



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de Estudios Superiores Zaragoza

**“EFECTO DEL OZONO EN LA OPERACIÓN DE UNA MEMBRANA DE
ULTRAFILTRACIÓN EN UN EFLUENTE BIOLÓGICO SECUNDARIO”**

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A:

RICARDO ALAMILLA ESPINOZA

DIRECTOR: DRA. MARÍA TERESA ORTA LEDESMA

ASESOR TECNICO: DR. IGNACIO MONJE RAMÍREZ

MÉXICO, DF. 2009





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

En toda la experiencia universitaria y la conclusión de trabajo de tesis, ha habido personas que merecen las gracias por que sin su valiosa aportación no hubiera sido posible este trabajo, así como hay quienes las merecen por haber plasmado su huella en mi camino.

A mis padres, Estela y Artemio por darme la vida, su apoyo, su guía y su confianza en la realización de este logro. Soy afortunado por contar siempre con su amor, confianza y comprensión. Nunca los defraudare. Esta tesis es suya.

A mis hermanos Lorena, Gabriel y Nahomi, nunca los cambiaria por nada en el mundo, los quiero como no tiene idea. A personitas que llegaron como anillo al dedo a nuestra familia Jesús, Jimena, Valentina ustedes también son parte de este logro.

Agradezco a toda la familia Espinosa y Alamilla por estar siempre conmigo. Juana Sánchez gracias.

Al Intitulo de Ingeniería por abrirme las puertas, Doctora Teresa Orta, Doctor Ignacio e Isaura mil gracias. A la Fes Zaragoza, hubo profesores buenos y malos pero de todos aprendí algo. Gracias.

A los amigos que siempre estuvieron en el momento indicado al 100. Por que frases como... Ponle calma; Y otra como... Un poco más, un poco más ayudaron tanto a este logro. Gracias.

A todas esas personas que han estado cerca de mí por una u otra circunstancia, gracias por su apoyo, amor, amistad, comprensión, de verdad muchas gracias. Y aunque no lo crean me TITULE...

SOON... PATIENCE, PLEASE.

Maynard James Keenan.

ÍNDICE	Pág.
I. RESUMEN	1
II. INTRODUCCION	3
III. OBJETIVOS	8
IV. HIPOTESIS EXPERIMENTAL	9
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES	10
1.1. Aguas residuales del acuífero.	10
1.1.1. Tratamientos de aguas residuales en el Valle de México	11
1.1.2. Sustentabilidad del valle de México.	12
1.2. Recarga natural a nivel nacional y del Valle de México.	13
1.3. Métodos empleados en la recarga de acuíferos.	15
1.4. Caso de estudio de una planta para la recarga de acuíferos: The Torreele Facility.	16
1.5. Aplicación de tecnologías avanzadas en el tratamiento de agua.	18
1.6. Ozono-Ultrafiltracion.	19
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	23
2.1. Principios de operación de los procesos de membrana.	23
2.2. Principio del funcionamiento de los procesos de membrana.	24
2.3. Consumo de energía en el desarrollo de tecnologías de separación por membrana	25
2.4. Intervalos de aplicación de los procesos de membranas según su tamaño de poro	26
2.5. Limites de operación de una membrana	28
2.6. Membranas de Ultrafiltracion.	30
2.7. Ensuciamiento de las membranas.	32
2.8. Aplicaciones industriales	33

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	34
3.1. Efluente biológico secundario.	34
3.2. Análisis de los parámetros fisicoquímicos.	35
3.3. Pre-tratamiento del efluente biológico con ozono	37
3.4. Filtración del efluente biológico en membrana de ultrafiltración de fibra hueca.	38
3.5. Modulo de Ultrafiltración ZW-1 (Zenon®).	39
3.6. Arreglo experimental de la unidad comercial de Ultrafiltración ZW-1 (Zenon®).	40
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES	42
4.1. Caracterización fisicoquímica del efluente biológico secundario.	42
4.2. Filtración del efluente secundario en membrana de fibra hueca ZW-1 (Zenon®).	43
4.3. Línea base de operación de la membrana de ultrafiltración.	43
4.4. Desempeño de la membrana de ultrafiltración durante la filtración del efluente biológico secundario.	44
4.5. Efecto del ozono como etapa de pre-tratamiento en el desempeño de la membrana de ultrafiltración.	45
4.6. Calidad del efluente filtrado en membrana de fibra hueca ZW-1 (Zenon®).	49
4.7. Calidad final de agua tratada mediante ozono y ultrafiltración.	51
5. ESTIMACIÓN DEL COSTO DEL EFLUENTE BIOLÓGICO SECUNDARIO.	52
5.1. Estimación de costo de la etapa de pre-ozonación.	52
5.2. Estimación de costo del proceso de membrana.	58
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES	60
BIBLIOGRAFÍA	63
ANEXO 1	67

ÍNDICE DE TABLAS	Pág.
Tabla 1: Consumo de agua en un centro de población en la Ciudad de México.	13
Tabla 2: Parámetros medidos por Park 2002 en la utilización de ozono para reducir el ensuciamiento de una membrana de Ultrafiltración.	20
Tabla 3: Resultados reportados por Lubello 2003, en el uso de la ultrafiltración como tratamiento terciario.	21
Tabla 4: Resultados en el tratamiento de Ultrafiltración (Lubello 2003).	21
Tabla 5: Efecto del ozono como etapa de pre-tratamiento (Minhalma 2005).	22
Tabla 6: Clasificación de las membranas para el tratamiento de agua.	24
Tabla 7: Características de los sistemas de membrana.	27
Tabla 8: Parámetros medidos durante la caracterización del efluente secundario. (APHA, 1998).	35
Tabla 9: Características y límites de operación de la membrana de fibra hueca ZW-1 (Zenon®).	39
Tabla 10: Caracterización fisicoquímica del efluente biológico secundario.	42
Tabla 11 : Condiciones de operación para la evaluación del ozono $D[O_3] = 3.83 \text{ mg/L}$.	46
Tabla 12 : Condiciones de operación: Segunda corrida $D[O_3]: 7.6 \text{ mg/L}$	47
Tabla 13: Corridas de filtración en membranas de ultrafiltración en fibra hueca con y sin pre-tratamiento con ozono.	48
Tabla 14: Análisis del efluente secundario filtrado por la unidad ZW-1 (Zenon®).	49
Tabla 15: Resultados obtenidos en la filtración de un efluente secundario por Ultrafiltración en módulo ZW-10 (Zenon®). Lubello et al., 2003.	50
Tabla 16: Comparación entre el efluente filtrado y el concentrado.	50
Tabla 17: Calidad del efluente biológico y el agua tratada con ozono y ultrafiltración en membrana de fibra hueca.	51
Tabla 18: Porcentajes estimados para cada uno de los componentes de mantenimiento para grandes y pequeños sistemas.	53
Tabla 19: Condiciones de operación óptimas para estimar el costo de tratamiento del efluente secundario.	56
Tabla 20: Costos	57
Tabla 21: Datos para el cálculo de los costos de operación y mantenimiento.	57
Tabla 22 : Costos Obtenidos	58

