residual.

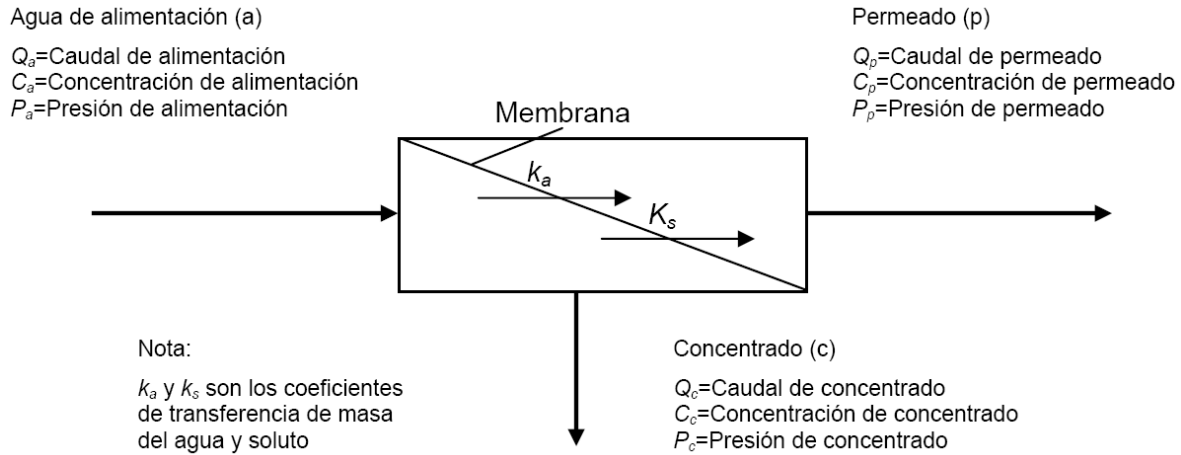


Figura 2.8 Proceso de filtración con membranas (Metcalf y Eddy, 2003).

2.7.4 Membranas de ultrafiltración

Las membranas de Ultrafiltración pueden fabricarse, esencialmente, en dos formas: tubular o plana. Las membranas se realizan normalmente sobre un sustrato de material poroso. El material portador forma parte integrante de la membrana; le da resistencia mecánica, la protege durante la fabricación y subsiguiente manipulación y simplifica la construcción del módulo. Las membranas deben estar soportadas estructuralmente para resistir las presiones a las que se trabaja; la unidad operacional única en la que las membranas están colocadas se llama módulo. Esta unidad operacional consta de: membranas, estructuras de soporte de la presión, puertas o puertos de entrada de la alimentación, distribuidores de caudal y puntos de salida y drenaje del permeado y concentrado.

2.7.4.1 Configuración tubular

Es la configuración más simple en que la membrana se moldea sobre la pared o cara interior de un tubo soporte poroso. Estos tubos tienen diámetros de 6 a 25mm, siendo 13mm la membrana usada más comúnmente en el tratamiento de aguas residuales. Son menos propensas a ensuciarse que las membranas en otras configuraciones.

El diseño del proceso de Ultrafiltración por membranas tubulares fue probablemente el primero en desarrollarse a escala industrial. Los sistemas tubulares cuentan con canales internos relativamente amplios, diámetros de 0.5 " a 1" y longitudes de 2 a 20 pies que son resultado de optimizar el costo energético y el precio de las membranas.

Algunas características de estas membranas son:

Son capaces de manejar partículas de tamaño considerable debido al diámetro relativamente grande de los módulos así como, fluidos con alto contenido de sólidos.

Los equipos con esos diámetros se operan bajo un patrón de flujo turbulento. Las velocidades recomendadas son de 2 a 6 m/s que darán lugar a flujos de 15 a 60 L/min.

La geometría recta permite una fácil limpieza que puede ser efectuada en el sitio de operación por métodos estándar. Estas membranas tienen la mayor relación de área superficial por volumen para cualquier módulo de Ultrafiltración, por lo que dará lugar a grandes requerimientos de espacio para la instalación del equipo.

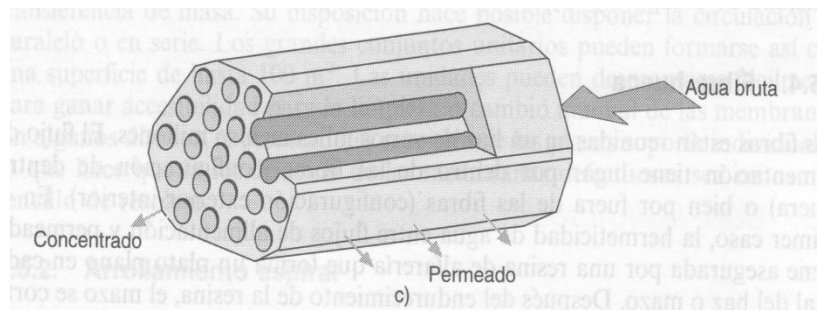


Figura 2.9 Membrana tubular (Aptel y Buckley, 1998).

2.7.4.2 Membranas de Fibra Hueca

La membrana tiene forma de tubo auto-soportado, es decir, su estructura está compuesta de pequeñas fibras de una consistencia rígida. Además, cuenta con una capa densa en la parte interna, por donde es alimentado el líquido.

Cada fibra hueca tiene un diámetro bastante uniforme. Existen diferentes fibras con distintos diámetros que van de 0.19 a 1.25 mm. Las fibras tienen una sección transversal de 200 μ m.

Las principales características de este tipo de membranas son:

Las velocidades recomendadas para la operación de este tipo de membranas se encuentran en el intervalo de 0.5 a 2.5 m/s. Dando como resultado valores de Reynolds entre 500 y 3000, por lo que el patrón de flujo a regir este tipo de sistemas es laminar.

La caída de presión de estos equipos fluctúa entre 5 y 20 psi.

Debido a que se manejan diámetros muy pequeños es fácil que se obstruya el canal. Esto limita notablemente trabajar eficientemente con líquidos de alto contenido de sólidos o partículas grandes.

Este sistema es aplicado a la purificación de agua cuyo contenido de sólidos sea muy bajo, menor al 1%.

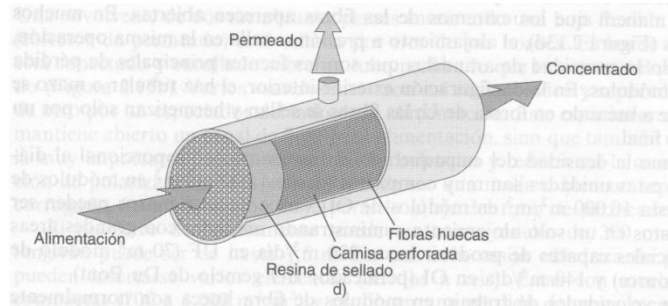


Figura 2.10 Membrana de fibra hueca (Aptel y Buckley, 1998).

2.7.4.3 Membranas de placas

Existen módulos que consisten en una lámina rígida, plana y rectangular fabricada por poliolefinas con membranas selladas por medio de calor por ambos lados. Una rejilla de drenaje se coloca entre la coraza y la placa para de este modo hacer fluir el filtrado.

Algunas características de este tipo de membranas son:

Los canales tienen diámetro de 0.5 a 1 mm y una longitud de 6 a 60 cm, donde rige un patrón de flujo laminar.

El reemplazo de membranas es sencillo, aunque debe tenerse en precaución en acomodar los empaques adecuadamente para evitar fugas.

El fluido viaja a velocidades de 2m/s resultando caídas de presión de 150 psi en celdas de alrededor de 30 placas.

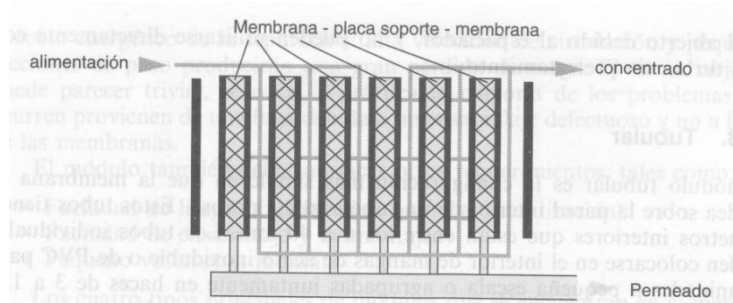


Figura 2.11 Configuración de membrana de placas (Aptel y Buckley, 1998).

2.7.4.4 Membranas en espiral

Es un diseño de los más compactos y económicos en la actualidad. Se diseñan alrededor de láminas planas. Dos hojas planas son colocadas juntas con las caras activas contrapuestas. Están separadas por una malla delgada y unida por tres lados, el restante se coloca alrededor de un tubo perforado. Otro espaciador tipo malla del espesor requerido se coloca en unos de los lados de esta envoltura y el sistema completo se enrolla alrededor de un tubo central en forma de espiral. En ensamblado se coloca dentro de un dispositivo de PVC o acero inoxidable. La corriente de alimentación se bombea a lo largo de la unidad, mientras que el filtrado es forzado a través de la membrana hacia el canal del filtrado y fluye hacia el tubo colector central.

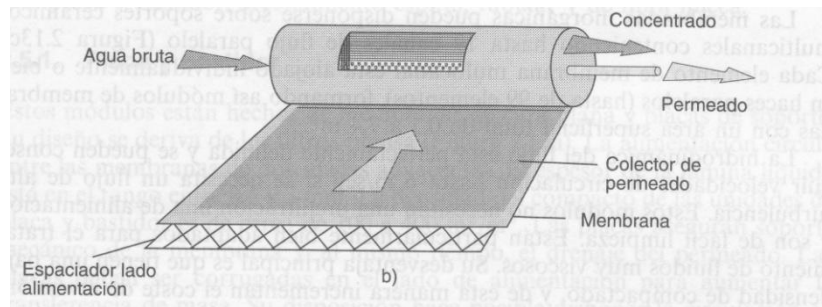


Figura 2.12 Membrana en espiral (Aptel y Buckley, 1998).

2.7.5 Mecanismos de ensuciamiento de membranas

El ensuciamiento se manifiesta con un descenso del Flux con el tiempo de operación de filtración. Las leyes de ensuciamiento de membranas fueron propuestas inicialmente por Hermans y Breedé y han sido utilizadas para estudiar el mecanismo de bloqueo en membranas porosas, filtrando soluciones de microorganismos, proteínas, materia orgánica natural, así como también agua superficial y agua residual. La ventaja de usar ecuaciones lineales es que no se requiere el procesamiento de datos adicionales, solo se utiliza una regresión lineal con la determinación de un coeficiente de correlación, lo cual permite la fácil identificación de los mecanismos de taponamiento. Una clara identificación de los procesos de taponamiento, permite una adecuada elección de la membrana así como también la elección de la estrategia para su limpieza (Tarabara et al., 2008).

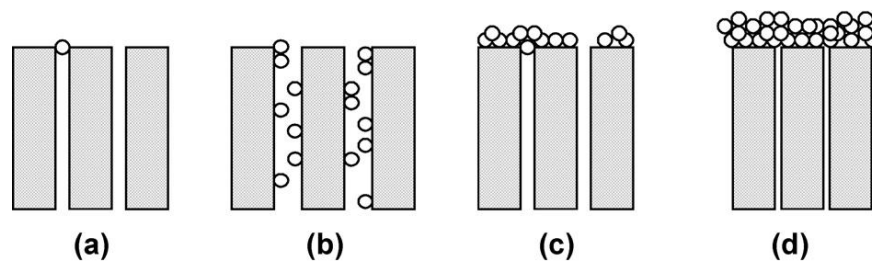


Figura 2.13 Mecanismos de ensuciamiento de membrana a) Bloqueo completo, b) Bloqueo estándar, c) bloqueo intermedio y d) formación de torta (Tarabara et al., 2008).

Entre los mecanismos de ensuciamiento se encuentran bloqueo de poro, formación de la torta, y adsorción de materia orgánica en la superficie de la membrana o en los poros. La complejidad y heterogeneidad de la materia orgánica contribuye a la variación en el

comportamiento del ensuciamiento, haciendo que su explicación sea dispendiosa (Jarusutthirak et al., 2002).

La filtración a presión constante está regida por un descenso rápido del Flux al inicio de la filtración, seguido por un descenso gradual hasta un estado estable o pseudo estable. Cuatro modelos o leyes de bloqueo originalmente desarrolladas por Hermia et al., (1982) han sido usadas para explicar el comportamiento del Flux bajo presión constante, y todos los modelos relacionan el descenso del Flux con el tamaño de las partículas y el tamaño de los poros de la membrana (Ye et al., 2005; Le-Clech et al., 2006).

Tabla 2.4 Leyes de bloqueo de poro (Le-Clech et al., 2006).

LEY	DESCRIP	ECUACIÓN
Formación de torta	Deposición de partículas de tamaño más grande que el tamaño de poro sobre la superficie de la membrana	$t/V = aV + b$
Bloqueo Completo	Oclusión de los poros por partículas. No hay superposición de ellas	$-Ln\left(\frac{J}{J_0}\right) = at + b$
Bloqueo intermedio	Oclusión de los poros por partículas. Hay superposición de ellas.	$\frac{1}{J} = at + b$
Bloqueo Estándar	Deposición de partículas más pequeñas que los poros, en las paredes de los poros, reduciendo su tamaño.	$\frac{t}{V} = at + b$

Donde V es el volumen acumulado de permeado al tiempo t, J es el flux y Jo es el flux inicial.

CAPITULO 3

Metodología

Se realizaron 5 muestreos diferentes del efluente secundario, en la planta de tratamiento de aguas residuales de Cerro de la Estrella, ubicada en la Delegación Iztapalapa de la ciudad de México D.F. El muestreo se realizó durante los meses de Agosto de 2009 y Febrero de 2010, tomando el agua residual en bidones de 20 Litros cada uno. El mismo día del muestreo se procedió a caracterizar el agua residual según los parámetros fisicoquímicos considerados más adelante; la caracterización se realizó en el laboratorio de Bioprocesos e Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería. Posteriormente se realizaron las pruebas con ozono y ultrafiltración teniendo en cuenta el diseño factorial 2^k .

3.1 Caracterización del efluente secundario de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cerro de la Estrella

La caracterización del efluente secundario (Salida de la unidad de filtración) se realizó teniendo en cuenta los siguientes parámetros: pH, Color, Turbiedad, Demanda Química de Oxígeno (DQO), Carbono Orgánico total (COT) y Densidad óptica a 254nm. Todos los análisis se realizaron según lo estipulado en el Standard Methods for the examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA y WEF (1995).

En cuanto a lo estipulado en la NOM-014-CONAGUA-2003 hay que aclarar que en este trabajo no se abarcaron todos los parámetros que esta exige, entre ellos faltó el análisis de microorganismos patógenos y los contemplados en la NOM-127-SSA1-1994; por motivos de tiempo y costo no se realizaron estos análisis. Se podría esperar que el ozono actúe directamente sobre los microorganismos patógenos y los inactive completamente, al igual que remueva en un alto porcentaje los compuestos de carácter orgánico, puesto que en estudios relacionados y en la bibliografía consultada se encontró evidencia de estos resultados.

3.2 Métodos Analíticos

pH

Indica el contenido de iones hidrógeno H^+ o iones hidroxilo OH^- presentes en una muestra de agua. Este parámetro fue medido en forma potenciométrica por medio de un electrodo utilizando un potenciómetro marca Orion modelo 420A.

Turbiedad

La medición de la turbiedad se lleva a cabo mediante la comparación entre la intensidad de la luz dispersada en la muestra y la intensidad registrada en una suspensión de referencia en las mismas condiciones. La medición se realizó en un

turbidímetro HACH modelo 2100P. Se reporta en unidades de turbiedad nefelométricas (UTN).

Color aparente

Este parámetro se determinó mediante el método espectrofotométrico a 455 nm utilizando un espectrofotómetro HACH modelo DR/2000, empleando celdas de vidrio de 25mL y de 2cm de recorrido de luz. Los resultados son expresados en unidades platino cobalto U-PtCo.

Conductividad

La conductividad es una expresión numérica de la capacidad de una solución para transportar una corriente eléctrica, esta capacidad depende de la presencia de iones y de su concentración total. Este parámetro se determinó por medio de un Conductivímetro HACH modelo 44600. Los resultados se reportan en las unidades μ Siemens/cm.

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Es una medida de la concentración de materia orgánica e inorgánica presente en una muestra. En el ensayo, se emplea un agente químico fuertemente oxidante en medio ácido para la determinación del equivalente de oxígeno de la materia orgánica que puede oxidarse. La prueba se llevó a cabo en un digestor HACH modelo 45600 y la

lectura en el espectrofotómetro HACH DR-2000. Los resultados se reportan en las unidades mg/L.

Carbono Orgánico Total (COT)

El carbono orgánico total se determinó mediante espectrofotometría y se analizó el contenido de carbono orgánico disuelto teniendo en cuenta la fracción de la muestra que atraviesa una membrana de 0.45µm. Los resultados se reportan en las unidades mg/L.

UV₂₅₄

Se determinó midiendo la absorbancia a 254 nm. Para ello se utilizó un espectrofotómetro UV-VIS HACH DR-5000.

3.3 Experimentos con membrana

Para la membrana de ultrafiltración se determinaron las mejores condiciones de operación teniendo en cuenta las variables Flux y presión. Según las especificaciones de la membrana se trabajó con presiones de 10 a 50 kPa (1-7 psi).

La membrana se sometió a un tratamiento previo que consistió en:

- Colocar la membrana en un recipiente con agua potable o destilada a una temperatura de no más de 40°C.
- Sumergir la membrana en un recipiente de 2-5 litros de capacidad.
- Conectar la membrana al indicador de presión así como a una corriente de aire, abrir la corriente de aire y dejar pasar, posteriormente conectar el modulo a la bomba y dejar pasar un flujo de 50mL/min, dejar operar el sistema durante 5 minutos.
- Drenar el tanque del proceso.

Posteriormente se realizaron pruebas preliminares de filtración con 4 y 8 horas de duración, en las cuales se observó la variación de la presión y del Flux con el tiempo de operación.

Después se determinó la línea base, teniendo en cuenta un tiempo de operación de 2 horas y las dos presiones de trabajo. La línea base se encontró graficando los datos de tiempo de operación contra Flux (L/h m²).

Una vez determinada la línea base de operación se procedió a realizar la prueba con el efluente sometido a ozonación. Se obtuvieron datos de Flux contra tiempo de operación y se recolectó el permeado para ser analizado según los parámetros definidos en la sección 3.2.

3.4 Arreglo experimental

La unidad de oxidación con ozono está compuesta por el gas de alimentación, el generador de ozono, la unidad de contacto gas-líquido, un analizador de ozono en fase gas y la unidad de destrucción de ozono.

Los experimentos de ozonación se llevaron a cabo en una unidad de oxidación compuesta por separador de aire (Airsep modelo AS-12, USA), un generador de ozono Labo 76 (Emergy Trailigaz, USA) con capacidad de producción de 19 gramos de O₃/h, como unidad de contacto gas líquido se empleó una columna de burbujeo de vidrio de 1.8 litros y una unidad de destrucción catalítica de ozono. El ozono fue inyectado en el fondo de la columna por medio de un difusor de vidrio de placa porosa (10-15 µm de tamaño de poro). El ozono en fase gaseosa fue cuantificado en un analizador TELEDYNE Instrumentes modelo 465H, el ozono que no reaccionó fue destruido en una unidad catalítica para la liberación segura del gas. El ozono contenido en fase acuosa, se determinó mediante el método colorimétrico del reactivo de índigo (Bader et al., 1981).



a



b

Figura 3.1 Equipos empleados en ozonación a) Generador de ozono Labo 76,
b) Analizador de ozono en fase gaseosa

Las pruebas de ultrafiltración se llevaron a cabo en una unidad comercial (Zee Weed-1- Bench Test Unit) compuesta por un modulo de membrana de fibra hueca (ZW-1) sumergible, con dimensiones de 175 mm de altura y 56 mm de longitud, con área superficial de 0.047m², presión máxima transmembrana (PMT) de 62kPa (9 psig) y presión típica de trabajo de 10-50 kPa.

A continuación se presenta el esquema de ozonación utilizado en el trabajo de investigación.

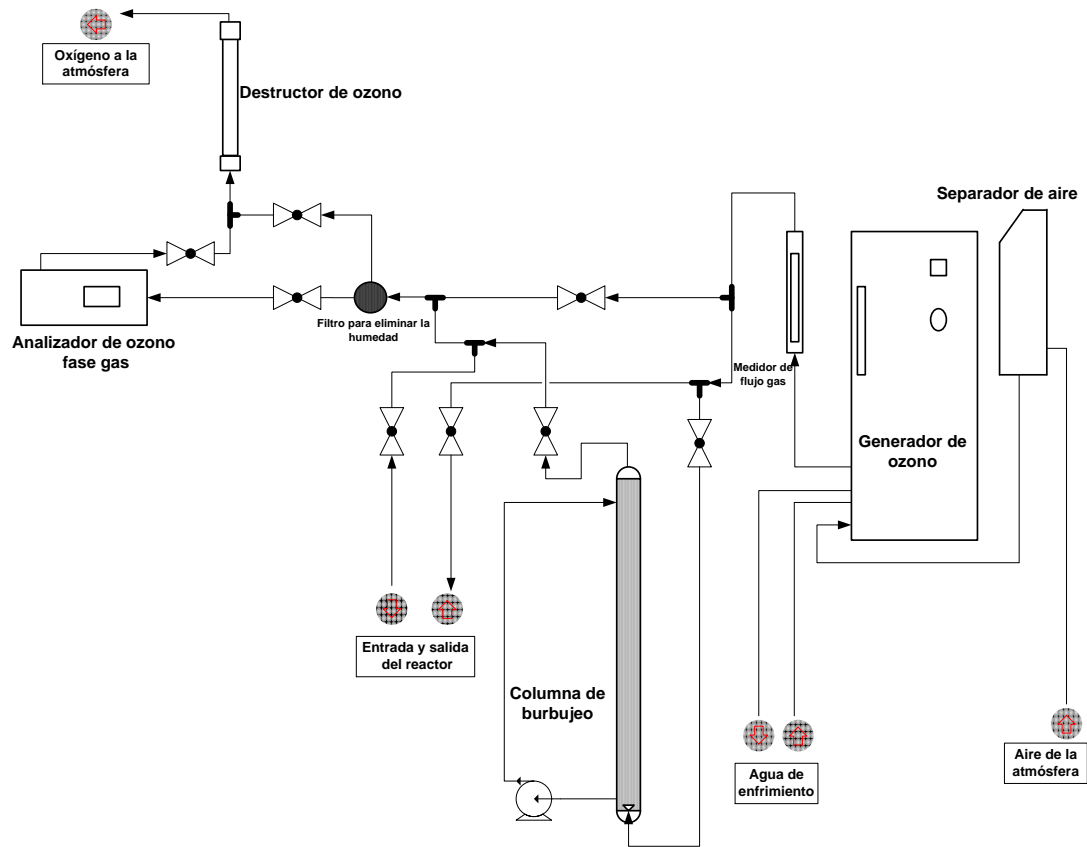


Figura 3.2 Sistema de ozonación

3.5 Pruebas de ozonación y ultrafiltración.

Las pruebas de oxidación se realizaron en lote empleando un reactor de columna de 1.8 litros de volumen. La aplicación de ozono en todas las pruebas se realizó con un gasto de gas de 0.5L/min y con concentraciones de ozono de 5 y 25 mg/L, con tiempos de contacto de 10 y 20 minutos. Las concentraciones de ozono y los tiempos de contacto se eligieron después de realizar la revisión bibliográfica, se encontró que para la calidad de agua del efluente de estudio, era recomendable trabajar con concentraciones de ozono desde 2mg/L hasta concentraciones de 30mg/L, y tiempos de contacto comprendidos entre 1 minuto y 30 minutos. Las pruebas se llevaron a cabo a temperatura ambiente ($20^{\circ}\text{C} \pm 2$) y a la presión atmosférica (0.77 atmósferas) de la Ciudad de México.

Las curvas de demanda de ozono se construyeron a partir del balance de materia realizado teniendo en cuenta las condiciones particulares de operación del proceso de

oxidación, teniendo en cuenta dos concentraciones de ozono en fase gaseosa además de las siguientes variables: concentración de ozono en el gas de entrada ($[O_3]_{ge}$) y salida ($[O_3]_{gs}$) del reactor, concentración de ozono residual en fase acuosa ($[O_3]_l$), volumen del reactor (V_r), flujo de gas (Q_g) y tiempo de contacto (t). De tal forma que se representó en las gráficas el tiempo de ozonación contra la concentración de ozono en mg/L para el gas de entrada, para el gas de salida y para el gas en la fase líquida.

A partir de estas variables se determinó la dosis de ozono aplicada, dosis de ozono transferido, consumo de ozono y la eficiencia de la transferencia empleando las siguientes ecuaciones:

$$Dosis\ O_3\ aplicada : \frac{[O_3]_{ge} * Q_{gas} * t}{V_r} \quad Ec\ 3.1$$

$$Dosis\ O_3\ transferida : \frac{([O_3]_{ge} - [O_3]_{gs}) * Q_{gas} * t}{V_r} \quad Ec\ 3.2$$

$$Consumo\ O_3 : \frac{([O_3]_{ge} - [O_3]_{gs}) * Q_{gas} * t}{V_r} - [O_3]_l \quad Ec\ 3.3$$

$$Eficiencia : \frac{[O_3]_{ge} - [O_3]_{gs}}{[O_3]_{ge}} * 100 \quad Ec\ 3.4$$

Donde:

$[O_3]_{ge}$: Concentración de ozono en fase gas a la entrada del reactor en mg/L

$[O_3]_{gs}$: Concentración de ozono en fase gas a la salida del reactor en mg/L

$[O_3]_l$: Concentración de ozono en fase líquida en mg/L

Q_{gas} : Gasto de ozono a la entrada del reactor en L/min

t : Tiempo de contacto en min

V_r : Volumen del reactor en Litros

3.5.1 Análisis del tipo de ensuciamiento de la membrana

Teniendo en cuenta las leyes de bloqueo de poro, se analizó el fenómeno predominante en el bloqueo de la membrana de Ultrafiltración. Se realizó el análisis

del mecanismo de taponamiento teniendo en cuenta las leyes de bloqueo propuestas por Le-Clech et al., (2006) y por Ye et al., (2005) tanto para el agua residual sin ozono como también para el agua residual ozonada.

3.6 Análisis de la materia orgánica disuelta

La materia orgánica disuelta (MOD) es comunmente definida como el material que puede pasar por un filtro de 0.45µm de tamaño de poro. Es una completa mezcla de estructuras aromáticas y alifáticas que incluyen amidas, carboxilos, hidroxilos, cetonas, y otros grupos funcionales. La materia orgánica disuelta no solo causa problemas estéticos como el color, sabor y olor sino que tambien contribuye al transporte de contaminantes orgánicos e inorgánicos que contribuyen a la producción de coproductos de la desinfección (Leenheer and Croue, 2003).

Las resinas XAD-8 y XAD-4 han sido utilizadas para fraccionar la materia orgánica disuelta (MOD) en fracciones hidrofóbica e hidrofílica, normalmente conocidas como distribución húmica/ no húmica (Wei et al., 2008).

Las ventajas de este método de fraccionamiento son que el método es aplicable para un gran rango de tipos de agua y tambien que se realiza sin usar un paso de preconcentración, como ultrafiltración u ósmosis inversa, manteniendo la consistencia del fraccionamiento (Aiken G.R. et al., 1992).

Para realizar las determinaciones de materia orgánica disuelta se filtró previamente la muestra del efluente con filtros Millipore de nitrocelulosa con un tamaño de poro de 0.45 micrómetros. Se emplearon las resinas Amberlita XAD-8 para retener la fracción hidrofóbica y la resina XAD-4 para retener la fracción hidrofílica.

Preparación de las Resinas: Las resinas se prepararon realizando lavados alternados con soluciones de hidróxido de sodio 0.1N, decantando, y almacenando la resina por 24 horas.

Volumen de resinas: Se emplearon volúmenes correspondientes a los empleados por (Wei et al., 2008). Para fraccionar 350mL de muestra, se requirieron 10mL de resina XAD-8 y 10 mL de resina XAD-4. Una vez empacadas en la respectiva columna se hacen tres lavados primero con NaOH 0.1N y después con HCl 0.1N para finalmente lavar con agua destilada.

Fracción hidrofóbica: La muestra una vez filtrada y acidificada a pH 2 con HCl concentrado se inyectó a la columna con la resina XAD-8 a un gasto de 2mL/min. La fracción que quedó retenida en la columna correspondió a la materia hidrofóbica, esta fracción se eluyó con NaOH 0.1N (Gong Jianli et al., 2008).

Fracción Transfílica e Hidrofílica: El efluente de la columna XAD-8 se inyectó a la columna XAD-4 a un gasto de 2mL/min. La fracción que quedó retenida corresponde a la materia transfílica. El efluente de esta última columna es conocido como la fracción hidrofílica de la muestra de agua.

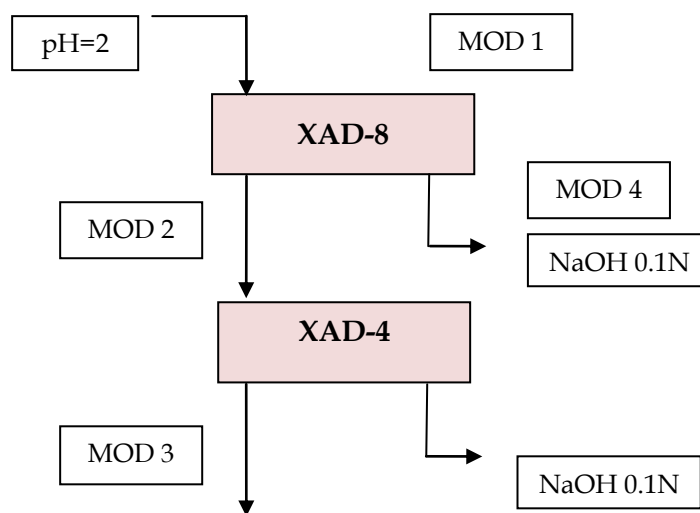


Figura 3.3 Diagrama del fraccionamiento de la materia orgánica disuelta (MOD)

Gong Jianli et al., (2008) determinan cada fracción de la siguiente forma:

Fracción Hidrofóbica: MOD 4

Fracción Transfílica: MOD 2 – MOD 3

Fracción Hidrofílica: MOD 3

3.7 Evaluación de la calidad del efluente final

Para evaluar la calidad del efluente final se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros fisicoquímicos: pH, Color, Turbiedad, Demanda Química de Oxígeno (DQO), Carbono Orgánico total (COT) y Densidad óptica a 254nm.

Mediante el análisis de estos parámetros se obtuvo el porcentaje de remoción, y se concluyó qué tan eficiente es el proceso de tratamiento aplicado.

3.8 Diseño experimental – Análisis estadístico.

El objetivo de un diseño factorial es analizar el estudio de varios factores sobre una o varias respuestas. Para estudiar la manera en que influye cada factor sobre la variable de respuesta es necesario elegir al menos dos niveles de prueba para cada uno de ellos. Con el diseño factorial completo se corren aleatoriamente todas las posibles combinaciones que pueden formarse con los niveles de los factores a investigar (Gutiérrez et al., 2008).

El diseño factorial 2^k (k factores con dos niveles de prueba cada uno) se utiliza mucho en la industria y en la investigación, debido a su eficacia y versatilidad. Los factoriales 2^k completos son útiles principalmente cuando el número de factores a estudiar está entre dos y cinco ($2 \leq k \leq 5$), rango en el cual su tamaño se encuentra entre 4 y 32 tratamientos; esta cantidad es manejable en muchas situaciones experimentales. En general, los factoriales en dos niveles, sean completos o fraccionados constituyen el conjunto de diseños de mayor impacto en las aplicaciones a nivel industrial y en investigación (Gutiérrez et al., 2008).

Para un estudio 2^3 , $k = 3$ factores con dos niveles cada uno, los cuales se denominan nivel alto y nivel bajo, se utiliza una notación codificada para cada factor, en la cual se asigna un valor -1 al nivel inferior y un valor +1 al nivel superior. La notación codificada permite entender el modelo y es de gran utilidad en las matrices pues de una forma simplificada se puede aplicar a cada problema concreto.

Con base en lo anterior, en el presente trabajo se realizó un diseño factorial 2^k con ayuda de los programas estadísticos Statgraphics Centurion versión XV y SPSS versión 15.0. Se evaluaron tres factores con dos niveles cada uno, obteniendo un total de 8 ensayos, los cuales se realizaron por duplicado para un total de 16 ensayos.

Los factores que se tuvieron en cuenta son los siguientes: Concentración de ozono en fase gaseosa a la entrada, tiempo de contacto de ozono y presión de UF.

Tabla 3.1. Factores y niveles de tratamiento

Factores	Niveles	
	Mínimo	Máximo
A: [O ₃]ge (mg/L)	5	25
B: Tiempo O ₃ (min)	10	20
C: Presión UF (psi)	3	6

Tabla 3.2 Número de experimentos y valores codificados

No DE EXPERIMENTO	VALORES REALES					
	A	B	C	A: [O ₃]ge (mg/L)	B: Tiempo O ₃ (min)	C: Presión UF (psi)
1	1	-1	-1	25	10	3
2	1	1	1	25	20	6
3	1	1	-1	25	20	3
4	-1	-1	1	5	10	6
5	1	-1	1	25	10	6
6	-1	1	-1	5	20	3
7	-1	1	1	5	20	6
8	-1	-1	-1	5	10	3

3.9 Análisis de costos

3.9.1 Costo del sistema de Ozonación

El costo de capital para la construcción y el costo del equipo del sistema de ozonación varían con el tamaño de la planta, tipo de operación y momento en el cual se hace la inversión. Los parámetros necesarios para llevar a cabo el análisis de costos son los siguientes: dosis y gasto de agua a tratar.

El costo por metro cúbico de agua, es la suma del costo de capital y el costo de operación. Dentro de los costos de capital para la generación de ozono se consideran los costos de tratamiento de aire, equipo de generación de ozono, equipo de destrucción, tuberías, válvulas, instrumentación, sistema de disolución de ozono, sistemas de control e instalación.

3.9.1.1 Costos de capital

Para la evaluación se hace uso de una estimación de costos de capital obtenida a partir de 20 plantas de tratamiento instaladas en los Estados Unidos y Francia.

Los porcentajes estimados para el costo de capital son: (Langlais et al., 1991).

Equipo de generación	53%
Construcción	25%
Unidad de contacto	22%

La figura 3.4 representa los costos de los sistemas de generación, incluyendo costos de tratamiento de aire, generación de ozono, destrucción de ozono, tuberías y válvulas, instrumentación, difusores, sistemas de control e instalación. En dicha figura se observan 2 curvas, las cuales sirven para estimar el costo libra/día en dólares.

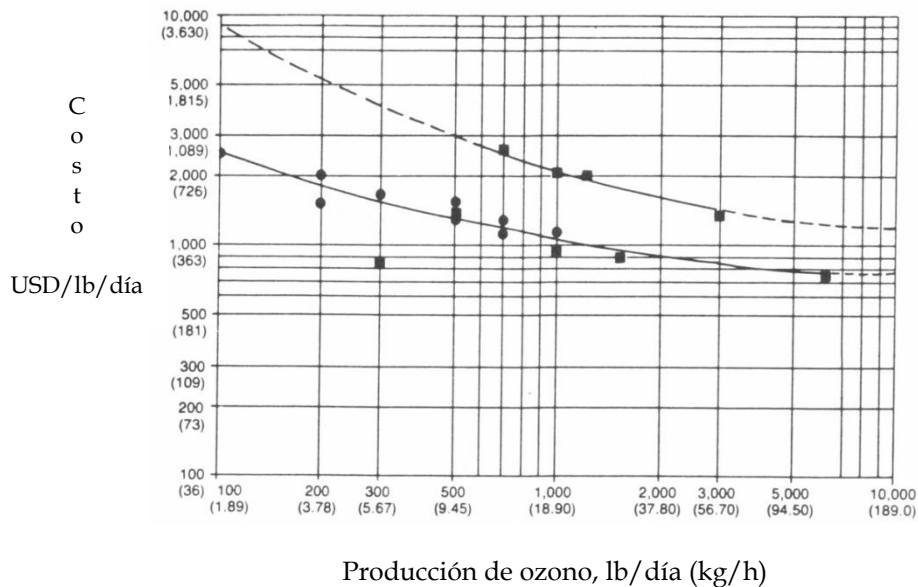


Figura 3.4 Costos para la producción de ozono (Langlais et al., 1991)

La producción y los porcentajes estimados para los costos de capital; son los datos que se requieren para llevar a cabo la estimación de los costos de capital total.

Además, los costos de capital así obtenidos tienen que ser anualizados para poder ser sumados a los costos de mantenimiento y operación, ya que estos últimos se calculan a partir de parámetros de operación anual.

La producción se calcula de la siguiente forma:

$$P(\text{kg/h}) = Q_L(\text{m}^3/\text{s}) * D(\text{g/m}^3) * 3.6\text{kg.s/g.h} \quad \text{Ec 3.5}$$

Donde:

P: Producción

Q_L: Gasto de agua a tratar

D: Dosis de ozono

3.6: Factor de conversión

Para anualizar los costos de capital se aplica una depreciación del 10% de interés a 10 años, utilizando el método lineal (Solonet et al., 1989).

$$\text{Costo Capital Anual} = Ct * (i * (1+i)^n) / ((1+i)^n - 1) \quad \text{Ec 3.6}$$

Donde:

Ct: Costo de capital anual

i: Interés

n: Número de años a amortizar

3.9.1.2 Costos de mantenimiento y operación

Para pequeños sistemas: menos de 1.89 kg/h de ozono (Langlais et al., 1991).

Energía	22%
Mano de obra	38%
Mantenimiento	38%

Enfriamiento 2%

Para sistemas mayores de 1.89 kg/h de ozono (Langlais et al., 1991).

Energía 75%

Mano de obra 5%

Mantenimiento 15%

Enfriamiento 5%

Para obtener los costos de mantenimiento y operación, se calcula el costo de energía y los porcentajes anteriormente mencionados. El costo de energía se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Costo de energía } (\$/h) = P_M (\text{kg/h}) * E_e (\text{kWh/kg}) * CE (\$/\text{kWh}) \text{ Ec 3.7}$$

Donde:

CE: Costo de energía

P_M: Producción promedio

E_e: Energía específica

CE: Costo de Energía

3.9.2 Costo operación de Filtración

Para el costo de la operación de filtración se tiene en cuenta el costo de capital y el costo de mantenimiento y operación.