ÍNDICE DE FIGURAS	Pág.
Figura 1.4. Diagrama de flujo de la planta tratadora para la recarga de aguas subterráneas de Torreele en Bélgica.	17
Figura 2.3. Tendencia del consumo de energía de las Tecnologías de Membrana.	26
Figura 2.4. Intervalos de aplicación de los Procesos de Membrana.	27
Figura 2.6.1 .Propiedades de membranas con rangos de separación.	32
Figura 3.1 .Localización aérea de la Planta de tratamiento “Cerro de la Estrella”.	34
Figura 3.2. Muestra del efluente biológico secundario.	35
Figura 3.3. Arreglo experimental de la unidad de oxidación con ozono continuo.	37
Figura 3.5. Modulo de Ultrafiltracion de fibra hueca ZW-1 (Zenon®).	39
Figura 3.6. Diagrama de Ultrafiltracion (Diagrama de Flujo).	41
ÍNDICE DE GRAFICAS	
Grafica 4. 4. Comparación de flujo del permeado entre el efluente secundario y la línea base.	45
Grafica 4.5. Grafica de comparación del efluente ozonado a una dosis de 7.6 y 3.8 mg/L.	48
Grafica 5. Grafica para estimar costos de capital.	54

I. RESUMEN

El desarrollo de esta tesis tuvo como objetivo examinar el efecto del ozono como etapa de pre-tratamiento sobre una membrana comercial de ultrafiltración tipo fibra hueca modelo ZW-1 (Zenon®) utilizando agua residual tratada (efluente biológico secundario) proveniente de la Planta de Tratamiento Cerro de la Estrella, a nivel laboratorio esto como una alternativa para la saneamiento de aguas residuales para la recarga de acuíferos.

La caracterización fisicoquímica del efluente secundario fue realizada en base a parámetros como pH, turbidez, color, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales (SDT), demanda química de oxígeno (DQO), obteniéndose valores promedio para diferentes lotes de muestreo, como 30.43 de DQO, 42.29 Unidades Pt-Co en color y 32.7 mg/L de Sólidos Disueltos Totales (SDT), por mencionar algunos.

Durante este estudio se buscaron las mejores condiciones de operación de la unidad de ultrafiltración, se realizó un pre-tratamiento al módulo ZW-1 con agua de stilada, obteniendo que las condiciones más aceptables en el caso del flujo de agua manejada y la presión a la cual debería trabajar la membrana fueron de: 0.062 L/min. y 5 psi (lbf/in²), por razones de seguridad de la membrana y especificación del proveedor.

Experimentos realizados para evaluar el efecto de ozono como etapa de pre-tratamiento, se utilizaron dosis de Ozono de 3.85 y 7.6 mg/L. El efecto que tuvo el Ozono como etapa de pre-tratamiento en el efluente con estas dosis fue la disminución en un 69 % para el color, 0.72 % para la turbidez y un 37 % para el DQO, esto para una dosis de Ozono de 7.6 mg/L.

El agua obtenida por filtración en membranas de fibra hueca ZW-1 mejora su calidad significativamente con respecto al efluente sin filtrar. Se observaron remociones en el contenido de color 67%, turbidez 80%, y DQO del 40%. De estos resultados se deduce que una parte de la materia presente en el efluente biológico puede ser removida mediante un simple proceso de ultrafiltración usando membranas de fibra hueca. Sin embargo la remoción más notable se tuvo con la combinación de ozono-ultrafiltración, obteniendo una eliminación alta de parámetros como Sólidos Disueltos Totales (SDT) en un 13 %, la remoción del Color fue de 89 %, la turbidez la disminución fue de un 93

%, con respecto a la DQO la reducción fue de 57 %, esto comparado con la caracterización previa del efluente secundario.

De acuerdo al método de estimación de costos realizada, para el efluente secundario de la planta de tratamiento Cerro de la Estrella se obtuvo un costo para la aplicación de ozono de \$0.1754 por cada metro cúbico de agua.

Aumentando la calidad del agua fue un aumento de igual manera en sus costos, siendo de \$ 4.82 por cada metro cúbico de agua tratada, esto con la aplicación de la ultrafiltración-ozono, incrementando el costo de tratamiento de aproximadamente de \$ 4 de diferencia conforme a la utilización de ozono como único tratamiento.

En base a los datos encontrados en esta investigación se concluye que el ozono es una buena opción como etapa de pre-tratamiento para la reducción de lo llamado fouling, causado por la materia orgánica e inorgánica presente en el agua residual, aumentando así su flux (Gasto por unidad de Área), su tiempo de operación y por lo tanto su tiempo de vida útil de la membrana.

II. INTRODUCCIÓN

La filtración por medio de membranas es un método eficaz para quitar partículas, microorganismos y la materia orgánica del agua. Comparado con los métodos de tratamiento convencionales, los procesos de la membrana pueden proporcionar agua de mejor calidad reduciendo al mínimo la demanda desinfectante, proporciona un control operacional más fácil y menos mantenimiento, (*E.E.U.U. EPA, 2001; Cleveland, 1999; Nakatsuka y otros, 1996*).

Una desventaja del proceso de ultrafiltración es la disminución del flujo de agua a la ensuciamiento de la membrana "Fouling". Como consecuencia de esta situación hay nuevas tecnologías que se han desarrollado para la reducción del fouling, varios procesos químicos son aplicados para la reducción de estos compuestos de doble ligadura (Fenoles), el más reciente utilizado es el ozono, el objetivo de este es la transformación de estos agentes contaminantes en sustancias de menor peso molecular. El ozono es una de las técnicas que ha dado mejores resultados en la degradación de estos compuestos, que al mismo tiempo reduce en gran parte el problema de taponamiento de la membrana, el ozono es uno de los reactivos con más poder de oxidación, se ha demostrado ser capaz de destruir varios compuestos fenoles con efectividad, con la ventaja que oxidar productos que usualmente producen el fouling.

Por tal motivo esta tesis parte de la problemática de la escasez de agua que se sabe es un problema que atañe a toda la ciudad en el ámbito mundial. Por lo cual se propone el tratamiento de aguas residuales para la recarga de acuífero. Aunque el agua es el elemento que abunda en grandes cantidades en la tierra, no toda es de calidad potable, ni puede ser utilizada para satisfacer las demandas que se tienen de ella en los sectores industrial, agrícola y usos domésticos entre otros.

De toda el agua que existe en el planeta, el 98 % corresponde al agua de los mares y océanos y solo el 2 % al agua dulce; se podría pensar que ese porcentaje es suficiente para abastecer a la población mundial, si tomamos en cuenta que el 2 % equivalen a 35 millones de kilómetros cúbicos ($M Km^3$ de agua), pero no es así, el 68 % del agua cruda del planeta pertenece al hielo polar, por lo que solo se tendrían disponibles $11 M Km^3$ aún así, este volumen de agua no está al alcance del hombre en su totalidad. Una pequeña porción $0.001 M Km^3$ corresponden a aguas biológicas, $10.546 M Km^3$ están

distribuidas en los mantos acuíferos y la humedad y solamente 0.443 M K m³ se encuentran en la superficie de lagos, presas, humedales y nieve. (*Castellan, 2000*).

Esta crisis de la agua se refleja en México; muchos de los ríos del país han ido disminuyendo su caudal casi por completo o se encuentran contaminados. En las grandes ciudades del país, se extraen volúmenes de agua del subsuelo lo que repercute en una sobreexplotación de los acuíferos.

Por tanto el objetivo de esta tesis es tratar agua residual para la recarga artificial de los acuíferos del Valle de México.

La reutilización de aguas residuales está cobrando cada vez más importancia en las zonas áridas y semiáridas, como consecuencia de la demanda creciente de recursos hídricos para prácticamente todos los usos. No obstante, la reutilización se ha limitado en la mayor parte de las ocasiones a los usos agrícolas, olvidando otras posibilidades. Entre estas se pueden destacar los usos lúdicos (Campos de Golf), los usos industriales y la Recarga Artificial de Acuíferos (RAA).

Para la RAA, y dada las características de las aguas subterráneas, se requiere filtrar agua con características que no comprometan la calidad del agua no afectando a sí la posibilidad de su uso posterior.

Los objetivos de la recarga pueden ser variados (*Salgot, 2001*). Por una parte el acuífero puede actuar como método adicional de tratamiento del agua residual parcialmente regenerada; por otro puede servir como sistema de almacenamiento sin necesidad de infraestructuras superficiales y por último puede incluso servir como método de transporte del agua.

Los acuíferos son la principal fuente de abastecimiento de agua potable en la zona Metropolitana de la Ciudad de México. La mayor parte de los acuíferos se recargan de manera natural por la precipitación fluvial que se infiltra a través de suelo y roca, mediante un proceso que se conoce como recarga natural.

La recarga artificial de acuíferos surge como una alternativa tecnológica decisiva en la sobreexplotación de acuíferos, escasez de agua e intrusión salina pues ofrece los siguientes beneficios: a) restablecimiento del manto sobreexplotado, b) provisión de una barrera a la intrusión salina en zonas costeras y c) almacenamiento de agua durante la

época alta de disponibilidad del agua. Con base en esto, algunos países desarrollados han decidido recargar artificialmente los acuíferos con agua residual tratada mediante infiltración o inyección, mientras que en países en desarrollo existen casos en que los acuíferos se han recargado pasivamente por uso de fosas sépticas, agua residual cruda aplicada a la irrigación y otros medios (recarga incidental).

Una consideración importante en el uso de agua tratada para la recarga artificial de acuíferos es la posible presencia de agentes químicos y microbiológicos que podrían ser peligrosos para la salud humana y para el ambiente, sobre todo en el caso de una recarga incidental : fortuita y pobremente planeada (*WHO,2003*). Por ello, la recarga del agua subterránea con agua residual municipal presenta un amplio espectro de retos técnicos y de la salud que se deben evaluar cuidadosamente.

Existen preocupaciones sobre el impacto que pudieran tener ciertos contaminantes de reciente detección en la salud humana a largo plazo y la percepción pública acerca de la reutilización de agua en consumo humano. Hay cuatro factores de la calidad del agua significativos en la recarga de agua subterránea con agua reciclada: a) No patógenos humanos, b) contenido mineral, c) metales pesados, y d) compuestos orgánicos traza. De estos, los no patógenos humanos y los compuestos orgánicos traza son de particular interés cuando la recarga involucra acuíferos que se usan para el suministro público (*WHO, 2003*).

Actualmente en la Ciudad de México el volumen de agua que se extrae de los acuíferos es mayor de la que se recupera naturalmente por infiltración del agua de lluvia, cada segundo se extrae del subsuelo 45 m^3 y solo se reponen 25 m^3 . En consecuencia se compacta el suelo y propicia el hundimiento, de 10 cm. por año, aunque en ciertos lugares como Xochimilco, Tlahuac, Ecatepec, Nezahualcóyotl y Chalco el suelo se ha compactado hasta 40 cm., en tan solo 1 año; por ello el agua que se extrae contiene cada vez mayor cantidad de minerales, que la hacen de menor calidad.

Una alternativa a la recarga natural es la recarga artificial mediante la inyección de aguas residuales tratadas, que además de contribuir en la recarga de los mantos freáticos, ayudaría a reducir la disposición de los grandes volúmenes de agua que descarga la ciudad ($255 \text{ m}^3/\text{s}$; CNA 2003).

Respecto a este, el 18 de septiembre del 2003 se publicó en la gaceta oficial del Distrito Federal, el Proyecto de Norma Ambiental para el Distrito Federal PROY-NADF-003-AGUA-2002, que establece las condiciones y requisitos para la recarga en el Distrito Federal por la inyección directa de agua residual tratada al Acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

El proyecto de norma tiene su origen en uno de los mayores problemas que enfrenta actualmente el Distrito Federal que es la contaminación de agua para consumo humano. Lo que ha ocasionado la sobre explotación del acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, del cual se extrae más de 50 % del agua que la población del Distrito Federal recibe para su consumo. La explotación intensiva del agua subterránea a una urbanización progresiva ha originado un déficit por la menor cantidad de agua que se infiltra al acuífero, tanto de manera natural como artificial. (*Gaceta Oficial del Distrito Federal, 2003*).

Por tanto esta tesis contempla evaluar el efecto de la pre-ozonación en una unidad de ultrafiltración para la remoción de Materia Orgánica de un efluente biológico secundario de una Planta Tratadora de Agua Residual (PTAR), para la recarga de un acuífero.

La ultrafiltración es un proceso de tratamiento físico que emplea membranas semipermeables, operan a bajas presiones, separando partículas coloidales, bacterias y virus, sólidos suspendidos, en especial separa partículas de alto peso molecular. Existen varios tipos de membranas para aplicaciones diferentes; las espirales permiten que el agua a filtrar recorra toda la membrana y sea acumulada en un canal central, reduce costos de energía al reducir requerimientos de bombeo; las tubulares trabajan bien con altas concentraciones de contaminantes, su limpieza puede ser tanto química como mecánica y su obstrucción es mínimo; las membranas de fibra hueca (Hollow Fiber) son pequeños tubos capilares que conforman un módulo, con diámetros menores a 1mm. Lo que da una cantidad de área de filtración muy amplia comparado con espacio un mínimo requerido, se necesita un modesto consumo de energía, flexibilidad y bajo costo de operación.

Las membranas no aseguran la remoción total de microorganismos, se ha reportado que los sistemas de membranas no son barreras absolutas a los patógenos (*Levine et al, 1999*), lo que implica el empleo de otros procesos de tratamiento avanzado, como por

ejemplo la combinación ozono-ultrafiltración para obtener mejores resultados en la eliminación de micro patógenos.