3.9.2.1 Costo de capital

En primer lugar se determina el área de membrana a instalar según la ecuación:

$$\text{Flujo de Permeado} (L/h) = \text{Flux} \left(\frac{L}{hm^2} \right) * \text{Area} (m^2) \quad \text{Ec. 3.8}$$

Después se determina el número de módulos a instalar así:

$$\text{Número de módulos} = \frac{\text{Area}(m^2)}{\text{Area / módulo}} \quad \text{Ec. 3.9}$$

Posteriormente conociendo el número de módulos se calcula el costo total de la membrana así:

$$\text{Costo} = \text{Número de módulos} * \left(\frac{\text{Costo}}{\text{módulo}} \right) \quad \text{Ec. 3.10}$$

El costo de capital también incluye los siguientes aspectos con sus respectivos porcentajes: (Ultrafiltration and Microfiltration Handbook, 1998).

Costo de equipos: 35%

Costo de instrumentación: 15%

Costo de instalación: 5%

Para anualizar los costos de capital se aplica una depreciación del 10% de interés a 10 años, utilizando el método lineal (Solonet et al., 1989).

$$\text{Costo Capital Anual} = Ct * (i * (1+i)^n) / ((1+i)^n - 1) \quad \text{Ec 3.11}$$

Donde:

Ct: Costo de capital anual

i: Interes

n: Número de años a amortizar

3.9.2.2 Costos de mantenimiento y operación

Dentro de estos costos se encuentran: (Ultrafiltration and Microfiltration Handbook, 1998).

Costo de energía: 45%

Costo de reemplazo de la membrana: 35%

Costo de limpieza: 15%

Costo de mantenimiento: 5%

Costo de energía:

$$E(kWh/m^3) = C \frac{\Delta P * Q}{A * \eta} \quad \text{Ec 3.12}$$

Donde:

C: $2.78 \exp^{-4}$ (Ultrafiltration and Microfiltration Handbook, 1998)

ΔP : Caída de presión en kPa (34 kPa)

Q: Gasto de agua en L/h

A: Área de membrana en m^2

η : Eficiencia del 50% (Ultrafiltration and Microfiltration Handbook, 1998)

Resultados

4.1 Caracterización del efluente secundario de estudio

En la tabla 4.1 se presenta la caracterización de los principales parámetros fisicoquímicos del efluente secundario de estudio, proveniente de la Planta de Tratamiento de Cerro de la Estrella.

Tabla 4.1 Parámetros fisicoquímicos analizados en el efluente secundario

Parámetro	abr-09	sep-29	oct-26	nov-10	ene-29	Promedio
pH	7.4	7.8	7.7	7.5	7.4	7.6 ± 0.2
T °C	22	22	20	20	20	20 ± 1.1
Turbiedad (UNT)	2.0	1.4	1.5	1.5	1.8	1.6 ± 0.3
Conductividad (µS/cm)	688	660	610	740	730	686 ± 53.2
Color aparente (U-PtCo)	42	40	44	52	55	47 ± 6.5
DQO (mg/L)	24	20	23	25	27	24 ± 2.6
SDT (mg/L)	343	330	310	370	370	345 ± 26
COT (mg/L)	10	12	12	12	11	11 ± 0.9
COD (mg/L)	9	9	10	10	11	10 ± 0.8
UV 254	0.195	0.190	0.192	0.192	0.202	0.194 ± 0.005



Figura 4.1 Muestreo de agua residual y efluente secundario

4.2 Pruebas preliminares de ultrafiltración

Antes de iniciar los experimentos con la membrana de ultrafiltración se realizaron pruebas para observar el comportamiento de la membrana. Se realizaron pruebas con 4 y 8 horas de duración en las cuales se observó la variación de la presión y el flux con el tiempo de filtración.

4.2.1 Prueba preliminar de filtración para 4 horas

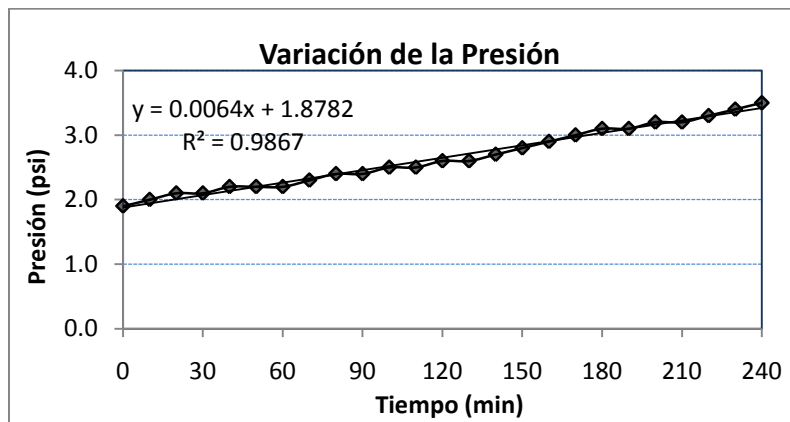


Figura 4.2 Variación de la presión para 4 horas de filtración

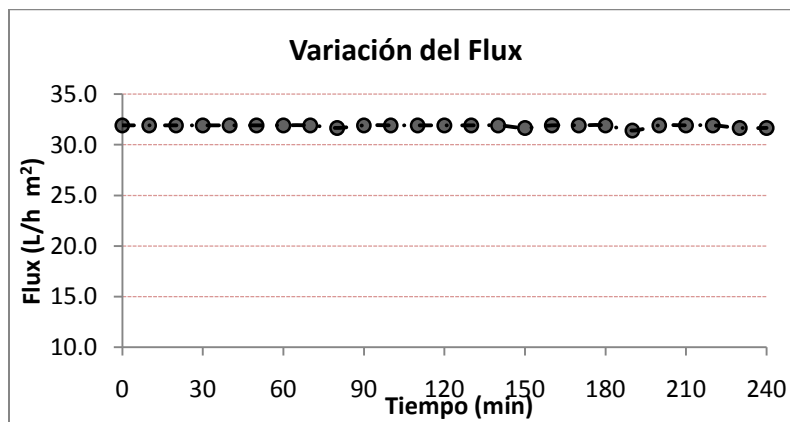


Figura 4.3 Variación del flux para 4 horas de filtración

En la figura 4.2 se observa que a medida que transcurre el tiempo de filtración la presión aumenta y en la figura 4.3 se aprecia que el Flux se mantiene constante, en el caso del

aumento de presión se observa un comportamiento lineal con un coeficiente de correlación igual a 0.9867.

4.2.2 Prueba preliminar de Filtración para 8 horas

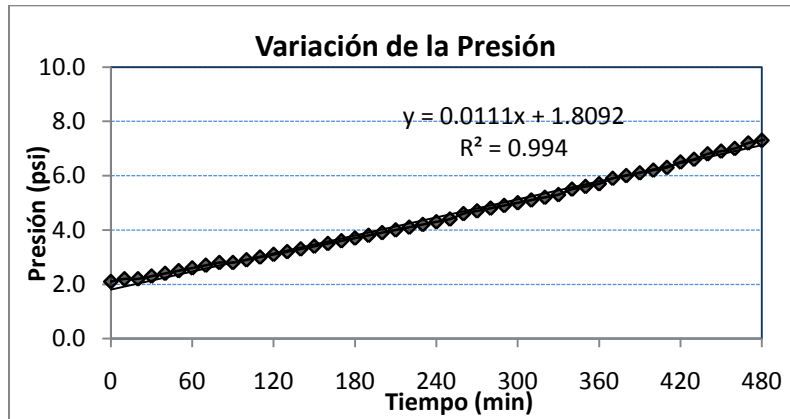


Figura 4.4 Variación de la presión para 8 horas de Filtración

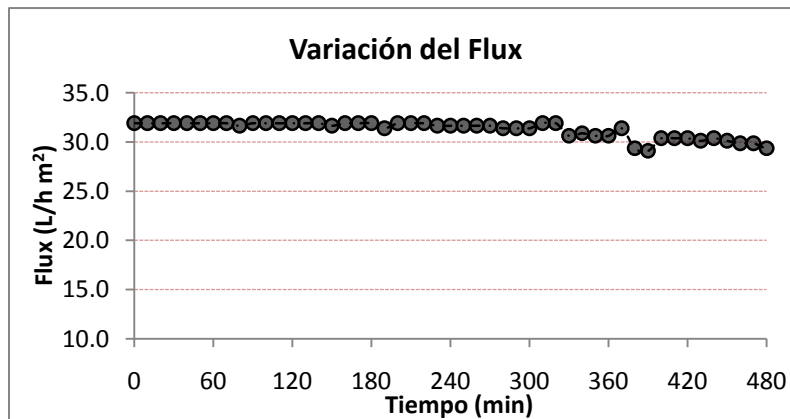


Figura 4.5 Variación del flux para 8 horas de Filtración

En la figura 4.4 se observa que la presión aumenta linealmente con el tiempo de filtración y en la figura 4.5 se puede apreciar un leve descenso del Flux a partir de la quinta hora de operación.

4.3 Determinación de la línea base de operación

Se determinó la línea base de operación para las dos presiones elegidas en el diseño experimental, empleando agua destilada para tal fin. Estas pruebas se realizaron por triplicado y se observa que el flux se mantiene constante a medida que transcurre el tiempo de filtración.

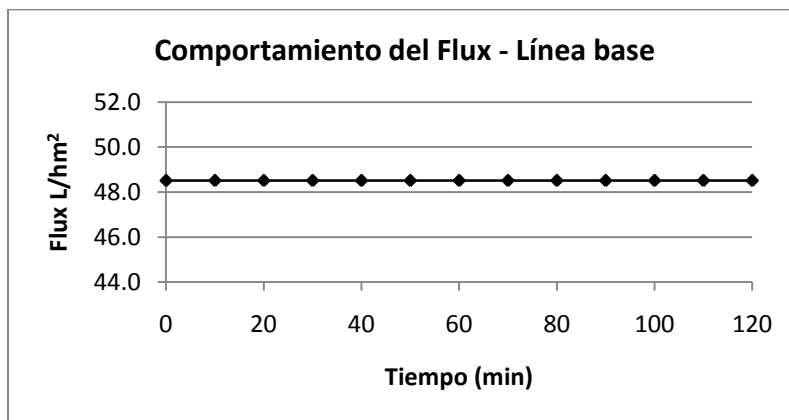


Figura 4.6 Línea base para una presión de 3 psi

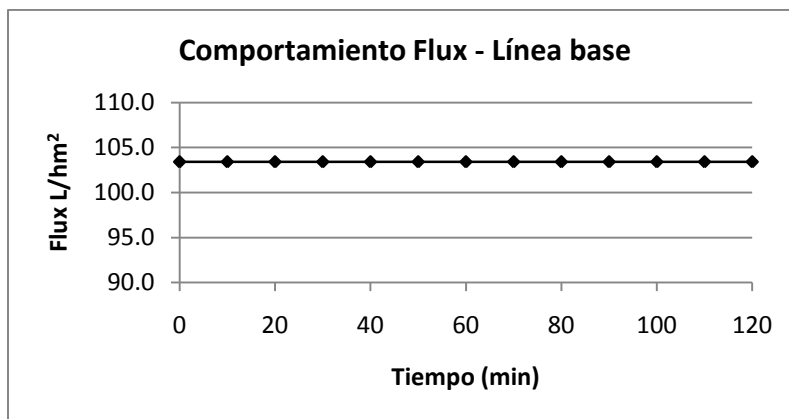


Figura 4.7 Línea base para una presión de 6 psi

4.4 Pruebas de ozonación y ultrafiltración del diseño experimental.

Las pruebas se realizaron en el orden como se planteó en el diseño experimental descrito en la metodología, para efectos de presentación de este trabajo se agruparon teniendo en cuenta el tiempo de contacto de ozono.

Para las pruebas de ultrafiltración la información se presenta en tablas en las cuales el tiempo de operación corresponde al tiempo que tardó la prueba de filtración y está en minutos, el tiempo de permeado corresponde al tiempo para calcular el gasto de permeado teniendo en cuenta un volumen de 25 mL, el gasto es la relación entre este volumen y el tiempo en segundos y se presenta en L/h y por último el flux corresponde al gasto en L/h dividido entre el área de la membrana cuyo valor es 0.047m^2 .

A continuación se presenta un esquema del equipo de laboratorio utilizado para las pruebas de ozonación y ultrafiltración

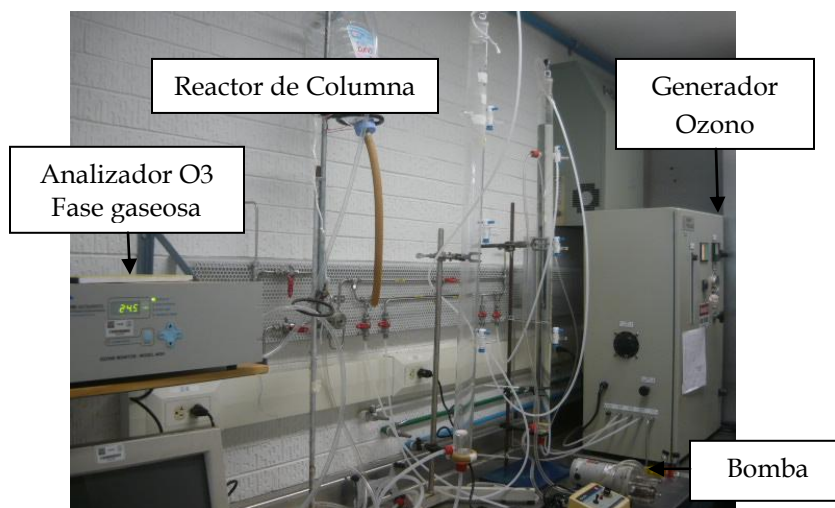


Figura 4.8 Equipo para prueba de ozonación

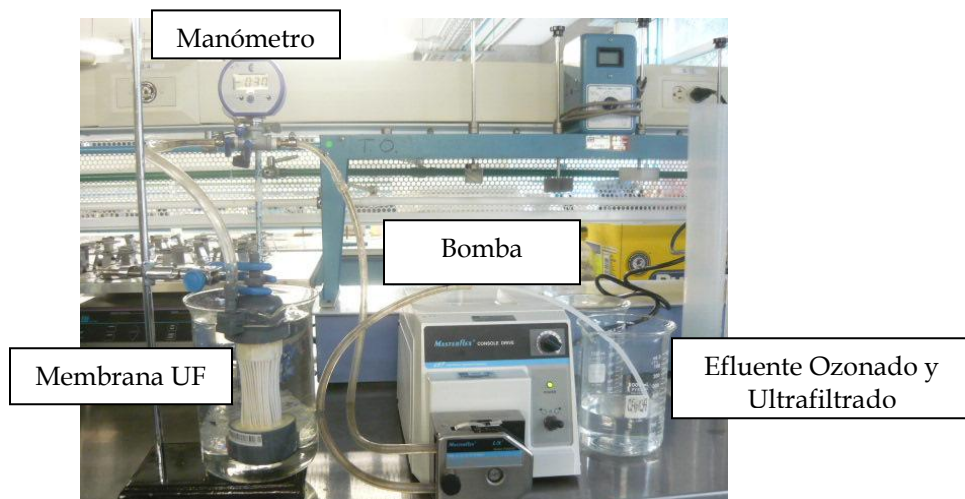


Figura 4.9 Equipo para prueba de ultrafiltración

4.4.1 Pruebas de Ozonación y Ultrafiltración del diseño experimental para un tiempo de contacto de ozono de 10 minutos.

Tabla 4.2 Parámetros fisicoquímicos pruebas de ozonación y ultrafiltración para un tiempo de contacto de 10 minutos.

TIEMPO DE CONTACTO DE OZONO: 10 MINUTOS				
Ozonación para 5mg/L			Ozonación para 25 mg/L	
	Ultrafiltración 3 psi	Ultrafiltración 6 psi	Ultrafiltración 3 psi	Ultrafiltración 6 psi
Color U-PtCo	4	4	7	7
Turbiedad UTN	0.3	0.4	0.3	0.3
Conductividad $\mu\text{Sm/cm}$	710	720	590	560
SDT mg/L	360	370	300	310
DQO mg/L	10	12	10	10
COT mg/L	10	10	9	9
UV254				
Color U-PtCo			8	
Turbiedad UTN			0.8	
Conductividad $\mu\text{Sm/cm}$			610	
SDT mg/L			310	
DQO mg/L			15	
COT mg/L			9	
UV254			0.053	

Experimento No. 4 y 8 [O₃]gas entrada: 5mg/L - 10 minutos de contacto.

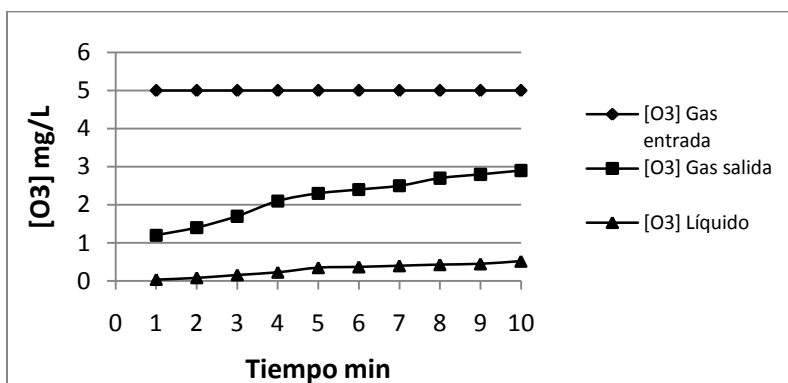


Figura 4.10 Curva de demanda de ozono para experimento No. 4 y 8.

La figura 4.10 muestra el comportamiento de las diferentes concentraciones de ozono durante el tiempo de duración de la prueba, la concentración de ozono gas a la entrada se mantiene siempre constante, la concentración de ozono gas a la salida aumenta a medida que avanza la prueba y la concentración de ozono en el líquido también se incrementa a medida que transcurre el experimento, esta figura fue construida con los datos de la tabla A 1.1 del anexo 1.

Tabla 4.3 Prueba No. 8 Ultrafiltración a 3 psi.

Prueba Ultrafiltración			
Presión: 3 psi			
Tiempo: 240 minutos			
Tiempo de operación(min)	Tiempo de permeado (s)	Gasto (L/h)	Flux (L/h m ²)
10	36	2.52	53.191
20	36	2.52	53.191
30	36	2.52	53.191
40	42	2.16	45.593
50	42	2.16	45.593
60	42	2.16	45.593
70	42	2.16	45.593
80	46	1.80	41.628
90	46	1.80	41.628
100	49	1.80	39.079
110	49	1.80	39.079
120	49	1.80	39.079
130	49	1.80	39.079
140	52	1.80	36.825
150	52	1.80	36.825
160	52	1.80	36.825
170	52	1.80	36.825
180	56	1.44	34.195
190	56	1.44	34.195
200	56	1.44	34.195
210	56	1.44	34.195
220	59	1.44	32.456
230	59	1.44	32.456
240	59	1.44	32.456

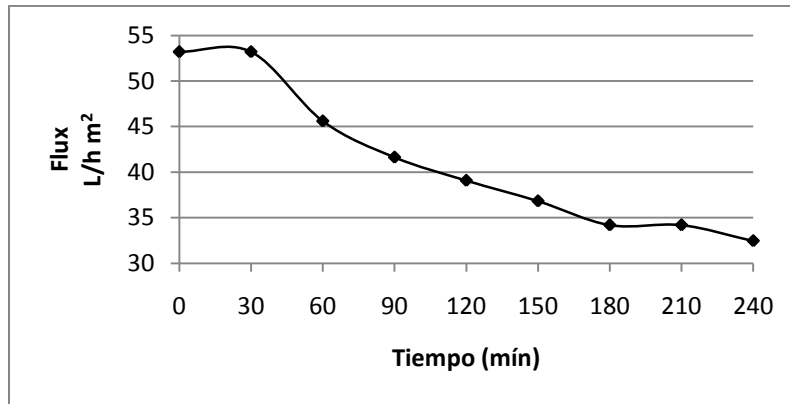


Figura 4.11 Flux vs tiempo de ultrafiltración a 3 psi.