El ozono es un oxidante utilizado en el tratamiento de agua para eliminar color, sabor y olor; desinfectar, eliminar hierro y manganeso, oxidar fenoles y cianuro, etc. Ocupa el segundo lugar en efectividad después de los radicales hidroxilos entre los productos empleados para desinfección, mismos que pueden ser formados por descomposición del ozono, esto bajo condiciones de pH básicas o mediante el uso de promotores de las reacciones de descomposición (ej. H_2O_2 , UV, algunos metales). En medio ácido el ozono actúa en forma molecular (O_3), atacando de manera selectiva estructuras con dobles ligaduras, en especial sobre compuestos aromáticos, aminas y mercaptanos. No obstante, es necesario conjuntar este potencial con otro proceso para alcanzar los niveles de calidad de agua que se requiere para la inyección.

III. OBJETIVOS.

GENERAL

Evaluar el efecto de la pre-ozonación en una unidad de ultrafiltración para la remoción de Materia Orgánica de un efluente secundario de una Planta Tratadora de Agua Residual (PTAR), para la recarga de un acuífero.

PARTICULARES

1. Caracterizar el efluente secundario de tratamiento biológico con base en parámetros de calidad de agua (físicos y químicos), establecidos en el proyecto de norma (PROY-NADF-003-AGUA-2002) para recarga artificial de acuífero.
2. Establecer las condiciones experimentales de operación, flujo de agua y presión de membrana, para una unidad de ultrafiltración comercial (Zenon W-1) con membrana de fibra hueca, para llevar a cabo la ultrafiltración de un efluente biológico secundario.
3. Evaluar el efecto de Ozono como etapa de pre-tratamiento en el desempeño de la membrana de ultrafiltración, durante el tratamiento del efluente biológico secundario, determinando como parámetros de control los cambios en la velocidad de flujo y presión de operación de la membrana.
4. Estimar la calidad final del agua tratada, mediante ozono y ultrafiltración, bajo las mejores condiciones de operación.
5. Realizar la estimación preliminar de los costos de tratamiento con ozono con base en las dosis de ozono aplicadas y el correspondiente consumo de energía.

HIPOTESIS EXPERIMENTAL

Considerando que el ozono es uno de los oxidantes con mayor potencial de oxidación-reducción aplicado al tratamiento de aguas, en esta tesis como parte central del estudio de investigación, se propone ver en qué medida el ozono puede mejorar el desempeño y la vida útil de una membrana en el proceso de ultrafiltración.

CAPITULO 1. ANTECEDENTES

1.1. Aguas residuales del acuífero.

El tratamiento de aguas residuales es una medida indispensable para proteger el medio ambiente y la salud pública. Actualmente se tiene un creciente interés sobre el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales con el propósito de disminuir el impacto ambiental y buscan el reúso de este tipo de aguas.

El crecimiento de las poblaciones y la creciente escasez de fuentes de abastecimiento de agua potable, obtenida mediante procesos convencionales, han acelerado el reúso del agua residual en el mundo. Se ha estimado que en el 2008 el 40% de la población mundial vivirá en países con escasez de agua (*WHO, 2003*). En los últimos años, Estados Unidos ha adoptado un gran número de medidas con respecto al manejo del agua que incluyen el uso de agua residual tratada para aumentar su disponibilidad en sus fuentes de almacenamiento.

En los Estados Unidos de América (USA) e Israel (*Bouwer et al., 1994; Sack, 2001*), se aprovecha la sinergia depuradora del sistema suelo-acuífero mediante un proceso denominado SAT (Soil Aquifer Treatment, por sus siglas en inglés), al que en algunos casos se puede añadir la acción de la vegetación (*Salgot et al., 1996*). El agua generada a lo largo del año de forma más o menos constante, se almacena para poder aprovecharla en las épocas de mayor necesidad. Esto puede ser especialmente importante en las zonas costeras, en las que los picos de demanda de agua suelen darse en verano (turismo, agricultura, jardines, campos de golf, etc) mientras que en invierno la demanda es extraordinariamente baja. La disponibilidad de agua recargada en invierno para ser utilizada en verano permite disminuir el impacto sobre los ecosistemas.

La diferencia en el balance hídrico ocasiona el abatimiento del nivel del agua y una serie de problemas inherentes como: la compactación del suelo que puede causar daños a construcciones y al sistema de drenaje, el deterioro en la calidad del agua que se extrae del acuífero, y el cambio en la pendiente del sistema de drenaje en el Distrito Federal, entre otros. Por este motivo es muy importante que se tomen acciones para recargar en forma artificial el acuífero promoviendo al mismo tiempo su protección para evitar la contaminación o disminución de su capacidad hidráulica.

Dada la importancia que tiene el acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, por ser la principal fuente de abastecimiento de agua potable para la población del Distrito Federal, las obras para recargar agua de forma artificial deben ser apropiadamente diseñadas y operadas, con el adecuado control y monitoreo para evitar que se infiltren contaminantes hasta el acuífero que pudiera alterar a corto, mediano y largo plazo, tanto su calidad fisicoquímica y microbiológica, como sus propiedades hidráulicas.

El reúso del agua es de finido como una aplicación benéfica en la que un agua residual sometida de forma natural o de manera artificial a través de un proceso físico, químico y/o biológico permite obtener un agua con características óptimas para permitir su reutilización.

1.1.1. Tratamientos de aguas residuales en el Valle de México.

El constante crecimiento demográfico que se ha registrado en la Ciudad de México ha originado una serie de problemas de contaminación del ambiente; tal es el caso del problema ocasionado por la descarga de las aguas residuales, las cuales son colectadas y enviadas hasta el Valle del Mezquital Hgo, para ser destinadas a actividades agrícolas. El riego de los cultivos que ahí se producen con este tipo de aguas, han propiciado un alto rendimiento en las cosechas; sin embargo, dado que estas descargas al salir de la zona metropolitana de la Ciudad de México no reciben ningún tipo de tratamiento, han originado una serie de problemas de salud debido al alto contenido de coliformes y helmintos que transportan. Por ello, es urgente aplicar un tratamiento a dichas emisiones que no sólo permita eliminar los patógenos mencionados, sino también, que conserve el

material orgánico que ha de servir de fertilizante en los campos agrícolas. En el presente trabajo, se plantea una alternativa sustentable para tratar las aguas residuales de la Ciudad de México, que involucra varias biotecnologías que cumplen con el objetivo planteado y además, permiten que se recicle una mayor fracción de agua a la ciudad para ser destinada a actividades recreativas y económicas.

1.1.2. Sustentabilidad en el Valle de México.

El Valle de México contiene una de las conurbaciones más grandes y más contaminadas del mundo (Tabla 1). Se estima que más de 20 millones de habitantes consumen diariamente cerca de 6 millones de metros cúbicos de agua, generan 15,000 toneladas de residuos domésticos y se queman más de 8,000 toneladas de combustibles derivados del petróleo. Esto ocurre en una cuenca parcialmente cerrada a la circulación del aire y con un sistema artificial de drenaje que ha vaciado progresivamente el agua de los subsuelo y desecado parcialmente algunas cuencas lacustres vecinas. (*Monroy et al 1997*).

En un sistema cerrado, es posible mantener indefinidamente la vida de una cadena de seres vivos si la recirculación de los elementos, a través de los ciclos biológicos, cumple con los siguientes requisitos: Se mantiene el equilibrio dinámico (estado estacionario), de la población y de los nutrientes necesarios para su reproducción.

Los materiales contaminantes con efectos tóxicos, asociados a las actividades de la población de seres vivos, y los provenientes de fuentes externas, son mantenidos indefinidamente por debajo del nivel en el que se compromete la supervivencia.

Se obtiene una fuente indefinida y adecuada de energía que permite el funcionamiento de la cadena de seres vivos, por ejemplo: a través de la fotosíntesis para la producción de alimentos y de alguna otra fuente renovable que permita los intercambios de materia y energía necesarios para mantener en operación el sistema. (*Monroy et al 1997*).

Tabla 1. Consumo de agua en un centro de población de la Ciudad de México.

POBLACIÓN	20 MILLONES DE HABITANTES
ÁREA	1,499 K M ²
ALTITUD	2,240 MSNM
DRENAJE(PRINCIPAL, D> 0.6 M)	1,217 KM (76 % DE POBLACIÓN)
DRENAJE(SECUNDARIO, D < 0.6 M)	12,299 KM
RED DE AGUA POTABLE	10,700 KM

La población humana del Valle de México, según se tiene noticia histórica, rebasó, a fines del siglo XV, la capacidad de carga o de soporte para producir los alimentos necesarios para su abasto y desde entonces se ha convertido en un centro de consumo de cantidades crecientes de alimentos, agua, combustibles y toda clase de materiales. La capacidad de procesamiento local de residuos, depuración del agua, aire y el suelo no se ha incrementado en paralelo con las velocidades de generación de contaminantes, dando lugar a la acumulación progresiva de agentes tóxicos derivados de las operaciones de la industria, el transporte y el consumo doméstico.

1.2. Recarga natural a nivel nacional y del Valle de México.

Hoy en día gracias a los avances tecnológicos es técnicamente posible emplear el agua residual para obtener un agua para el consumo humano. Ello puede lograrse de dos formas; la primera consiste en tratar agua residual mediante un proceso secundario e inyectarla a un acuífero de abastecimiento, el afinamiento de la calidad del agua se logra mediante el tratamiento natural resultado del largo periodo contenido en el manto freático. La otra forma consiste en tratar el agua residual con procesos avanzados obteniendo la calidad requerida para su integración al sistema de suministro público.

La recarga de mantos acuíferos se ha convertido en la cuarta aplicación más importante de reúso de agua, surge como una alternativa tecnológica decisiva para disminuir la sobreexplotación de acuíferos, la escasez de agua y la intrusión salina, ofreciendo los siguientes beneficios:

- Restablecimiento del manto sobreexplotado.
- Provisión de una barrera a la intrusión salina.
- Almacenamiento de agua durante las épocas de alta disponibilidad.

Algo importante que considerar en el uso de agua tratada para la recarga de acuíferos es la presencia de agentes químicos y microbiológicos que pueden ser peligrosos para la salud humana y para el ambiente. Existen cuatro factores de calidad significativos en la recarga de agua subterránea con agua tratada: microorganismos patógenos, contenido mineral, metales pesados y compuestos orgánicos traza; de estos los microorganismos patógenos y los compuestos orgánicos traza son de particular interés en la recarga de acuíferos utilizados para el suministro público.

La Norma (PROY-NADF-003-AGUA-2002) esta dirigida a regular la recarga artificial del acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México dentro del distrito federal, sin embargo, es claro que la limitación de esta actividad a este acuífero en particular obedece a delimitaciones jurisdiccionales, y que todos los subsistemas que integran el acuífero se encuentran interconectados, por lo que el agua fluye entre ellos sin fronteras, siendo recomendable aplicar una estrategia Metropolitana.

El agua residual tratada para suministro o recarga artificial en el acuífero de la zona metropolitana de la Ciudad de México debe cumplir con los parámetros permisibles establecidos por el proyecto de Norma (PROY-NADF-003-AGUA-2002), **VER ANEXO 1.**

El objetivo de esta norma es proteger al acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y la salud de la población, regulando las actividades de recarga artificial por inyección directa de agua residual tratada, a través del establecimiento de:

- a) Los valores permisibles de calidad del agua utilizada para la recarga artificial del acuífero, entendidos como condiciones particulares de descarga.
- b) Un programa de actividades para el control y vigilancia de la calidad del agua utilizada antes y después de la recarga artificial del acuífero.
- c) Los procedimientos administrativos a los que se deberá estar sujetos los procesos de construcción y operación de los sistemas de recarga, para su autorización.

1.3. Métodos empleados en la recarga de acuíferos.

Para introducir agua en un acuífero los procedimientos son tan variados como múltiples y se clasifican en función de cómo se realice la recarga, esta puede ser infiltración a través de la superficie o bien, por introducción directa del agua al acuífero mediante una perforación que lo atraviese. Los medios a través de la superficie se localizan en el interior de los cauces se utilizan balsas, canales y campos de inundación.

Los métodos de introducción directa se conocen con el nombre de sistemas de recarga en profundidad, en general se emplean en suelos formados por una alternancia de capas permeables e impermeables; los dispositivos empleados en este tipo de recargas consisten en sondeos o pozos profundos a través de los que se inyecta agua en el acuífero. También se utilizan sistemas conformados por pozos someros que capten el agua de alguna fuente y la introduzcan al subsuelo. En suelos calcáreos se puede aprovechar las formaciones como enzimias dolinas para infiltrar el agua directamente.

La selección de alternativas dentro de esta gran variedad de procesos existentes es efectuada en atención a consideraciones de orden técnico-científico y económico. Algunos países desarrollados han decidido recargar artificialmente los acuíferos con agua residual tratada mediante infiltración o inyección. En países en desarrollo existen casos en que los acuíferos se han recargado pasivamente por uso de fosas, agua residual cruda aplicada a la irrigación y otros medios (Recarga incidental).

Por ejemplo, como es sabida no toda el agua de lluvia es captada por los ríos. Los bosques juegan un papel determinante en la captación del agua de lluvia. La presencia de los bosques da una mayor oportunidad para que el agua pueda infiltrarse al subsuelo, además, el agua de niebla es interceptada por los árboles, lo que permite su condensación y conducción al suelo. Los espacios porosos y la consistencia del suelo son modificados por el crecimiento de las raíces, lo que facilita la infiltración, bajo estas condiciones la infiltración se lleva a cabo sin importar que las pendientes topográficas sean demasiado pronunciadas o no. La captación de agua de lluvia en los bosques permite la recarga de los acuíferos.