Tabla 4.4 Prueba No. 4 Ultrafiltración a 6 psi.

Prueba Ultrafiltración			
Presión: 6 psi			
Tiempo: 240 minutos			
Tiempo de operación(min)	Tiempo de Permeado (s)	Gasto (L/h)	Flux (L/h m ²)
10	22	3.96	87.041
20	22	3.96	87.041
30	23	3.96	83.256
40	25	3.60	76.596
50	25	3.60	76.596
60	27	3.24	70.922
70	29	3.24	66.031
80	29	3.24	66.031
90	29	3.24	66.031
100	31	2.88	61.771
110	32	2.88	59.840
120	34	2.52	56.320
130	34	2.52	56.320
140	35	2.52	54.711
150	35	2.52	54.711
160	35	2.52	54.711
170	38	2.52	50.392
180	38	2.52	50.392
190	38	2.52	50.392
200	40	2.16	47.872
210	40	2.16	47.872
220	40	2.16	47.872

230	40	2.16	47.872
240	40	2.16	47.872

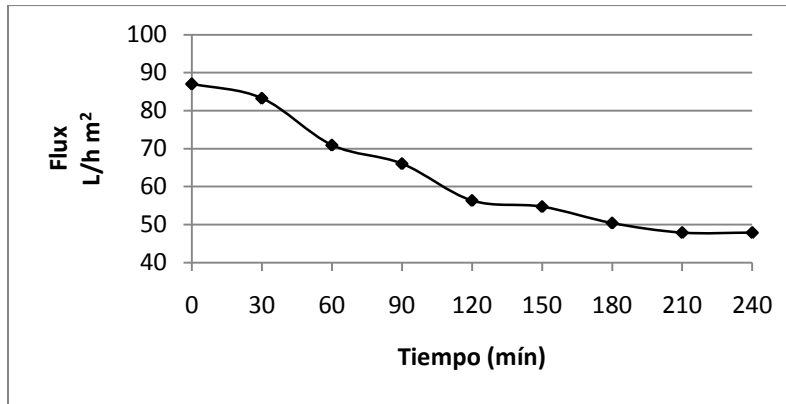


Figura 4.12 Flux vs tiempo de ultrafiltración a 6 psi.

Experimento No. 1 y 5 [O₃]ge: 25 mg/l - 10 minutos de contacto.

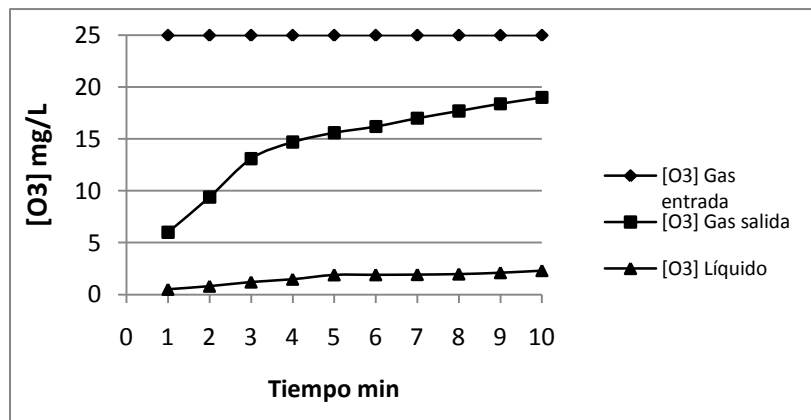


Figura 4.13 Curva de demanda de ozono para experimento No. 1 y 5.

La figura 4.13 muestra el comportamiento de las diferentes concentraciones de ozono a lo largo de la prueba. Esta figura se construyó con los datos de la tabla A 1.2 del anexo 1.

Tabla 4.5 Prueba No. 1 Ultrafiltración a 3 psi.

Prueba Ultrafiltración			
Presión: 3 psi			
Tiempo: 240 minutos			
Tiempo de operación(min)	Tiempo de Permeado (s)	Gasto (L/h)	Flux (L/h m ²)
10	36	2.52	53.191
20	36	2.52	53.191
30	36	2.52	53.191
40	36	2.52	53.191
50	42	2.16	45.593
60	42	2.16	45.593
70	42	2.16	45.593
80	42	2.16	45.593
90	42	2.16	45.593
100	49	1.80	39.079
110	49	1.80	39.079
120	49	1.80	39.079
130	49	1.80	39.079
140	49	1.80	39.079
150	49	1.80	39.079
160	52	1.80	36.825
170	52	1.80	36.825
180	56	1.44	34.195
190	56	1.44	34.195
200	56	1.44	34.195
210	56	1.44	34.195
220	59	1.44	32.456
230	59	1.44	32.456
240	59	1.44	32.456

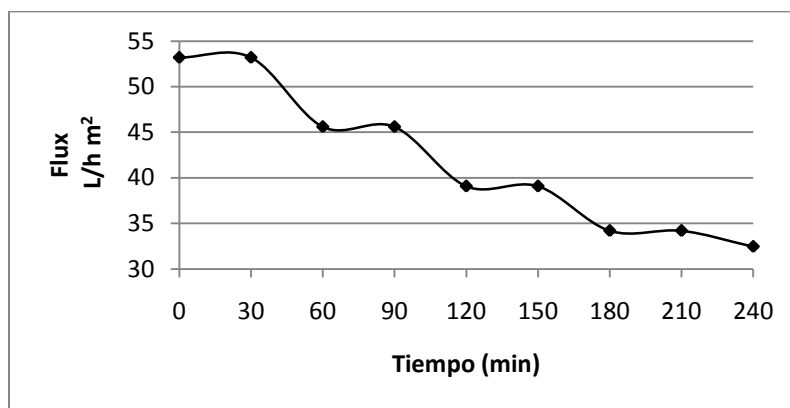


Figura 4.14 Flux vs tiempo de ultrafiltración a 3 psi.

Tabla 4.6 Prueba No. 5 Ultrafiltración a 6 psi.

Prueba Ultrafiltración			
Presión: 6 psi			
Tiempo: 240 minutos			
Tiempo de operación(min)	Tiempo de permeado(s)	Gasto (L/h)	Flux (L/h m ²)
10	20	4.68	95.745
20	20	4.68	95.745
30	22	3.96	87.041
40	22	3.96	87.041
50	22	3.96	87.041
60	22	3.96	87.041
70	23	3.96	83.256
80	23	3.96	83.256
90	25	3.60	76.596
100	25	3.60	76.596
110	25	3.60	76.596
120	28	3.24	68.389
130	28	3.24	68.389
140	28	3.24	68.389
150	29	3.24	66.031
160	29	3.24	66.031
170	29	3.24	66.031
180	29	3.24	66.031
190	31	2.88	61.771
200	31	2.88	61.771
210	31	2.88	61.771
220	31	2.88	61.771
230	31	2.88	61.771
240	31	2.88	61.771

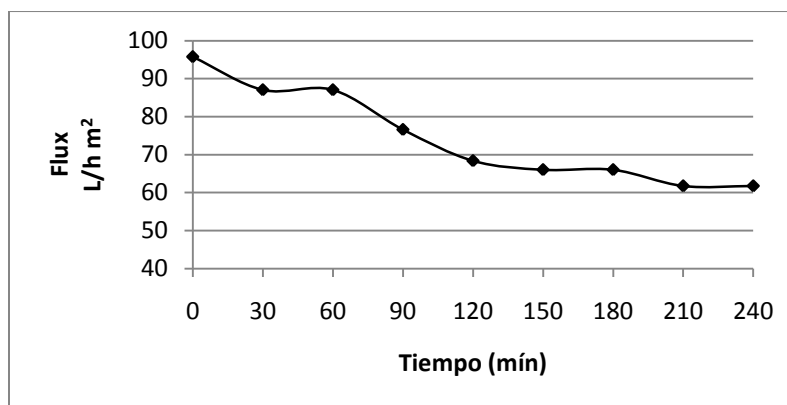


Figura 4.15 Flux vs tiempo de ultrafiltración a 6 psi.

De acuerdo con la tabla 4.2 para el tiempo de contacto de ozono de 10 minutos, se obtuvieron remociones significativas en los parámetros analizados, en color y turbiedad se obtuvieron mayores remociones con una concentración de ozono de 5mg/L que con la concentración de 25mg/L, siendo estas del 85% y 63% respectivamente. Para los otros parámetros se alcanzaron mayores remociones con una concentración de 25mg/L, en DQO la remoción fue del 38%, en COT del 18% y en UV₂₅₄ del 73%.

Para una concentración de ozono de 5mg/L y una presión de 3 psi el flux disminuye un 39% y para 6 psi disminuye un 45%; se observa que el comportamiento del flux es mejor para 3 psi, puesto que para agua sin ozonar y para esta presión el flux se reduce en un 45% en tanto que para 6 psi el flux se reduce en un 42%.

Para una concentración de ozono de 25mg/L el flux disminuye en un 39% para 3 psi, y para 6 psi el flux disminuye un 36%. Estos dos valores son mejores que los valores de reducción de flux para agua sin ozonar, los cuales son de un 45% y de un 42% para 3 y 6 psi respectivamente.

Wang Shutao et al., (2008) obtuvieron resultados similares a los de esta investigación, para su efluente secundario de estudio obtuvieron remociones en COT del 16%, 75% de remoción para UV₂₅₄ y 90% para color.

4.4.2 Pruebas de ozono y Ultrafiltración del diseño experimental para un tiempo de contacto de ozono de 20 minutos.

Tabla 4.7 Parámetros fisicoquímicos pruebas de ozonación y ultrafiltración para un tiempo de contacto de ozono de 20 minutos.

TIEMPO DE CONTACTO DE OZONO: 20 MINUTOS				
Ozonación para 5mg/L			Ozonación para 25 mg/L	
Color U-PtCo	8		Color U-PtCo	7
TurbiedadUTN	0.8		Turbiedad UTN	0.6
Conductividad			Conductividad	
μSm/cm	720		μSm/cm	760
SDT mg/L	380		SDT mg/L	380
DQO mg/L	12		DQO mg/L	7
COT mg/L	9		COT mg/L	8
UV254	0.074		UV254	0.043
	Ultrafiltración 3 psi	Ultrafiltración 6 psi		
Color U-PtCo	6	7	Color U-PtCo	6
Turbiedad UTN	0.2	0.2	Turbiedad UTN	0.2
Conductividad			Conductividad	
μSm/cm	760	720	μSm/cm	760
SDT mg/L	380	370	SDT mg/L	380
DQO mg/L	9	6	DQO mg/L	6
COT mg/L	9	9	COT mg/L	8

Pruebas No. 6 y 7 [O₃]ge: 5 mg/l - 20 minutos de contacto.

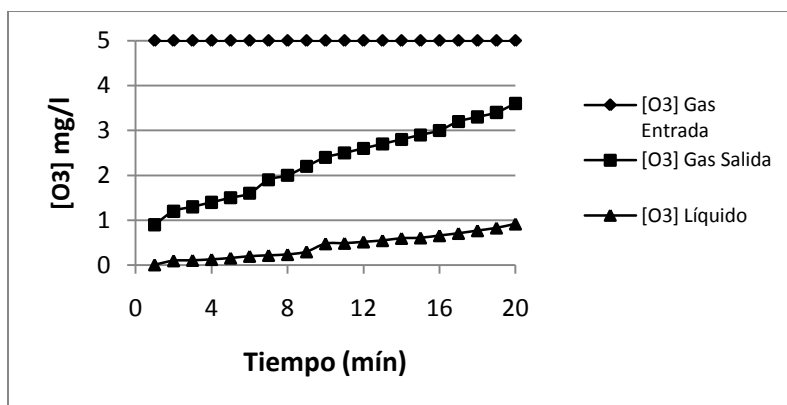


Figura 4.16 Curva de demanda de ozono para experimento No. 6 y 7.

La figura 4.16 muestra el comportamiento de las distintas concentraciones de ozono a lo largo de la prueba. Esta figura se construyó con los datos de la tabla A 1.3 del anexo 1.

Tabla 4.8 Prueba No. 6 Ultrafiltración a 3 psi.

Prueba Ultrafiltración			
Presión: 3 psi			
Tiempo: 240 minutos			
Tiempo de operación(min)	Tiempo de permeado (s)	Gasto (L/h)	Flux (L/h m ²)
10	41	2.16	46.705
20	41	2.16	46.705
30	41	2.16	46.705
40	42	2.16	45.593
50	42	2.16	45.593
60	42	2.16	45.593
70	42	2.16	45.593
80	42	2.16	45.593
90	46	1.80	41.628
100	46	1.80	41.628
110	46	1.80	41.628
120	46	1.80	41.628
130	46	1.80	41.628
140	46	1.80	41.628
150	46	1.80	41.628
160	48	1.80	39.894
170	48	1.80	39.894
180	50	1.80	38.298
190	50	1.80	38.298
200	50	1.80	38.298
210	54	1.80	35.461
220	54	1.80	35.461
230	54	1.80	35.461
240	54	1.80	35.461

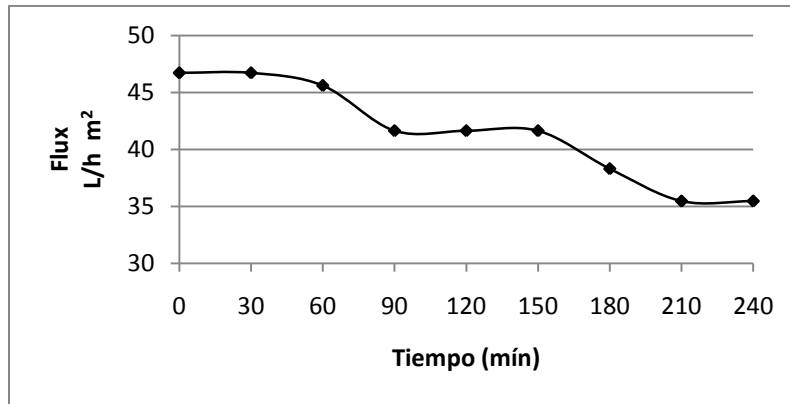


Figura 4.17 Flux vs Tiempo de ultrafiltración a 3 psi.

Tabla 4.9 Prueba No.7 Ultrafiltración a 6 psi.

Prueba Ultrafiltración			
Presión: 6 psi			
Tiempo: 240 minutos			
Tiempo de operación(min)	Tiempo de permeado (s)	Gasto (L/h)	Flux (L/h m ²)
10	21	4.32	91.185
20	21	4.32	91.185
30	21	4.32	91.185
40	21	4.32	91.185
50	21	4.32	91.185
60	21	4.32	91.185
70	23	3.96	83.256
80	23	3.96	83.256
90	23	3.96	83.256
100	25	3.60	76.596
110	25	3.60	76.596
120	25	3.60	76.596
130	25	3.60	76.596
140	25	3.60	76.596
150	25	3.60	76.596
160	25	3.60	76.596
170	25	3.60	76.596
180	25	3.60	76.596
190	25	3.60	76.596
200	25	3.60	76.596
210	25	3.60	76.596
220	25	3.60	76.596

230	25	3.60	76.596
240	25	3.60	76.596

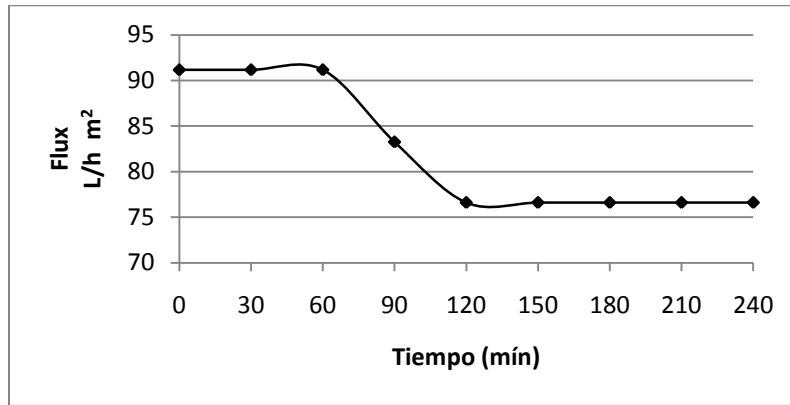


Figura 4.18 Flux vs Tiempo de ultrafiltración a 6 psi.

Experimento No. 2 y 3 [O₃]ge: 25 mg/l - 20 min de contacto.

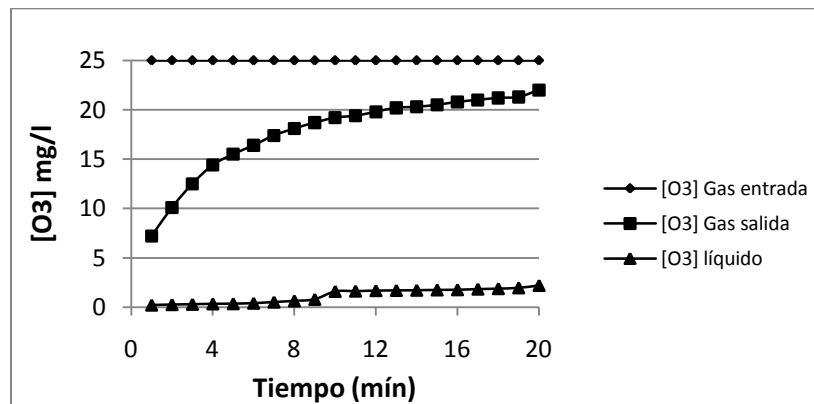


Figura 4.19 Curva de demana de ozono para experimento No. 2 y 3.

La figura 4.19 muestra el comportamiento de las distintas concentraciones de ozono a lo largo de la prueba. Esta figura fue construida con los datos de la tabla A 1.4 del anexo 1.

Tabla 4.10 Prueba No. 3 Ultrafiltración a 3 psi.

Prueba Ultrafiltración			
Presión:3psi			
Tiempo: 240 minutos			
Tiempo de operación(min)	Tiempo de permeado(s)	Gasto (L/h)	Flux (L/h m ²)
10	41	2.16	46.705
20	41	2.16	46.705
30	41	2.16	46.705
40	42	2.16	45.593
50	42	2.16	45.593
60	42	2.16	45.593
70	42	2.16	45.593
80	42	2.16	45.593
90	42	2.16	45.593
100	42	2.16	45.593
110	42	2.16	45.593
120	46	1.80	41.628
130	46	1.80	41.628
140	46	1.80	41.628
150	46	1.80	41.628
160	46	1.80	41.628
170	46	1.80	41.628
180	50	1.80	38.298
190	50	1.80	38.298
200	50	1.80	38.298
210	54	1.80	35.461
220	54	1.80	35.461
230	54	1.80	35.461
240	54	1.80	35.461

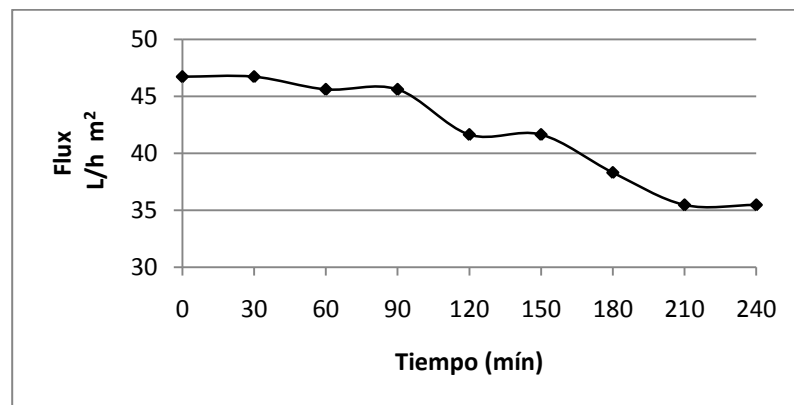


Figura 4.20 Flux vs tiempo de ultrafiltración 3 psi.