Por otro lado, la recarga artificial es un proceso que puede contribuir a disminuir la diferencia en el balance hidráulico, a través de la inyección directa de agua residual tratada en los mantos freáticos del Distrito federal. El agua residual tratada, considerada como fuente potencial para la recarga de acuífero, deberá someterse a los tratamientos que sean necesarios para evitar que se rebasen los límites físicoquímicos y microbiológicos establecidos en dicha norma. (*Gaceta Oficial del Distrito Federal*).

1.4. Caso de estudio de una planta para la recarga de acuífero: The Torreele Facility.

En el 2002 la Compañía de Agua Intermunicipal de la región de Veurne (IWVA, por sus siglas en inglés), comenzó a reutilizar el efluente secundario para la recarga de agua subterránea en la región de St-André, Bélgica. La Planta Torreele donde se producen el agua para la recarga, fue construida donde se encuentra la planta de tratamiento de aguas residuales Culpen, que es manejada por Aquafin. El tratamiento en Torreele, combina la ultrafiltración (Uf), con un sistema de membranas sumergido y, osmosis inversa (RO, reverse osmosis), usando membranas para agua soluble de bajo consumo de energía (*Houtte y Verbauwheide, 2008*).

La ultrafiltración (Uf), demostró que es una técnica viable para el tratamiento del efluente secundario y también es una buena etapa de pre-tratamiento previo a la osmosis inversa (RO). El sistema de ultrafiltración está provisto de tanques resistentes, utiliza aire y combina el retrolavado con líquido filtrado y aplican hipoclorito para la limpieza de las

membranas; el mantenimiento se realiza una vez al mes. La integración del efluente en el proceso de producción de agua potable, posibilita a la compañía IWVA mitigar el agotamiento de los niveles de agua subterránea y proteger a los acuíferos de la intrusión salina del agua de mar, dando como resultado un manejo sustentable del agua subterránea. En el 2006 se produjeron 2,199,326 m³ de agua para la recarga; esto corresponde a 40.6 % de la demanda total de agua potable de la IWVA.

En la figura 1.4 se muestra el diagrama con las etapas que conforman el tren de tratamiento de la planta. El efluente es enviado a dos módulos con cámaras de rejillas donde este se filtra para eliminar todos los objetos grandes que provienen del sistema de alcantarillado. A la salida se aplica cloro (Cl₂) como desinfectante, antes de ser enviado al tanque de almacenamiento, posteriormente se envía a 5 módulos de ultrafiltración, el filtrado es bombeado a otro tanque de almacenamiento, en su paso se le es agregado cloruro de amonio (NH₄ Cl₂) para eliminar el cloro del agua, en este mismo tanque se le agrega bisulfato de sodio (Na₂ HSO₄) para controlar el pH y es bombeado a un filtro, después a dos módulos de ósmosis inversa (RO) para remover el cloruro de sodio (NaCl) del agua, y vuelve a ser enviado a otro tanque de almacenamiento, se aplica hidróxido de sodio (NaOH) y finalmente es sometido a un tratamiento con rayos ultravioleta (UV) para la remoción de bacterias.

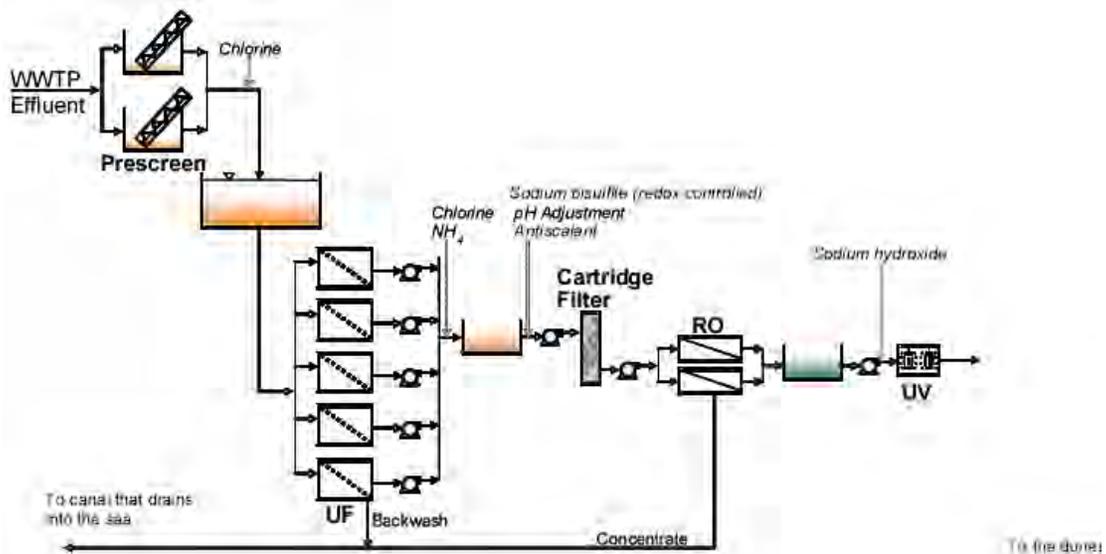


Figura 1.4. Diagrama de flujo de la planta tratadora para la recarga de aguas subterráneas de Torrelee en Bélgica.

La operación diaria de la planta está controlada por el monitoreo de parámetros sencillos como la presión, temperatura, conductividad de la misma, lo cual permite evaluar condiciones normales de desempeño de la membrana y situaciones críticas o de alarma en el sistema con base a los valores de los parámetros medidos.

1.5. Aplicación de tecnologías avanzadas en el tratamiento de agua.

En la práctica, la aplicación de los métodos de tratamiento debe tener en cuenta fundamentalmente la naturaleza y las propiedades fisicoquímicas de las aguas o efluentes a tratar (*Water Treatment Handbook, Degremont, 1991*).

Las aguas contaminadas por la actividad humana pueden, en general, ser procesadas eficientemente por plantas de tratamiento biológico, por adsorción con carbón activado u otros adsorbentes, o por tratamientos químicos convencionales (oxidación térmica, cloración, ozonización, permanganato de potasio, etc.). Sin embargo, en algunos casos estos procedimientos resultan inadecuados para alcanzar el grado de pureza requerido por ley o por el uso ulterior del efluente tratado. En estos casos y cada vez más crecientemente, se está recurriendo en los países industrializados al uso de las llamadas Tecnologías o Procesos Avanzados de Oxidación (TAOs, PAOs), muy poco aplicados y, peor aún, menos difundidos en los países de economías emergentes como los de América Latina. La mayoría de las TAOs puede aplicarse a la remediación y destoxificación de aguas especiales, generalmente en pequeña o mediana escala. Los métodos pueden usarse solos o combinados entre ellos o con métodos convencionales, logrando ser aplicados también a contaminantes de aire y suelos. Permiten incluso la desinfección por inactivación de bacterias y virus.