Tabla 4.11 Prueba No. 2 Ultrafiltración 6 psi.

Prueba Ultrafiltración			
Presión:6 psi			
Tiempo: 240 minutos			
Tiempo de operación(min)	Tiempo de permeado(s)	Gasto (L/h)	Flux (L/h m ²)
10	21	4.32	91.185
20	21	4.32	91.185
30	21	4.32	91.185
40	21	4.32	91.185
50	21	4.32	91.185
60	21	4.32	91.185
70	23	3.96	83.256
80	23	3.96	83.256
90	23	3.96	83.256
100	25	3.60	76.596
110	25	3.60	76.596
120	25	3.60	76.596
130	25	3.60	76.596
140	25	3.60	76.596
150	25	3.60	76.596
160	25	3.60	76.596
170	25	3.60	76.596
180	25	3.60	76.596
190	25	3.60	76.596
200	25	3.60	76.596
210	25	3.60	76.596
220	25	3.60	76.596
230	25	3.60	76.596
240	25	3.60	76.596

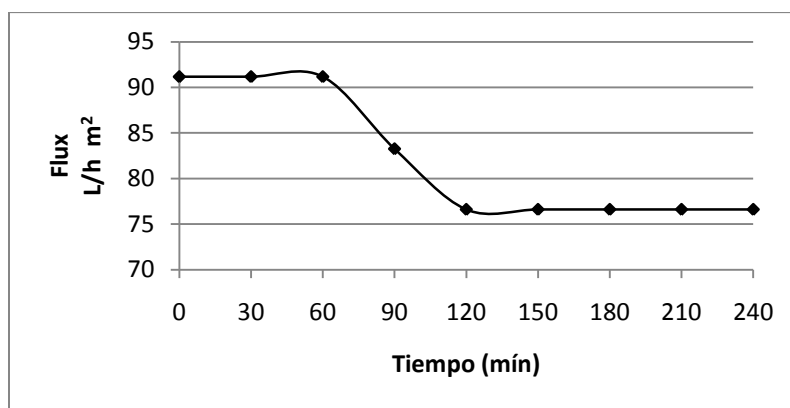


Figura 4.21 Flux vs Tiempo de ultrafiltración a 6 psi.

Para 20 minutos de contacto de ozono se alcanzaron mejores remociones en los parámetros analizados con una concentración de ozono de 25mg/L, en color se alcanza una remoción del 85%, 63% para turbiedad, 71% para DQO, 27% para COT y 78% para UV₂₅₄.

Para las pruebas de ultrafiltración con un tiempo de contacto de ozono de 20 minutos, se obtuvo el mismo comportamiento para las dos concentraciones de ozono en fase gaseosa; tanto para la presión de 3 psi como para la presión de 6 psi el flux disminuye un 16%; estas disminuciones del flux son significativas puesto que para agua sin ozono y una presión de 3 psi la reducción del flux es del 45% y para una presión de 6 psi la reducción del flux es del 42%.

Wang Xudong et al., (2007) analizaron el comportamiento del ozono y ultrafiltración en un efluente secundario, y encontraron resultados similares a los de esta investigación ya que obtuvieron una remoción del 45% en DQO, y del 64% en UV₂₅₄, concluyeron también que la ozonación ayuda en el desempeño de la membrana de ultrafiltración encontrando que para tiempos de contacto de ozono de 10 y 20 minutos, el flux de permeado solo se reduce en un 13%.

You Shu-Hai et al., (2007) estudiaron el efecto del ozono en membranas de ultrafiltración para un efluente terciario. Para el efluente sin ozono se observó que el flux desciende un 40% para la primera hora y un 42% para la segunda hora; en cambio para el efluente ozonado el flux desciende un 10% para la primera hora y un 12% para la segunda hora.

4.4.3 Comparación entre pruebas de filtración para agua sin ozono y agua ozonada para 8 horas de operación.

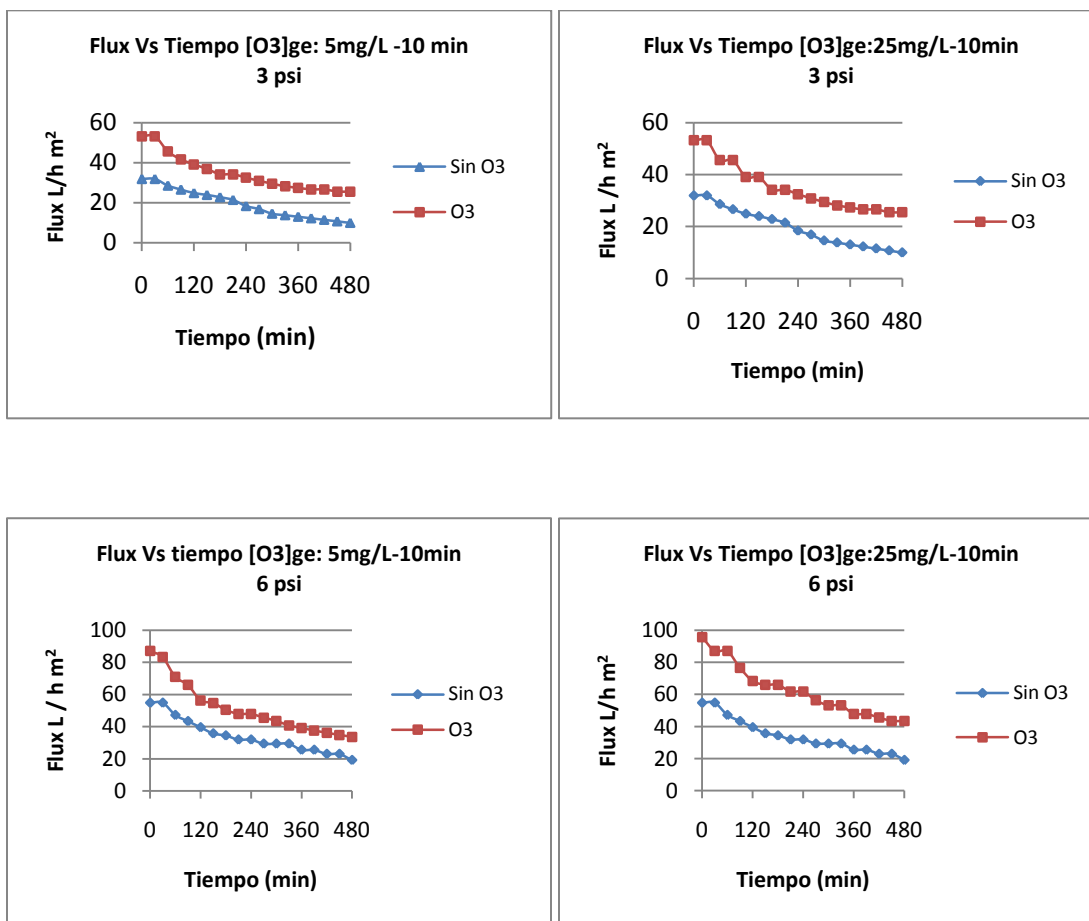


Figura 4.22 Comportamiento del flux para agua sin ozonar y agua ozonada para 10 minutos de tiempo de contacto de ozono.

En la figura 4.22 se observa que el flux del agua ozonada siempre es superior que el flux del agua sin ozonar, para todo el periodo de filtración. El flux se comporta de la misma forma para las dos concentraciones de ozono y la presión de 3 psi disminuyendo un 52% al cabo de 8 horas, en tanto que para la presión de 6 psi el flux disminuye un 61% para 5mg/L y un 55% para 25mg/L. Para este tiempo de contacto el flux no se ve afectado por el ozono, ya que el agua sin ozonar presenta una menor disminución en el flux en comparación del agua ozonada.

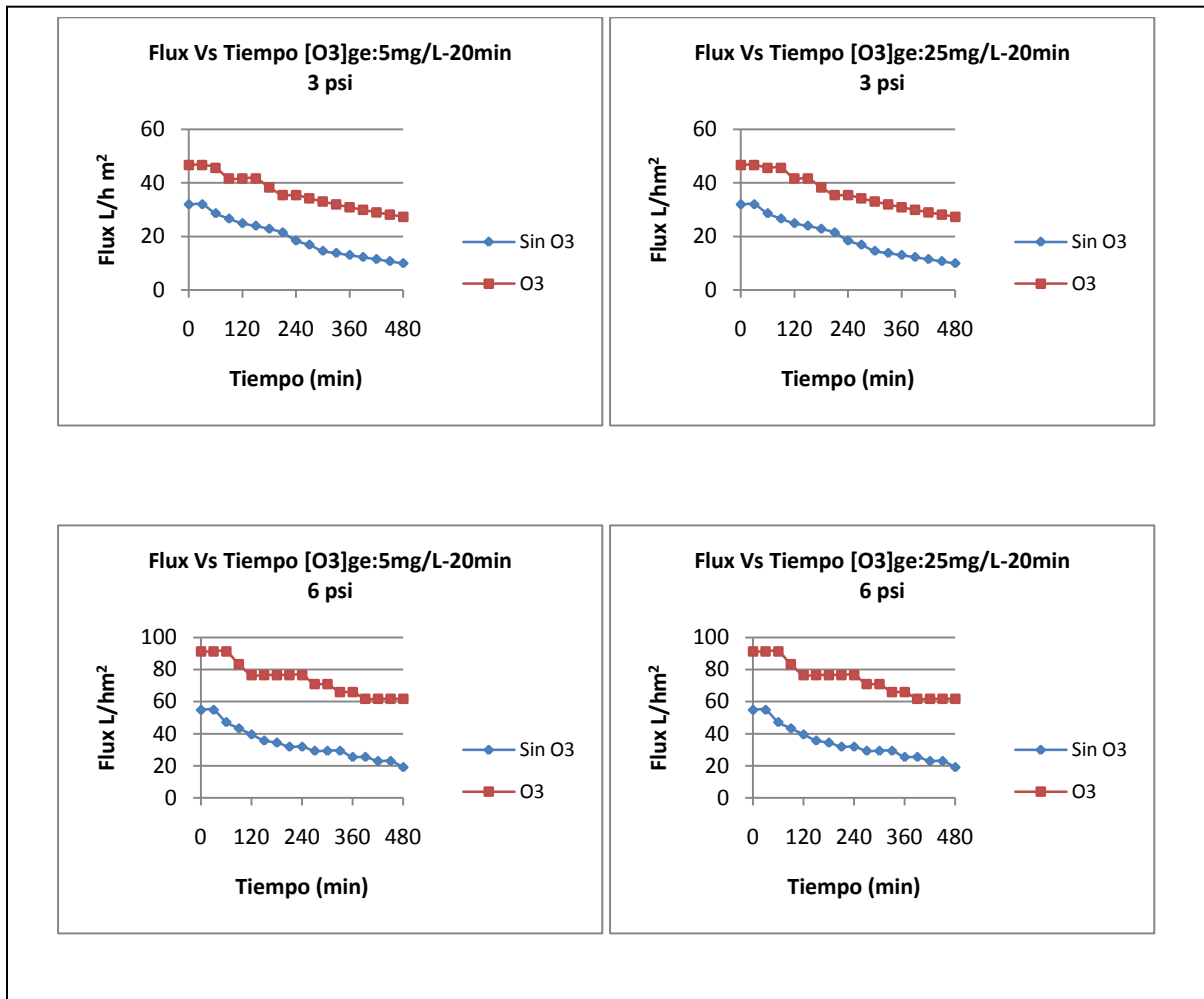


Figura 4.23 Comportamiento del flux para agua sin ozonar y agua ozonada para 20 minutos de tiempo de contacto de ozono.

En la figura 4.23 también se observa que el flux del agua ozonada siempre está encima del flux del agua sin ozonar, para todo el periodo de filtración. Para la presión de 3 psi y las dos concentraciones de ozono el flux presenta el mismo comportamiento disminuyendo un 41%. Para la presión de 6 psi y las dos concentraciones de ozono el flux disminuye un 32%; estos resultados son significativos puesto que son mucho menores que en el agua sin ozonar, ya que para 3 psi la disminución del flux es del 68% y para 6 psi la reducción es del 65%. Para 20 minutos de tiempo de contacto de ozono, el flux si se ve afectado por el ozono, presentando un mejor comportamiento que para 10 minutos de tiempo de contacto, el mejor comportamiento se da para la presión de 6 psi con una disminución del flux del 32% en contraste con el 65% de disminución para el agua sin ozonar.

4.4.4 Análisis del tipo de ensuciamiento de la membrana.

Según la metodología planteada en el capítulo 3 se analizó el tipo de ensuciamiento teniendo en cuenta las cuatro leyes propuestas por Le Clech et al., (2006) y por Ye et al., (2005). Se determinó el tipo de ensuciamiento predominante analizando el ajuste de cada una de las curvas, tanto para el agua residual sin ozonar y para el agua ozonada con las mejores condiciones de remoción: [O₃]_{ge}: 25mg/L y 20 min de tiempo de contacto.

4.4.4.1 Análisis del tipo de ensuciamiento de la membrana para agua residual sin ozonar.

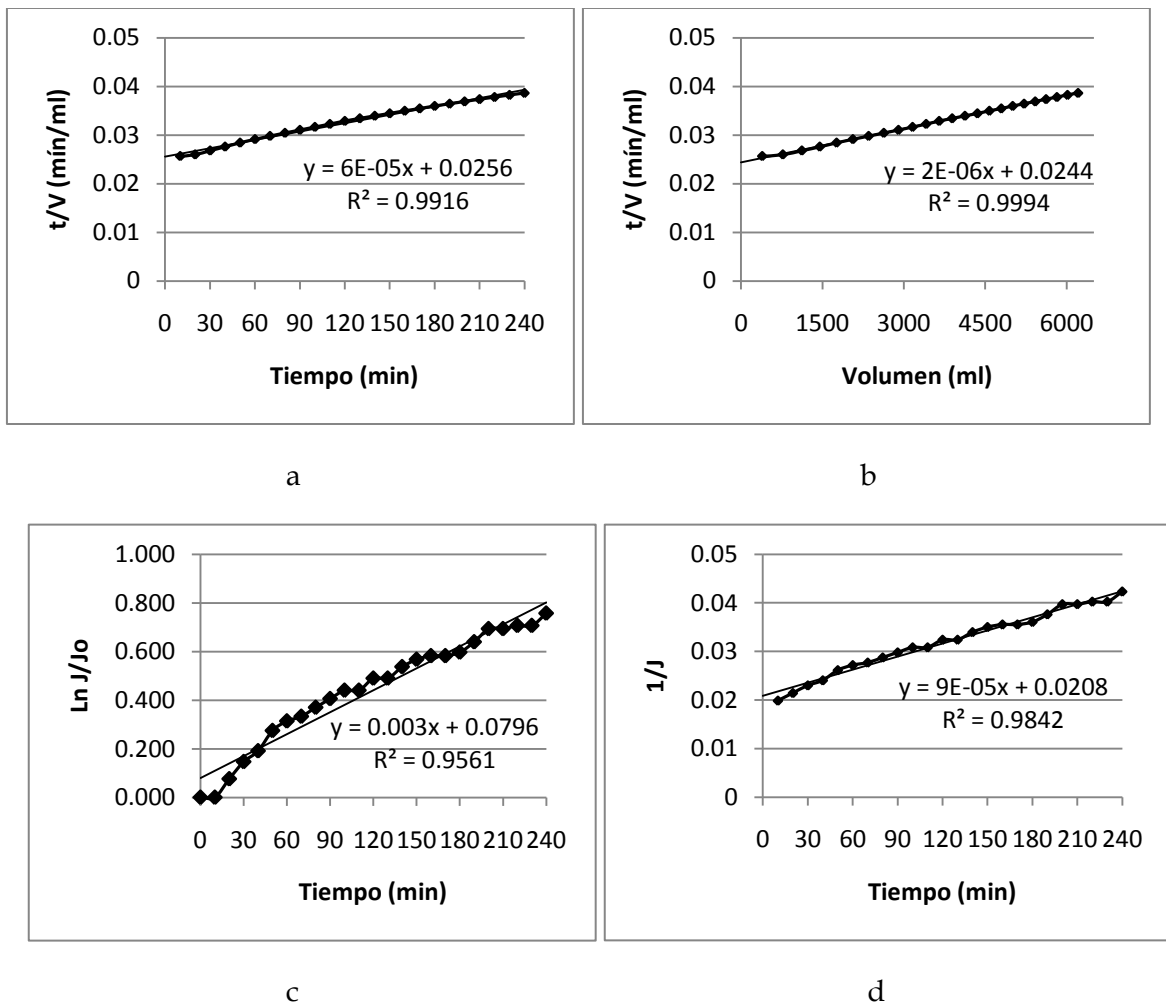


Figura 4.24 Tipo de ensuciamiento de la membrana para agua residual sin ozonar. a) Bloqueo estándar; b) Formación de la torta; c) Bloqueo completo; d) Bloqueo intermedio

En la figura 4.24 se observa el comportamiento del tipo de ensuciamiento de la membrana de ultrafiltración. El tipo de fenómeno predominante es el de formación de la torta, con una correlación igual a 0.9994 y corresponde a la deposición de partículas de tamaño más grande que el de los poros sobre la superficie de la membrana. Esto se entiende puesto que el tamaño de las partículas presentes en el agua residual es mucho más grande que el tamaño de poro de la membrana de ultrafiltración.

4.4.4.2 Análisis del tipo de ensuciamiento de la membrana para agua residual ozonada.

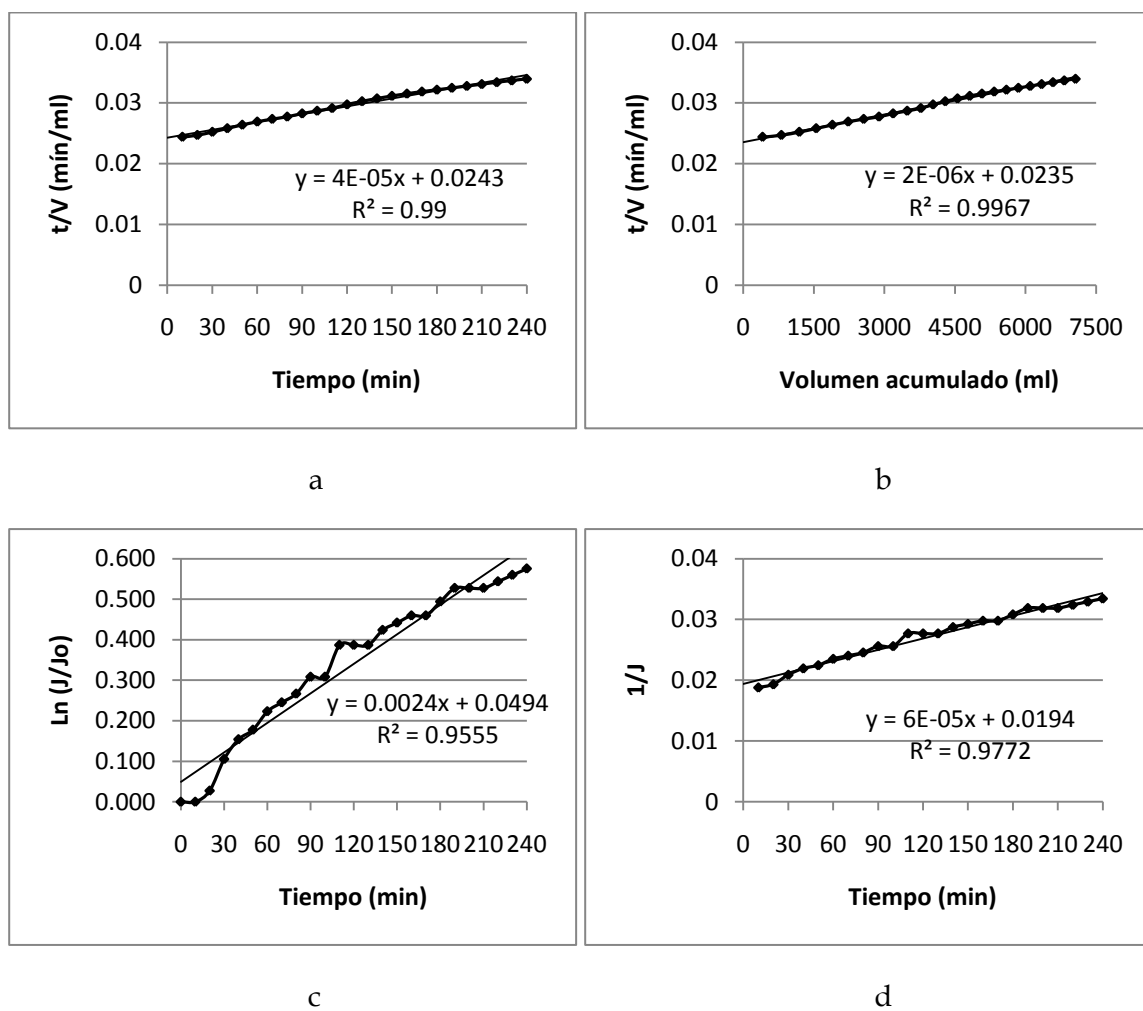


Figura 4.25 Tipo de ensuciamiento de la membrana para agua residual ozonada. a) Bloqueo estándar; b) Formación de la torta; c) Bloqueo completo; d) Bloqueo intermedio.

En la figura 4.25 se observa el tipo de ensuciamiento de la membrana para el agua ozonada y se determinó que el tipo de bloqueo corresponde al de formación de la torta, con un coeficiente de correlación igual a 0.9967. Tanto en el agua sin ozonar como en el agua ozonada el tipo de bloqueo es el mismo. La torta puede actuar como filtro y retener las partículas más pequeñas, o bien puede compactarse con el tiempo así como también puede actuar como una segunda membrana, a través de la cual debe pasar el agua permeada.

4.5 Fraccionamiento de la materia orgánica disuelta

En la tabla 4.12 se presentan los resultados obtenidos en el fraccionamiento de la materia orgánica disuelta del efluente de estudio. Los análisis se realizaron por triplicado, en el caso del agua ozonada y ultrafiltrada, se tomó el agua con las mejores condiciones de remoción, es decir con una concentración de ozono de 25mg/L y un tiempo de contacto de 20 minutos para una presión de 6 psi.

Tabla 4.12 Fraccionamiento de la materia orgánica disuelta

Fracción (%)	Agua cruda	Agua ozonada	Agua ozonada y ultrafiltrada
HPO	46	38	38
HFI	32	42	42
TPI	22	20	20

HPO: materia hidrofóbica, HFI: materia hidrofílica, TPI: materia transfílica.

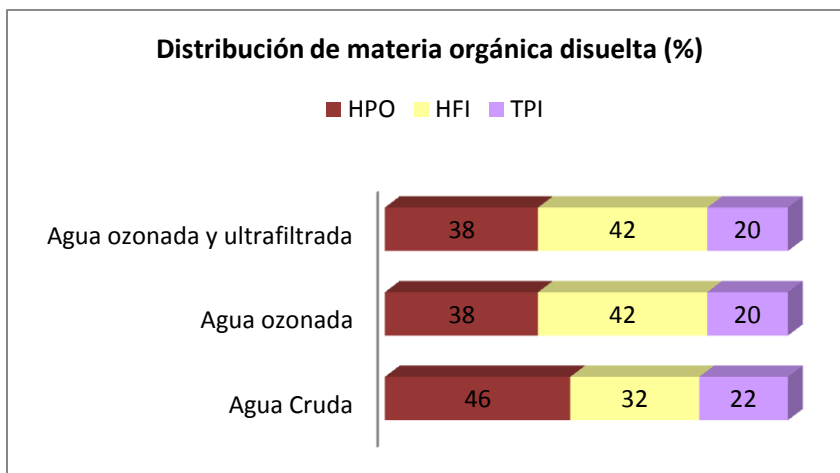


Figura 4.26 Distribución de la materia orgánica disuelta. HPO: materia hidrofóbica, HFI: materia hidrofílica, TPI: materia transfílica.

La tabla 4.12 indica la distribución de las distintas fracciones de la materia orgánica disuelta en el agua de estudio. Se observa que para el agua cruda el mayor porcentaje lo ocupa la fracción hidrofóbica, pero para el agua ozonada y ultrafiltrada el porcentaje de materia hidrofóbica disminuyó y la materia hidrofílica aumentó, esto se presenta puesto que el ozono rompe la estructura de la materia orgánica hidrofóbica, formando compuestos intermedios de ozonación. En el agua ozonada y ultrafiltrada se observa la misma distribución de las distintas fracciones, por cuanto la ultrafiltración no incide en la retención de esta clase de partículas y todas pasan a través de la membrana resultando la misma composición que para el agua ozonada.

Gong Jianli et al., (2008) encontraron en su efluente secundario de estudio que después de ozonar, se presentaba un aumento en el porcentaje de la materia hidrofílica y una disminución de la materia hidrofóbica, esto indica que el ozono reacciona con la materia hidrofóbica destruyendo su estructura molecular para formas compuestos intermedios hidrofílicos. Después de la ozonación los porcentajes de las fracciones de materia orgánica fueron los siguientes: Hidrofóbica 24%, Hidrofílica 52% y transfílica 24%.

Tabla 4.13 Estudios relacionados con el fraccionamiento de la materia orgánica disuelta para agua sin ozonar

Referencia	Lugar de estudio	Resultados
Gon Gianli et al., (2008)	Efluente secundario en China	HPO:36% HPI: 32% TPI: 25%
Jarusuthirak et al., (2002)	Efluente secundario en Francia	HPO: 30% HPI: 28% TPI: 19%
Hu J.Y. et al., (2003)	Efluente secundario en Singapoore	HPO: 60% HPI: 40%
Zhang Hua et al., (2009)	Efluente secundario en China	HPO: 65% HPI: 35%
Shon H.K et al., (2004)	Efluente secundario en China	HPO: 51% HPI: 32% TPI: 17%
Este estudio	Efluente secundario en México	HPO: 46% HPI: 32% TPI: 22%

En la tabla 4.13 se observan los resultados de varios estudios en los cuales se realizó el fraccionamiento de la materia orgánica disuelta. Es importante decir que la materia hidrofóbica tiene un mayor porcentaje en comparación con las otras dos fracciones, los resultados concuerdan con lo encontrado en este trabajo de investigación, indicando que las sustancias hidrofóbicas son mas abundantes que las otras clases de sustancias.

4.6 Resultados de remoción en pruebas de ozonación.

Para las pruebas de ozonación se analizaron las remociones obtenidas en los diferentes parámetros fisicoquímicos, teniendo en cuenta los factores tiempo de contacto y concentración de ozono en fase gaseosa.

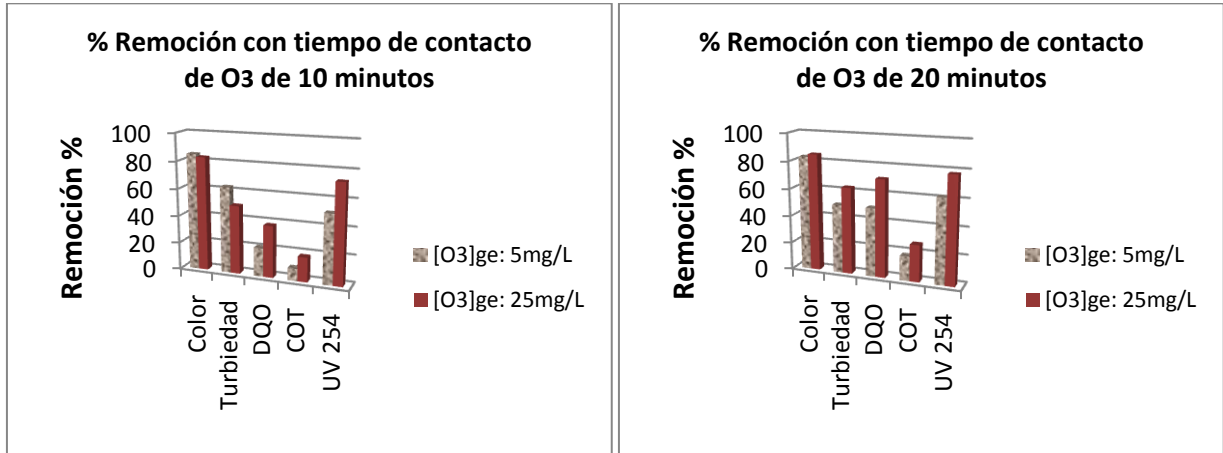


Figura 4.27 Porcentaje de remoción para tiempo de contacto de ozono de 10 y 20 minutos

En la figura 4.27 se observan los porcentajes de remoción para el agua ozonada teniendo en cuenta las dos concentraciones de ozono en fase gaseosa y los dos tiempos de contacto. Para el tiempo de contacto de 10 minutos las remociones en color y turbiedad son similares para 5mg/L y para 25mg/L, con valores del 85% y 60% respectivamente; sin embargo para DQO, COT y UV₂₅₄ son mayores las remociones para 25mg/L con valores del 38, 18 y 73% respectivamente. Para el tiempo de contacto de 20 minutos, la remoción es mayor para 25mg/L en todos los parámetros, alcanzando remociones del 85% en color, 63% en turbiedad, 71% en DQO y 27% en COT y 78% en UV₂₅₄.

Wang Shutao et al., (2008) reportan resultados similares en su estudio con un efluente secundario, para Carbono Orgánico Total (COT) reportan una remoción del 16% y para color una remoción del 90%. Bataller et al., (2005) reportan una remoción del 50% en la demanda química de oxígeno (DQO) de su efluente secundario de estudio; Wang Xudong et al., (2007) reportan en su efluente secundario de estudio remociones del 45% en DQO y del 64% en UV₂₅₄.

4.7 Análisis estadístico

El análisis estadístico que se realizó fue un análisis de varianza ANOVA (por sus siglas en inglés). Este tipo de análisis ofrece un modo objetivo de determinar si el conjunto de resultados obtenidos en las pruebas realizadas en el experimento, y sujeto a errores, es válido. Así mismo, sirve para comparar si los valores de un conjunto de datos numéricos son significativamente distintos a los valores de otro o más conjuntos de datos. El procedimiento para comparar estos valores está basado en la varianza global observada en los grupos de datos numéricos a comparar (Gutiérrez et al., 2008).

El análisis de varianza se puede realizar manualmente o empleando un programa estadístico computacional como SPSS Versión 15.0. Hoy en día se utilizan con mayor frecuencia este tipo de programas para análisis estadísticos, ya que ofrecen de una forma sencilla la obtención de diversos parámetros. En la tabla 4.14 se muestra la forma de obtención de las distintas expresiones que se emplean en el análisis de varianza (ANOVA).

Tabla 4.14 Expresiones empleadas en la tabla de análisis de varianza (Gutiérrez et al., 2008)

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrada	F ₀
Entre factores	$SS_F = n \sum_{i=1}^a (y_i - y_{..})^2$	$a - 1$	$MS_F = \frac{SS_F}{a - 1}$	$F_0 = \frac{MS_F}{MS_E}$
Error total	$SS_E = SS_T - SS_F$	$N - a$	$MS_E = \frac{SS_E}{N - a}$	
Total	$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - y_{..})^2$	$N - 1$		

Donde:

SS= suma de cuadrados

MS= media cuadrada

a = niveles

y_i = total de datos de las observaciones bajo las condiciones del factor i

$y_{..}$ = total de datos de las observaciones bajo todas las condiciones de los diferentes factores

n = número total de observaciones experimentales bajo las condiciones del factor i

N= número total de observaciones bajo todas las condiciones de los diferentes factores

La aproximación del valor P como ayuda en la toma de decisiones se utiliza mucho, y en casi todos los paquetes estadísticos de computadora se proporciona el cálculo junto con valores de la prueba apropiada, como es el caso del paquete estadístico computacional SPSS versión 15.0. Por generaciones enteras de análisis estadístico, se ha hecho costumbre elegir un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ (95% de confianza) ó $\alpha = 0.01$ (99% de confianza) (Gutiérrez et al., 2008).

Estadísticamente se puede decir que:

- Un valor de P es el nivel (de significancia) más bajo en el que el valor observado de la estadística de prueba es significativo.
- El valor P es el nivel de significancia más pequeño que conduce al rechazo de la hipótesis nula H_0 .
- El valor P es el mínimo nivel de significancia en el cual H_0 (hipótesis nula) sería rechazada cuando se utiliza un procedimiento de prueba especificado con un conjunto dado de información. Una vez que el valor P se haya determinado, la conclusión en cualquier nivel α resulta de comparar el valor P con α .

Para el análisis de los datos se tuvo en cuenta como variable observada, el porcentaje de remoción de materia orgánica, representado por la remoción en la Demanda Química de Oxígeno (DQO).

Tabla 4.15 ANOVA para el total del experimento

	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Media de Cuadrados	F	Valor de P o significancia
Entre grupos	1117.938	7	159.705	24.336	.000
Fuera de grupos	52.500	8	6.563		
Total	1170.438	15			

En la tabla 4.15 se puede observar el análisis de varianza para el total del experimento y se observa un valor de P o significancia muy bajo, lo cual quiere decir que existe una diferencia entre los tratamientos, ya que el valor de P es menor a 0.05 con un nivel de confianza del 95%.

Se observa que el estadístico de prueba F, es 24.336 veces mayor para los tratamientos (1117.938) que para la fluctuación aleatoria (52.500), entonces la prueba es altamente significativa y se rechaza H_0 puesto que si hay variabilidad entre tratamientos.

Para efectos del análisis de los datos, se codificaron los factores principales así: A: concentración de gas a la entrada en mg/L; B: Tiempo de contacto de ozono en minutos; C: Presión de Ultrafiltración en psi.

Tabla 4.16 ANOVA para el total de tratamientos e interacciones

Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Media de Cuadrados	F	Valor de P o Significancia
Modelo	65000.500	8	8125.063	1238.105	.000
A	85.562	1	85.562	13.038	.007
B	855.563	1	855.563	130.371	.000
C	7.563	1	7.563	1.152	.314
A * B	3.063	1	3.063	.467	.514
A * C	45.563	1	45.563	6.943	.030
B * C	68.063	1	68.063	10.371	.012
A * B * C	52.563	1	52.563	8.010	.022
Error	52.500	8	6.563		
Total	65053.000	16			

R Cuadrado = 0.999 (R Cuadrado ajustado = 0.998)

En la tabla 4.16 se puede observar un completo análisis del modelo factorial, en el cual se incluye la influencia de los factores principales (A, B, y C); las interacciones de primer orden (A*B, A*C, B*C) así como la de segundo orden (A*B*C).

En cuanto al análisis de los factores principales se observa que los factores A y B son altamente significativos en la variable de respuesta, puesto que tienen un valor de P menor a 0.05, con un nivel de confianza del 95%. Al modificar cualquiera de estos dos factores se obtiene una modificación en la variable de respuesta.

El programa estadístico de cómputo SPSS versión 15.0, también proporciona el valor de R^2 , algunos autores lo denominan coeficiente de determinación o coeficiente de correlación, esto es porque la R^2 indica el porcentaje de variabilidad; es decir, indica que tanto el modelo puede explicar a los datos que se están correlacionando. En general para fines de predicción se recomienda un coeficiente de determinación de al menos del 70%. Cuando hay muchos factores (más de 5) se prefiere el estadístico R^2_{aj} en lugar de R^2 , puesto que este último se incrementa de manera arbitraria con cada término que se agrega al modelo; en cambio R^2_{aj} baja el valor cuando el término que se agrega no aporta mucho (Gutiérrez et al.,2008). En el caso del experimento analizado se obtuvo un R^2 de 0.999, lo cual significa que el modelo se explica en un 99%.

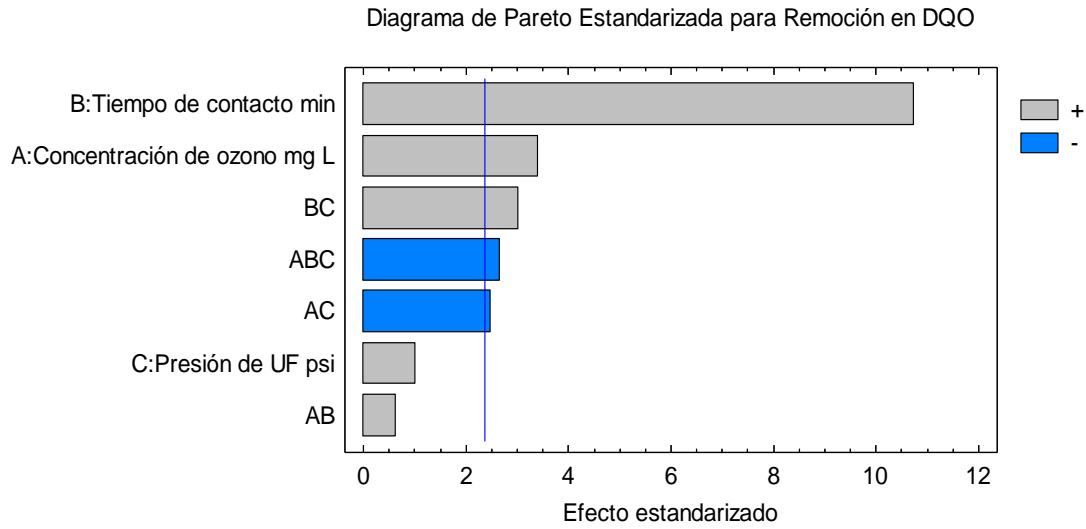


Figura 4.28 Diagrama de Pareto estandarizado para el porcentaje de remoción en Demanda Química de Oxígeno (DQO).

La figura 4.28 muestra la gráfica de Pareto que representa la influencia de cada uno de los factores y/o sus interacciones en la remoción de Demanda química de oxígeno en orden decreciente. La línea que se muestra en el gráfico indica el límite de valor del efecto estandarizado, a partir del cual, el factor o interacción se considera estadísticamente significativa. Con base en esto se puede decir que los factores: Tiempo de contacto y concentración de ozono ejercen una influencia significativa en el proceso.

La tabla 4.16 también indica que las interacciones de primer orden A*C y B*C son significativas en la variable de respuesta, las figuras 4.29 y 4.30 representan estas interacciones.