Las TAOs se basan en procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes. El concepto fue inicialmente establecido por quienes definieron los PAOs como procesos que involucran la generación y uso de especies transitorias poderosas, principalmente el radical hidroxilo ($\text{HO}\cdot$). Este radical puede ser generado por medios fotoquímicos (incluida la luz solar) o por otras formas de

Energía, y posee alta efectividad para la oxidación de materia orgánica. Algunas TAOs, como la fotocatalisis heterogénea, la radiólisis y otras técnicas avanzadas, recurren además a reductores químicos que permiten realizar transformaciones en contaminantes tóxicos poco susceptibles a la oxidación, como iones metálicos o compuestos halogenados. (*O. Legrini et al 1994 y J.R. Bolton et al 1994*).

1.6. Ultrafiltración-Ozono.

El ozono es un poderoso oxidante que ataca la estructura de la materia orgánica natural, reduciendo el alto peso molecular de componentes como: ácidos carboxílicos, carbohidratos, aminoácidos, etc. presentes en la materia orgánica, transformándolos en compuestos de bajo peso molecular.

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

Park 2002, realizó investigaciones con el propósito de utilizar ozono para reducir el ensuciamiento de membranas en los procesos de ultrafiltración, prolongando el tiempo de vida de la membrana y aumentando la calidad del agua tratada por estos métodos. En sus estudios utilizó un módulo con membranas de fibra hueca de polisulfonato con un diámetro de poro de $0.1 \mu\text{m}$ y un área superficial de 0.5m^2 . El agua en primer lugar fue tratada mediante el proceso Fenton ($\text{H}_2\text{O}_2 + \text{Fe}^{2+} \rightarrow \cdot\text{OH}$) como pre-tratamiento con el propósito de remover sólidos suspendidos, los parámetros medidos de la calidad del agua a tratar fueron los siguientes:

Tabla 2. Parámetros medidos por Park 2002 en la utilización de ozono para reducir el ensuciamiento de una membrana de ultrafiltración.

PARÁMETROS	RANGO DE LOS VALORES MEDIDOS
pH	5.1-9.2
Carbón Orgánico Total(COT en ppm)	200-560
Turbiedad (UTN)	50-210
Color (Unidades Cobalto)	90-121

El experimento fue llevado a cabo a nivel planta piloto, adoptando un proceso “batch” para facilitar la identificación de las condiciones de operación óptimas de los procesos aplicados. De acuerdo a sus resultados, con respecto al color y aplicando Fenton como única etapa de tratamiento, obtuvieron un 60% de remoción.

Aplicando ozono después del pre-tratamiento se obtuvo un remoción del 93% sin necesidad del proceso de membranas.

Se encontró por otra parte que a mayor concentración de ozono en la entrada, la presión transmembrana disminuye, por ejemplo, con una concentración de 10.6 mg/L la presión alcanza un valor de 3.5 kg_f/cm² y para una concentración de 45.6 mg/L se obtuvo una presión máxima de 2.73 kg_f/cm², en un tiempo de evolución de 100 min. El flux incrementa un 12% al incrementar la concentración de entrada del ozono de 10.6 – 45.6 mg/L. La remoción de carbono orgánico total (COT) fue de un 98 % aplicando los tres procesos de tratamiento, Fenton, ozono y ultrafiltración.

Lubello et al. (2003) presentaron resultados sobre el uso de la ultrafiltración como tratamiento terciario de un efluente secundario para posible reúso industrial. El experimento se llevó a cabo a escala planta piloto. Se utilizó un módulo de ultrafiltración UF ZeeWeed compuesto por una serie de membranas de fibra hueca (modelo, ZW-10, Zenon Environmental), tratando un efluente secundario con las siguientes características:

Tabla 3. Resultados reportados por Lubello (2003), en el uso de la ultrafiltración como tratamiento terciario.

VARIABLE	VALOR
Demanda Química de Oxígeno (DQO) mg/L	41.4
Turbiedad (UTN)	7.35
Sólidos Suspendedos Totales (SST mg/L)	23.2

Este tratamiento de ultrafiltración proporciona notables resultados para remover turbidez y sólidos totales suspendidos, alcanzando en el permeado porcentajes de remoción de 98.7% y 94.5% respectivamente así como una reducción en DQO del 35%.

Tabla 4. Resultados en el tratamiento de ultrafiltración Lubello (2003).

	PERMEADO	CONCENTRADO
Variable	Valor	Valor
DQO (mg/L)	27.4	77.6
Turbidez (UTN)	0.40	29.9
Sólidos Suspendedos Totales (mg/L)	0.32	45.5

Minhalma et al. (2005) investigaron el efecto del ozono como etapa de pre-tratamiento para reducir materia coloidal félica presentes en aguas residuales provenientes de la producción de corchos para botellas, con el fin de entender y minimizar el fenómeno de ensuciamiento o “fouling” de las membranas en procesos de ultrafiltración. En un primer paso el agua se trató con ozono durante 15 min. Con un flujo de 25 l/h en forma semicontinua, en un reactor cilíndrico de vidrio con capacidad 1.2 L, con una temperatura constante de 20±0.5 °C y 1 atm de presión, a continuación se presenta la caracterización del efluente y del efluente después de la ozonación.

Tabla 5. Efecto del ozono como etapa de pre-tratamiento. Minhalma (2005).

PARÁMETROS	EFLUENTE	EFLUENTE TRATADO CON O₃
Carbón Orgánico Total(mg C/L)	3103	2749
Polifenoles Totales (mg/L)	0.358	0.174
Potencial Z (mV)	-13.0	-10.6
pH	4.8	3.7

El pre-tratamiento con ozono dio como resultado una reducción del 11 % del COT y del 51% en el contenido total de polifenoles. En relación con la ultrafiltración se examinaron 5 membranas con sucrote de peso molecular de 4 a 98 kilodaltons (kDa). El comportamiento observado en general fue un aumento en el flux de un 67% al aplicar ozono en el efluente, por consecuencia la presión medida al obtener el máximo valor del flux fue de 3 bar, menor a la presión reportada con el efluente sin tratar de 4.3 bar.

Wang et al. (2006) por su parte realizaron un estudio donde trataron un efluente secundario utilizando ozono y ultrafiltración. El efecto de la pre-ozonización fue evaluado analizando el comportamiento de la membrana de ultrafiltración con respecto al ensuciamiento y a parámetros como el flux. Los resultados mostraron un aumento en la biodegradabilidad del efluente debido al pre-tratamiento con ozono. La distribución del peso molecular aparente de sustancias orgánicas, que contribuyen en la formación de resistencias en la membrana (obstrucción y la formación de capas o tortas de contaminantes) y que son responsables del llamado Fouling ó ensuciamiento de estas, fueron transformadas a sustancias de menor peso molecular con un tiempo de contacto de 1 min. de ozonación.

En relación al carbono orgánico total (COT) el efluente presentaba una concentración de 9.44 mg/L, aplicando un tiempo de contacto de 5 min., se llegó a una concentración de 4.7 mg/L. La concentración de gas a la entrada fue de 20 mg/L, cabe destacar que el tiempo de contacto fue de 20 m in. aunque de spués de los 5 m in. la remoción fue cambiando muy poco. La absorbancia UV_{254} se utilizó para evaluar sustancias orgánicas insaturadas en el agua el efluente presentaba una UV_{254} de 0.106-0.163 cm^{-1} , el comportamiento fue similar

al COT, con un tiempo de contacto de 5 min. el porcentaje de remoción fue de 64%. El efecto de la pre-ozonización sobre el flujo no se observa un comportamiento lineal con respecto al tiempo de contacto, el máximo valor alcanzado fue de 2.34 L/m²min en el primer minuto de ozonación, siendo este el valor óptimo.