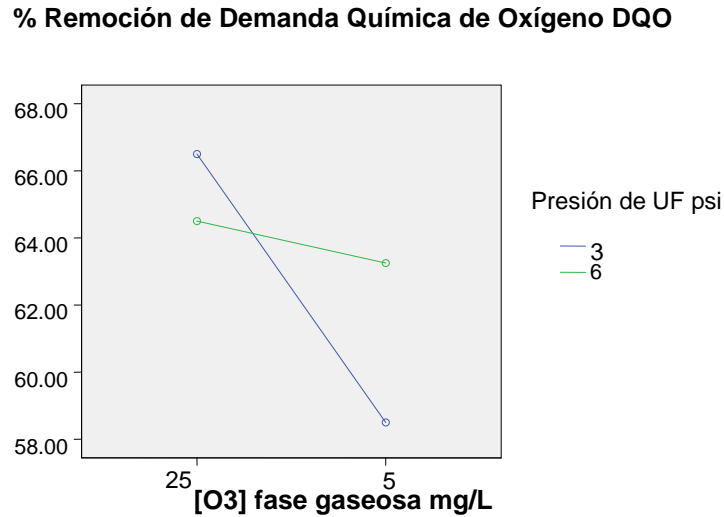


Figura 4.29 Interacción factor A (Concentración de ozono) y factor C (Presión de ultrafiltración)

La figura 4.29 representa la interacción del factor A (concentración de ozono) con el factor C (Presión de ultrafiltración), esta interacción es altamente significativa, y estadísticamente es importante para la variable de respuesta. Se observa que para las dos presiones de ultrafiltración la variable de respuesta aumenta al incrementar la concentración de ozono en fase gaseosa. La relación es directa entre los dos factores analizados.

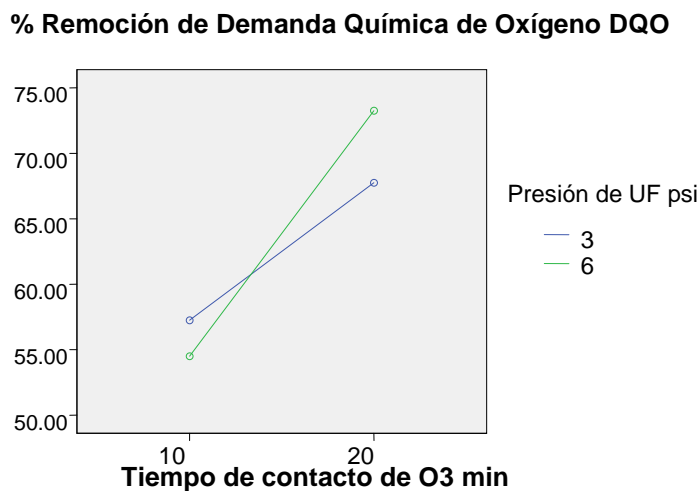


Figura 4.30 Interacción factor B (Tiempo de contacto de ozono) y factor C (Presión de ultrafiltración).

La figura 4.30 representa la interacción de los factores B (Tiempo de contacto de ozono) y el factor C (Presión de Ultrafiltración), esta interacción es estadísticamente significativa en la variable de respuesta. Para las dos presiones de ultrafiltración la variable de respuesta aumenta a medida que el tiempo de contacto también aumenta. La relación es directa para los dos factores analizados.

La tabla 4.16 señala también que la interacción de segundo orden A*B*C es significativa en la respuesta de la variable de salida, a continuación se presentan las figuras que ilustran esta interacción.

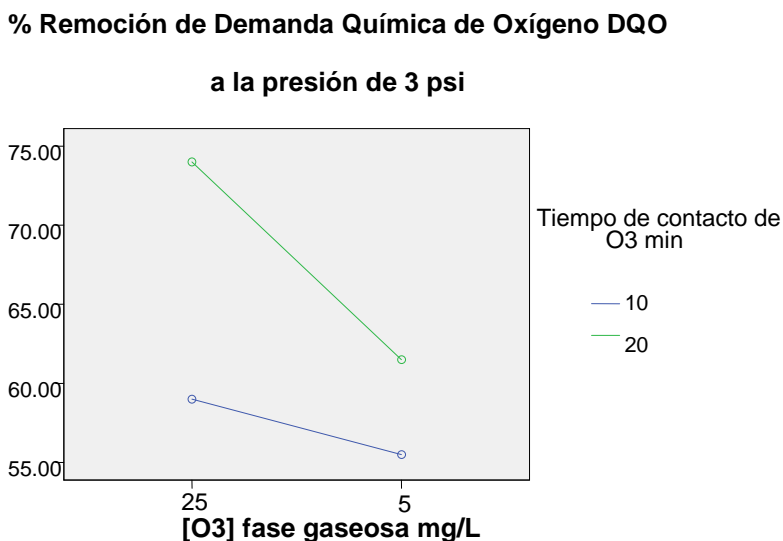


Figura 4.31 Interacción A*B*C a 3 psi

La figura 4.31 muestra que para una presión de 3 psi la respuesta en la variable de salida se incrementa con el aumento del tiempo de contacto de ozono y con el aumento de la concentración de ozono en fase gaseosa.

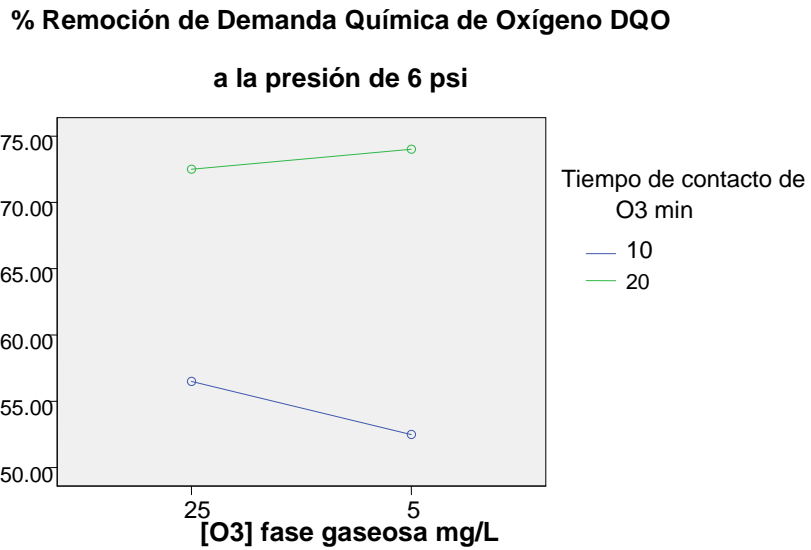


Figura 4.32 Interacción A*B*C a 6 psi

La figura 4.32 muestra que para una presión de 6 psi y un tiempo de contacto de ozono de 10 minutos, la variable de salida se incrementa al aumentar la concentración de ozono en fase gaseosa, para un tiempo de contacto de ozono de 20 minutos la variable de salida disminuye al aumentar la concentración de ozono en fase gaseosa, pero dicha disminución no se considera estadísticamente significativa.

4.8 Análisis de costos

El análisis de costos se realizó separadamente, para el costo de la operación de ozonación y para el costo de la operación de Ultrafiltración. Posteriormente se obtuvo un costo total del proceso de tratamiento del agua, para obtener finalmente el costo de tratamiento por metro cúbico de agua. Se tomó la concentración de ozono gaseoso de 25mg/L que fue con la cual se obtuvieron mejores resultados de remoción.

4.8.1 Costos de Ozonación

Para analizar el costo de la operación de ozonación se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

Gasto de agua a tratar: 100 L/s

Dosis: 25mg/L

Horas de trabajo cada día: 10 horas

Tasa de cambio (mes de abril de 2010): 12.5

4.8.1.1 Costo de Capital

Empleando la ecuación 3.5 se obtiene la capacidad de producción en kg/h

$$P(kg/h) = 0.1 \frac{m^3}{s} * 25 \frac{g}{m^3} * 3.6 \frac{kg.s}{grh}$$

$$P(kg/h) = 9$$

Con este valor de 9 kg/h en la figura 3.3 , obtenemos un valor de 3,000 USD/lb/día

Ahora con este valor se calcula el costo de generación así:

$$3,000 \frac{USD}{Lb/día} * 10 \frac{h}{día} * 1 \frac{Lb}{0.4535kg} = 66,152 \frac{USD.h}{kg}$$

Ahora:

$$\text{Costo} = 9 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 66,152 \frac{\text{USD.h}}{\text{kg}} = 595,368 \text{USD} = \$ 7,442,100 \text{ M.N.}$$

El costo de generación anterior representa el 53% del costo de capital total, con base en este se calcula el costo de construcción y el costo de la unidad de contacto de ozono teniendo en cuenta sus respectivos porcentajes:

Costo de construcción (25%) = \$ 3,510,425 M.N.

Costo de la unidad de contacto (22%) = \$ 3,089,174 M.N.

Sumando los costos anteriores se obtiene:

Costo de capital = \$ 14,041,700 M.N.

Ahora con la ecuación 3.6 se calcula el costo de capital anual obteniendo:

$$\text{Costo de capital anual} = \$ 1,649,240 \text{ M.N. / año}$$

Tabla 4.17 Costo de capital para generación de ozono

Concepto	Costo (\$ M.N.)
Costo de Generación	7,442,100
Costo de construcción	3,510.425
Costo de la unidad de contacto	3,089,174
Costo de capital total	14,041,700
Costo de capital anual	1,649,240

4.8.1.2 Costo de mantenimiento y operación

Para determinar los costos de mantenimiento y operación se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

Energía específica = 26.4 kWh/kg (AWWA, 1991)

Costo Energía = \$ 1.5 / kWh (Comisión Federal de Electricidad, tarifa sector industrial)

Con la ecuación 3.7 se determina el costo de potencia en Pesos/h así:

$$Potencia (kWh/h) = 9 \frac{kg}{h} * 26.4 \frac{kWh}{kg} = 238 \frac{kWh}{h}$$

$$Costo de Potencia (\$/h) = 238 \frac{kWh}{h} * \frac{10h}{día} * \frac{365días}{año} * 1.5 \frac{Pesos}{kWh} = \$1,303,050 \frac{M.N.}{año}$$

El costo de potencia es aproximadamente el 75% del total de los costos de operación y mantenimiento, adicionalmente se determina el costo de mantenimiento, costo de mano de obra y el costo de enfriamiento

Costo de mantenimiento (15%) = \$ 260,610 M.N.

Costo de mano de obra (5%) = \$ 86,870 M.N.

Costo de enfriamiento (5%) = \$ 86,870 M.N.

Tabla 4.18 Costos de mantenimiento y operación para generación de ozono

Concepto	Costo (\$ M.N.)
Costo anual de potencia	1,303,050
Costo de mantenimiento	260,610
Costo de enfriamiento	86,870
Costo de mano de obra	86,870
Costo Total	1,737,400

Costo total de ozonación: 3,386,640 Pesos / año

$$\text{Costo de tratamiento de ozonación:} = \frac{3,386,640 \text{ Pesos} / \text{año}}{1,314,000 \text{ m}^3 / \text{año}} = \$ 2.6 / \text{m}^3$$

El costo de generación de ozono es el más importante dentro del costo de capital y representa el 53% del costo de capital total, el costo anual de potencia es el de mayor porcentaje dentro del costo de mantenimiento y operación con un 75% del total. Con el valor obtenido de \$ 2.6 M.N./m³ se cumple con el requerimiento en cuanto a los parámetros analizados en este trabajo, en el capítulo 5 se hacen las respectivas recomendaciones al respecto.

4.8.2 Costo de Ultrafiltración

4.8.2.1 Costo de capital

Para determinar el costo de capital se tuvieron en cuenta los siguientes datos:

Gasto agua = 100 L/s

Flux membrana = 90 L/h.m²

Area de cada modulo = 10m²

Costo por módulo de membrana = \$ USD 2,000 (Compañía Zenon)

Horas de trabajo cada día: 10 horas

Con la ecuación 3.8 se determinó el área total de membranas así:

$$Area(m^2) = \frac{GastoAgua}{Flux} = \frac{360,000L/h}{90L/hm^2} = 4000m^2$$

Con la ecuación 3.9 se determinó el número de módulos a instalar así:

$$Número\módulos = \frac{4,000m^2}{10m^2 / módulo} = 400módulos$$

El costo total de la membrana es:a

$$Costo = 400\módulos * \frac{2,000USD}{módulo} = 800,000USD = \$ 10,000,000 M.N.$$

Ahora se determinan los otros componentes de los costos de capital:

Costo de equipos (20%) = \$ 3,076,923 M.N.

Costo de instrumentación (10%) = \$ 1,538,462 M.N.

Costo de instalación (5%) = \$ 769,231 M.N.

El costo de capital total es: \$ 15,384,616 M.N.

Ahora se determina el costo de capital anual con la ecuación 3.11

$$\text{Costo de capital anual} = \$ 1,806,668 \text{ M.N. /año}$$

Tabla 4.19 Costo de capital para ultrafiltración

Concepto	Costo (\$ M.N.)
Costo de capital	10,000,000
Costo de equipos	3,076,923
Costo de instrumentación	1,538,462
Costo de instalación	769,231
Costo de capital total	15,384,616
Costo capital anual	1,806,668

4.8.2.2 Costos de mantenimiento y operación

Se determinó el costo de energía con la ecuación 3.12 así:

$$\text{Energía} \left(\frac{kWh}{m^3} \right) = 2.78 \exp^{-4} * \frac{34Kpa * 360,000L/h}{4,000m^2 * 0.5} = 1.7 \frac{kWh}{m^3}$$

$$\text{CostoEnergía} = 1.7 \frac{kWh}{m^3} * 0.1 \frac{m^3}{s} * 3,600 \frac{s}{h} * 10 \frac{h}{día} * 365 \frac{días}{año} * 1.5 \frac{pesos}{kWh} = \$ 3,350,700 \frac{M.N.}{año}$$

Analizando los demás conceptos de mantenimiento y operación se tiene que:

$$\text{Costo de reemplazo de membranas (35\%)} = \$ 2,606,100 \text{ M.N.}$$

$$\text{Costo de limpieza (15\%)} = \$ 1,116,900 \text{ M.N.}$$

$$\text{Costo de mantenimiento (5\%)} = \$ 372,300 \text{ M.N.}$$

$$\text{Costo total de mantenimiento y operación: } \$ 7,446,000 \text{ M.N./año}$$

Tabla 4.20 Costos de mantenimiento y operación para ultrafiltración

Concepto	Costo (\$ M.N.)
Costo de energía	3,350,700
Costo reemplazo de membrana	2,606,100
Costo de limpieza	1,116,900
Costo de mantenimiento	372,300
Costo Total	7,446,000

Costo total operación de Filtración: \$ 9,252,668 M.N./año

Costo de tratamiento de ultrafiltración:

$$\text{Costo}(\text{pesos} / m^3) = \frac{9,252,668 \text{ Pesos} / \text{año}}{1,314,000 m^3 / \text{año}} = \$ 7 \text{ M.N.} / m^3$$

Costo total ozonación más Ultrafiltración: \$ 12,639,308 M.N. / año

Ahora de determina el costo de tratamiento por m³ de agua así:

$$\text{Costo}(\text{pesos} / m^3) = \frac{12,639,308 \text{ Pesos} / \text{año}}{1,314,000 m^3 / \text{año}} = 9.6 \text{ Pesos} / m^3$$

En la operación de ultrafiltración el costo de capital representa el 65% dentro del costo de capital total, esto debido a la gran área de membrana que es necesario adquirir para tratar el volumen de agua planteado. Así también el costo de energía con un 45% representa el de mayor importancia dentro de los costos de mantenimiento y operación.

Considerando el comportamiento del flux para el agua sin ozonar y teniendo en cuenta que la operación tendría una duración de 10 horas diarias, se realizarían labores de limpieza de membrana dos veces diarias, pero con el agua ozonada previamente sólo se realizaría una al día. Esto significa un ahorro del 50% en el costo de limpieza, y representa también un ahorro del 7.5% en el costo total de la operación de filtración.

CAPÍTULO 5

Conclusiones y recomendaciones

En la realización de este trabajo se cumplió con los objetivos planteados, de tal forma que después de la experimentación se obtuvieron los resultados esperados en la hipótesis de investigación.

Se obtuvo información nueva en cuanto al comportamiento de la membrana de ultrafiltración en presencia del ozono y al mecanismo de ensuciamiento predominante, al igual que en cuanto al fraccionamiento de la materia orgánica disuelta.

Ozonación

Para 10 minutos de tiempo de contacto de ozono, se obtiene mayor remoción en los parámetros color y turbiedad para una concentración de ozono de 5mg/L, en contraste, para 25mg/L y el mismo tiempo de contacto se observan mayores remociones en DQO, COT y UV 254.

Para 20 minutos de tiempo de contacto de ozono, se obtienen mayores remociones en los parámetros analizados con una concentración de ozono de 25mg/L.

El ozono es efectivo en la remoción de la materia orgánica del efluente secundario, las mejores remociones se obtienen con una concentración de ozono de 25mg/L y con un tiempo de contacto de 20 minutos.

Ultrafiltración

El ozono efectivamente reduce el ensuciamiento de la membrana de ultrafiltración, el mejor resultado se presentó para un tiempo de contacto de ozono de 20 minutos y una

concentración de 25mg/L, presentandose una disminución del flux del 16% al cabo de 4 horas de operación.

El mecanismo de ensuciamiento predominante para la membrana de ultrafiltración estudiada fue el tipo de bloqueo con formación de la torta, las pruebas de filtración así lo demuestran tanto en agua residual sin ozonar como en agua residual ozonada. En todos los casos este mecanismo resulta ser el que mejor ajuste tiene, con coeficientes de correlación superiores a 0.95.

Fraccionamiento de la materia orgánica disuelta

El efluente secundario de estudio se caracteriza por tener un mayor porcentaje de materia orgánica hidrofóbica (46%), seguido por un 32% de materia orgánica hidrofílica y un 22% de materia orgánica anfifílica.

La ozonación hace que el porcentaje de materia orgánica hidrofóbica disminuya de un 46% hasta un 38%, y que el porcentaje de materia orgánica hidrofílica aumente de un 32% hasta un 42%. Esto se explica puesto que el ozono actúa sobre los compuestos hidrofóbicos y forma compuestos intermedios de ozonación, los cuales son de carácter hidrofílico.

Análisis estadístico

El análisis de varianza demuestra que los diferentes tratamientos aplicados tienen efecto en la remoción de materia orgánica, medida como remoción en Demanda Química de Oxígeno (DQO). De todos los factores considerados en el análisis, los factores que influyen en la respuesta son: Concentración de ozono y tiempo de contacto de ozono.

Las interacciones de primer orden que influyen en la variable de respuesta son: Interacción de la concentración de ozono con el tiempo de contacto de ozono, y la interacción del tiempo de contacto de ozono con el tiempo de filtración. Esto significa que al modificar uno de los factores la respuesta también cambia.

Costos

Dentro del costo total del tratamiento del agua de estudio, el costo de filtración es el mayor, debido a la gran área de membrana requerida para tratar el gasto de agua planteado.

La ozonación ayuda en la reducción del ensuciamiento de la membrana de filtración, esto implica un ahorro del 50% en los costos de limpieza de la membrana, y un 7.5% de ahorro en el costo total de la operación de filtración.

Calidad efluente final

El tratamiento propuesto cumple con las expectativas planteadas al inicio del trabajo, se logran remociones significativas en los parámetros analizados, es así como con las mejores condiciones de operación se alcanza una remoción del 95% en color, 88% en turbiedad, 75% en DQO, 27% en COT y 78% en UV₂₅₄.

Desde el punto de vista de los parámetros fisicoquímicos analizados en este trabajo, el efluente final cumple parcialmente con la NOM-014-CONAGUA-2003 y de acuerdo con los resultados obtenidos sería viable la recarga superficial o subsuperficial.

Recomendaciones

Se recomienda realizar análisis complementarios de remoción de microorganismos patógenos, así como también el análisis de contaminantes específicos contenidos en la NOM-127-SSA1-1994 para analizar la efectividad del tratamiento propuesto y determinar si se cumple con lo estipulado en la normatividad para la recarga de acuíferos.

ANEXOS

ANEXO 1

Balance de masa en el reactor para las pruebas de ozonación del diseño experimental.

Tabla A 1.1 Balance de masa en el reactor Experimento No. 4 y 8.

[O₃]ge: 5mg/L - 10 minutos de contacto

[O ₃] gas Entrada mg/L	Tiempo contacto min	[O ₃] gas Salida mg/L	[O ₃] Líquido mg/L	Dosis O ₃ Aplicada mg/L	Dosis O ₃ Transferida mg/L	Consumo O ₃ mg/L	Eficiencia transferencia %
5	1	1.2	0.040	1.4	1.1	1.0	76.00
5	2	1.4	0.085	2.8	2.0	1.9	72.00
5	3	1.7	0.160	4.2	2.8	2.6	66.00
5	4	2.1	0.230	5.6	3.2	3.0	58.00
5	5	2.3	0.350	6.9	3.8	3.4	54.00
5	6	2.4	0.370	8.3	4.3	4.0	52.00
5	7	2.5	0.400	9.7	4.9	4.5	50.00
5	8	2.7	0.430	11.1	5.1	4.7	46.00
5	9	2.8	0.450	12.5	5.5	5.1	44.00
5	10	2.9	0.520	13.9	5.8	5.3	42.00

Tabla A 1.2 Balance de masa en el reactor Experimento No. 1 y 5

[O₃]ge: 25 mg/L - 10 minutos de contacto.

[O ₃] gas Entrada mg/L	Tiempo contacto min	[O ₃] gas Salida mg/L	[O ₃] Líquido mg/L	Dosis O ₃ Aplicada mg/L	Dosis O ₃ Transferida mg/L	Consumo O ₃	Eficiencia Transferencia %
25	1	6.0	0.500	6.9	5.3	4.8	76.00
25	2	9.4	0.800	13.9	8.7	7.9	62.40
25	3	13.1	1.200	20.8	9.9	8.7	47.60
25	4	14.7	1.470	27.8	11.4	10.0	41.20
25	5	15.6	1.890	34.7	13.1	11.2	37.60
25	6	16.2	1.900	41.7	14.7	12.8	35.20
25	7	17.0	1.920	48.6	15.6	13.6	32.00
25	8	17.7	1.970	55.6	16.2	14.3	29.20
25	9	18.4	2.100	62.5	16.5	14.4	26.40
25	10	19.0	2.300	69.4	16.7	14.4	24.00

Tabla A 1.3 Balance de masa en el reactor Experimento No. 6 y 7

[O₃]ge: 5 mg/l - 20 minutos de contacto.

[O ₃] gas Entrada mg/L	Tiempo contacto min	[O ₃] gas Salida mg/L	[O ₃] Líquido mg/L	Dosis O ₃ Aplicada mg/L	Dosis O ₃ Transferida mg/L	Consumo O ₃	Eficiencia Transferencia %
5	1	0.9	0.010	1.4	1.1	1.1	82.00
5	2	1.2	0.100	2.8	2.1	2.0	76.00
5	3	1.3	0.110	4.2	3.1	3.0	74.00
5	4	1.4	0.130	5.6	4.0	3.9	72.00
5	5	1.5	0.160	6.9	4.9	4.7	70.00
5	6	1.6	0.200	8.3	5.7	5.5	68.00
5	7	1.9	0.220	9.7	6.0	5.8	62.00
5	8	2.0	0.240	11.1	6.7	6.4	60.00
5	9	2.2	0.300	12.5	7.0	6.7	56.00
5	10	2.4	0.480	13.9	7.2	6.7	52.00
5	11	2.5	0.490	15.3	7.6	7.1	50.00
5	12	2.6	0.520	16.7	8.0	7.5	48.00
5	13	2.7	0.550	18.1	8.3	7.8	46.00
5	14	2.8	0.600	19.4	8.6	8.0	44.00
5	15	2.9	0.610	20.8	8.8	8.1	42.00
5	16	3.0	0.660	22.2	8.9	8.2	40.00
5	17	3.2	0.710	23.6	8.5	7.8	36.00
5	18	3.3	0.770	25.0	8.5	7.7	34.00
5	19	3.4	0.830	26.4	8.4	7.6	32.00
5	20	3.6	0.92	27.8	7.8	6.9	28.00

Tabla A 1.4 Balance de masa en el reactor Experimento No. 2 y 3

[O₃]ge: 25 mg/l - 20 min de contacto.

[O ₃] gas Entrada mg/L	Tiempo contacto min	[O ₃] gas Salida mg/L	[O ₃] Líquido mg/L	Dosis O ₃ Aplicada mg/L	Dosis O ₃ Transferida mg/L	Consumo O ₃	Eficiencia Transferencia %
25	1	7.2	0.220	6.9	4.9	4.7	71.20
25	2	10.1	0.270	13.9	8.3	8.0	59.60
25	3	12.5	0.300	20.8	10.4	10.1	50.00
25	4	14.4	0.340	27.8	11.8	11.4	42.40
25	5	15.5	0.360	34.7	13.2	12.8	38.00
25	6	16.4	0.410	41.7	14.3	13.9	34.40
25	7	17.4	0.520	48.6	14.8	14.3	30.40
25	8	18.1	0.640	55.6	15.3	14.7	27.60
25	9	18.7	0.800	62.5	15.8	15.0	25.20
25	10	19.2	1.600	69.4	16.1	14.5	23.20
25	11	19.4	1.630	76.4	17.1	15.5	22.40
25	12	19.8	1.680	83.3	17.3	15.7	20.80
25	13	20.2	1.700	90.3	17.3	15.6	19.20
25	14	20.3	1.720	97.2	18.3	16.6	18.80
25	15	20.5	1.750	104.2	18.8	17.0	18.00
25	16	20.8	1.770	111.1	18.7	16.9	16.80
25	17	21.0	1.830	118.1	18.9	17.1	16.00
25	18	21.2	1.880	125.0	19.0	17.1	15.20
25	19	21.3	1.960	131.9	19.5	17.6	14.80
25	20	22	2.2	138.9	16.7	14.5	12.00

ANEXO 2

Fotografías de la experimentación

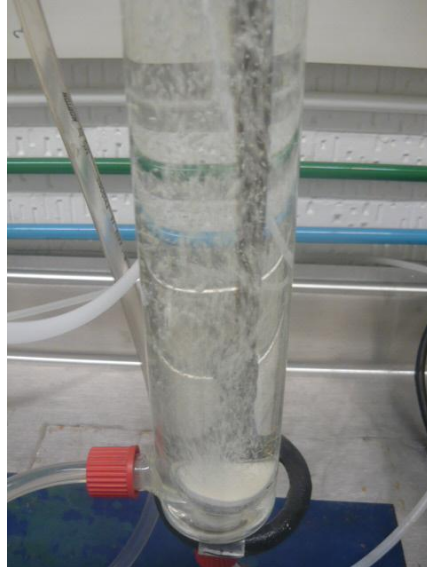


Figura A2.1 Columna de vidrio para prueba de ozonación



Figura A2.2 Efluente ozonado y ultrafiltrado



Figura A2.3 Reactivo de indigo para determinación de ozono en fase líquida



Figura A2.4 Digestor HACH 45600



Figura A2.5 Espectrofotómetro HACH DR/2000



Figura A2.6 Turbidímetro HACH 2100P

ANEXO 3

Tabla A3.1 Datos para la determinación del tipo de ensuciamiento de la membrana de ultrafiltración para agua sin ozono.

Tiempo (min)	Volumen Q (mL)	Tiempo Q (s)	Volumen permeado (mL)	Volumen acumulado (mL)	t/V	Flux J (L/hm ²)	J/Jo	Ln J/Jo	1/J
0	25	0	0	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	25	38	390	390	0.026	50.395	1.000	0.000	0.020
20	25	41	380	770	0.026	46.707	0.927	0.076	0.021
30	25	44	350	1120	0.027	43.523	0.864	0.147	0.023
40	25	46	330	1450	0.028	41.630	0.826	0.191	0.024
50	25	50	310	1760	0.028	38.300	0.760	0.274	0.026
60	25	52	300	2060	0.029	36.827	0.731	0.314	0.027
70	25	53	290	2350	0.030	36.132	0.717	0.333	0.028
80	25	55	280	2630	0.030	34.818	0.691	0.370	0.029
90	25	57	270	2900	0.031	33.596	0.667	0.405	0.030
100	25	59	260	3160	0.032	32.458	0.644	0.440	0.031
110	25	59	250	3410	0.032	32.458	0.644	0.440	0.031
120	25	62	240	3650	0.033	30.887	0.613	0.490	0.032
130	25	62	240	3890	0.033	30.887	0.613	0.490	0.032
140	25	65	235	4125	0.034	29.462	0.585	0.537	0.034
150	25	67	230	4355	0.034	28.582	0.567	0.567	0.035
160	25	68	220	4575	0.035	28.162	0.559	0.582	0.036
170	25	68	220	4795	0.035	28.162	0.559	0.582	0.036
180	25	69	210	5005	0.036	27.754	0.551	0.597	0.036
190	25	72	210	5215	0.036	26.597	0.528	0.639	0.038
200	25	76	205	5420	0.037	25.197	0.500	0.693	0.040
210	25	76	200	5620	0.037	25.197	0.500	0.693	0.040
220	25	77	200	5820	0.038	24.870	0.494	0.706	0.040
230	25	77	195	6015	0.038	24.870	0.494	0.706	0.040
240	25	81	195	6210	0.039	23.642	0.469	0.757	0.042

Tabla A.3.2 Datos para la determinación del tipo de ensuciamiento de la membrana de ultrafiltración para agua ozonada.

Tiempo (min)	Volumen Q (mL)	Tiempo Q (s)	Volumen permeado (mL)	Volumen acumulado (mL)	t/V	Flux J (L/hm ²)	J/Jo	Ln J/Jo	1/J
0	25	36	0	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	25	36	400	410	0.024	53.194	1.000	0.000	0.019
20	25	37	380	810	0.025	51.757	0.973	0.027	0.019
30	25	40	360	1190	0.025	47.875	0.900	0.105	0.021
40	25	42	345	1550	0.026	45.595	0.857	0.154	0.022
50	25	43	335	1895	0.026	44.535	0.837	0.178	0.022
60	25	45	330	2230	0.027	42.556	0.800	0.223	0.023
70	25	46	325	2560	0.027	41.630	0.783	0.245	0.024
80	25	47	300	2885	0.028	40.745	0.766	0.267	0.025
90	25	49	300	3185	0.028	39.082	0.735	0.308	0.026
100	25	49	290	3485	0.029	39.082	0.735	0.308	0.026
110	25	53	260	3775	0.029	36.132	0.679	0.387	0.028
120	25	53	260	4035	0.030	36.132	0.679	0.387	0.028
130	25	53	260	4295	0.030	36.132	0.679	0.387	0.028
140	25	55	260	4555	0.031	34.818	0.655	0.424	0.029
150	25	56	260	4815	0.031	34.196	0.643	0.442	0.029
160	25	57	260	5075	0.032	33.596	0.632	0.460	0.030
170	25	57	260	5335	0.032	33.596	0.632	0.460	0.030
180	25	59	255	5595	0.032	32.458	0.610	0.494	0.031
190	25	61	250	5850	0.032	31.393	0.590	0.527	0.032
200	25	61	245	6100	0.033	31.393	0.590	0.527	0.032
210	25	61	240	6345	0.033	31.393	0.590	0.527	0.032
220	25	62	240	6585	0.033	30.887	0.581	0.544	0.032
230	25	63	240	6825	0.034	30.397	0.571	0.560	0.033
240	25	64	240	7065	0.034	29.922	0.563	0.575	0.033

ANEXO 4

Tabla A4.1

Datos del programa estadístico SPSS versión 15.0 para el análisis estadístico de la información.

	A	B	C	Respuesta	Tratamiento	var	var	var	var	var	var	var	var	var	var	var
1	25	10	3	58.00	3											
2	25	20	6	75.00	8											
3	25	20	3	75.00	7											
4	5	10	6	50.00	2											
5	25	10	6	58.00	4											
6	5	20	3	63.00	5											
7	5	20	6	75.00	6											
8	5	10	3	53.00	1											
9	5	10	3	58.00	1											
10	25	10	3	60.00	3											
11	25	20	3	73.00	7											
12	5	10	6	55.00	2											
13	5	20	3	60.00	5											
14	5	20	6	73.00	6											
15	25	10	6	55.00	4											
16	25	20	6	70.00	8											
17																
18																
19																
20																
21																
22																
23																
24																
25																
26																
27																
28																
29																
30																
31																

Bibliografía

Aptel y Buckley (1998) Tipo de operaciones de membrana 13-40 pp en Tratamiento del agua por procesos de membrana. Mallevalle J., Odendaal P., Wiesner M. Editores, American Water Works Association Research Foundation, Lyonnaise des Eaux, Water Research Commission of South Africa, Mc GRAW HILL Interamericana de España S.A.U.

AWWA. (1990) Seminar Proceedings, Practical Experiences with ozone for organics control and disinfection.

Aiken G.R., (1992) Isolation of hydrophilic organic acids from water using nonionic macroporous resins. *Org. Geochemistry*, Vol 18, No.4, 567-573.

Bader H, Hoigne J (1981) Determination of ozone in water by the indigo method. *Water Research* 15, 89-112.

Barredo-Damas S et al., (2005) Study of preozonation influence on the physical-chemical treatment on textile wastewater. *Desalination* 182, 267-274.

Beltran Heredia J. et al., (2001) Kinetics of the reaction between ozone and phenolic acids present in agro-industrial wastewater. *Water Research* 35 (4) 1007-1085.

Benitez Javier F. et al., (2008) Ozone and membrane filtration based strategies for the treatment of cork processing wastewater. *Journal of Hazardous Materials* 152, 373-380.

Bettler et al., (2005) Secondary Effluent Treatment with ozone. IOA 17th World Ozone Congress - Strasbourg 2005, I.1.3-1 a I.1.3-10.

Comisión Nacional del Agua, (2000) Estudio para la recarga del acuífero en el suelo de conservación del Distrito Federal.

Comisión Nacional del Agua, (2007) Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación.

Ernst et al., (1998) Ozonation of DOC municipal WWTP effluent for groundwater recharge. *Water Science and Technology*, 40 (4-5), 277-284.

Fernández A. et al., (2005) Inventario de experiencias de recarga artificial de acuíferos en el mundo, *Tecnología y desarrollo*, Vol.3, 1-24.

Gong Jianli et al., (2008) O₃ and UV/O₃ oxidation of organic constituents of biotreated municipal wastewater. *Water Research* 42, 1238-1244.

Gutiérrez Pulido et al., (2008) *Análisis y diseño de experimentos*. Segunda edición, McGraw Hill.

Hoigné J, Bader H (1981) *The chemistry of ozone in water*, Process technologies for water treatment, Plenum publishing corporation, 121-141.

Jarusutthirak et al., (2002) Fouling Characteristics of wastewater effluent organic matter isolates on NF and UF membranes. *Desalination* 145, 247-255.

Jiménez Cisneros Blana Elena (2001) *La Contaminación Ambiental en México, Causas, efectos y tecnología apropiada*. Limusa, Colegio de Ingenieros Ambientales de México, A.C., Instituto de Ingeniería de la UNAM, FEMISCA.

Karnik B.S. et al., (2005). The effects of combined ozonation and filtration on disinfection by-product formation. *Water Research* 39, 2839-2850.

Langlais B, Reckhow D.A., Brink D.R. (1991) *Ozone in water treatment, Application and Engineering*. Lewis Publishers, Michigan, USA.

Lee C.W. et al., (2007) Application of ultrafiltration hybrid membrane processes for reuse of secondary affluent. *Desalination* 202, 239-246.

Leenher J. et al., (2003) Aquatic Organic Matter. *Environmental Science and Technology*, January 1, 19A-26A

Le-Clech et al., (2006) Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment. *Journal of Membrane Science* 284, 17-53.

Levenspiel O. (1998) *Ingeniería de las reacciones químicas*. Reverté S.A., Barcelona España, segunda edición.

Menéndez Garza Fernando (2000). Director General de Ecofin Consultores.

Metcalf and Eddy, Inc (2003) *Wastewater engineering: Treatment and reuse*, Fourth edition, Mc Graw Hill, USA.

Mozia Sylwia et al., (2006) Application of an ozonation-adsorption-ultrafiltration system for surface water treatment. *Desalination* 190.

Monje Ramírez Ignacio (2004) *Ozonación de lixivados estabilizados de rellenos sanitarios para transformar materia orgánica recalcitrante soluble*. Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de Doctorado.

Norma Oficial Mexicana NOM - 014 - CONAGUA (2003) Establece los requisitos que deben cumplir la calidad del agua, la operación y el monitoreo utilizados en los sistemas de recarga artificial de acuíferos.

Ramirez Hermenegildo Raul (2008) *Oxidación con Ozono de un Efluente Biológico para la Recarga Artificial de Acuífero*. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de Licenciatura.

Rice G. (2002) Ozono ¿De que se trata?, Organización Internacional del Ozono, conferencia regional, Mexico 2002. RICE International Consulting Enterprises.

Roustan M. (2007) Application of ozonation process for advanced water and wastewater treatment: Engineering aspects. Curso Insituto de Ingeniería, UNAM 2007.

Scoot K y Hughes R. (1996) Industrial Membrane Separation Technology. Blackie academic and professional 1-112 y 151-180.

Smith J.M. (1998) Ingeniería de la cinética química. CECSA, México, Décima primera reimpresión.

Solanet M. et al., (1989) Evaluación económica de proyectos de inversión, Editorial Ateneo.

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1995) American Public Health Association, American Works Association, Water Environment Federation. 19th ed, Washington, D.C.

Tanaka T et al., (2001) Chemical oxidation or organic matter in secondary treated minicipal wastewater by using methods involving ozone, ultraviolet radiation and TiO₂ catalyst. Water sciece and Technology, 43 (10), 295-302.

Tarabara et al., (2008) Pore blocking mechanisms during early stages of membrane fouling by colloids. Journal of Colloid and Interface Science 328, 464-469.

Ultrafiltration and Microfiltration Handbook (1998) Second Edition, Munir Cheryan, CRC Press.

Wang Shutao et al., (2008) Degradation characteristics of secondary effluent of domestic wastewater by combined process of ozonation and biofiltration. Journal of Hazardous Materials 150, 109-114.

Wang Xudong, et al., (2007) Ozonation pretreatment for ultrafiltration of the secondary effluent. *Journal of Membrane Science* 287, 187-191.

Water Reuse (2007) *Issues, Technologies, and Applications*. Metcalf & Eddy / AECOM, McGraw-Hill.

Wei et al., (2008) Size and resin fractionations of dissolved organic matter and trihalomethane precursors from four typical source waters in China. *Environmental Monitoring Assessment*, 141:347-357.

WHO (2003) World Health Organization, Health risks in aquifer recharge using reclaimed water, State of the art report, Edited by Aertgeerts R and Angelakis A.

Williams Mark D. et al., (2007) Membrane bioreactor process for removing biodegradable organic matter from water. *Water Research* 41, 3880-3893.

Ye et al., (2005) Fouling mechanisms of alginate solutions as model extracellular polymeric substances. *Desalination* 175, 7-20.

You Shu-Hai et al., (2007) Effect and mechanism of ultrafiltration membrane fouling removal by ozonation. *Desalination* 202, 224-230.