CAPITULO 2. MARCO TEORICO

2.1. Principios de operación de los procesos de membrana.

Se puede definir una membrana como un material que deja pasar con más facilidad unos tipos de sustancias que otros. Esta propiedad de separar componentes del agua es lo que se utiliza en el tratamiento del agua. En general, la membrana retiene contaminantes y permite el paso del agua.

Las membranas deben tener resistencia mecánica y deben ser capaces de mantener una alta producción del permeado requerido con el grado de selectividad deseado. Estas dos últimas condiciones son opuestas. La permeabilidad aumenta con un incremento de la densidad de poros, lo que implica que es deseable una alta densidad de poros. Por otro lado, la resistencia global de la membrana es directamente proporcional a su espesor.

Las membranas se pueden clasificar de la siguiente manera Tabla 6.

Tabla 6. Clasificación de las membranas para el tratamiento de agua.

TIPO DE MEMBRANAS	
Densas	Porosas
Procesos de separación por membranas	
Osmosis inversa (RO): La separación se logra en función de las diferencias de la solubilidad y velocidad de difusión del agua (solvente) y de las sustancias disueltas (solutos).	Ultrafiltración (UF): Separación de moléculas de tamaño grande disueltas y de partículas coloidales suspendidas en base a su tamaño.
Electrodiálisis (ED): La separación se alcanza en base en los diferentes tamaños iónicos y carga de los iones del soluto, usando membranas de intercambio iónico.	Microfiltración (MF): Separación de sólidos suspendidos en función de su tamaño.
Nanofiltración (NF): La separación se alcanza por una combinación de rechazo de carga, solubilidad difusión y tamizado.	
Materiales de las membranas	
Limitados a polímeros	Polímeros y materiales orgánicos

Fuente. Membrane bioreactors for wastewater treatment. IWA Publishing. London 2000.

2.2. Principios del funcionamiento de los procesos de membrana.

En el año de 1959, en Sudáfrica se construyó la primera “*Gran planta*” de desalación por procesos de membrana. Este importante logro, impulsó la investigación y el desarrollo de membranas sintéticas asimétricas y de las tecnologías de separación por membrana. Las membranas son delgadas películas de compuestos orgánicos, o inorgánicos, capaces de separar los componentes de un fluido, en función de sus propiedades físico-químicas, cuando se aplica una fuerza a través de la misma (*Botha, 1992*).

Los sistemas de separación por membrana se han aplicado en la industria a fin de separar, concentrar o purificar componentes de proceso. En el campo de la ingeniería ambiental se ha aplicado al manejo y disposición de residuos peligrosos (*Mendez, 1988*).

Los sistemas de separación por membrana aplicados en la industria separan, concentran o purifican componentes de proceso empleado en el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios; en el tratamiento de aguas residuales municipales e industriales para su reutilización (*Skelton y Skerratt, 1999; Bourgeois et al, 2001; Ernst et al., 2002*), y de manera importante, en la potabilización del agua de fuentes de abastecimiento contaminadas, como es el caso de la parte oriente del acuífero que abastece a la “Zona Metropolitana del Valle de México”.

De acuerdo con *Cross, 1992*, el empleo de membranas para tratamiento de agua crece a una tasa del 15% al año, mientras que los sistemas de desalación para suministros municipales de agua potable con base en desalación han crecido del 68 al 56%. El cambio en la preferencia de uso de los procesos de separación por membrana, supone que esta será una de las alternativas tecnológicas en la cual se habrá de abatir la escasez de agua en el mundo (*Aptel y Buckley, 1998*), señalan que la capacidad instalada y en operación de desalación mundial por procesos de membranas de aproximadamente 6.25 millones de metros cúbicos por día, cantidad suficiente para abastecer las necesidades de agua de la “Zona Metropolitana del Valle de México”.

2.3. Consumo de energía en las tecnologías de separación por membrana.

En la gráfica que muestra la figura 2.3, se puede apreciar la tendencia que los consumos de energía han presentado durante los últimos 40 años de desarrollo de las tecnologías de separación por membrana. De acuerdo con la proyección de esta tendencia, en el transcurso de la presente década se alcanzará el máximo desarrollo energético de estos sistemas. Actualmente, la eficiencia del proceso se sitúa a solo 2.25 kW/h de la frontera termodinámica.

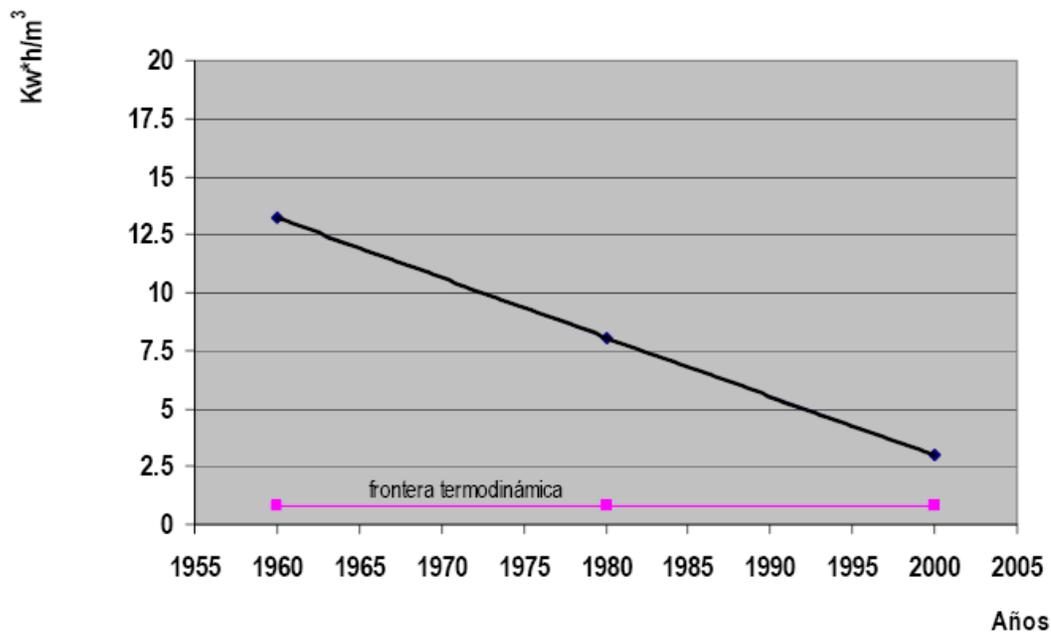


Figura 2.3. Tendencia del consumo de energía de las Tecnologías de Membrana.

El interés de gobiernos e instituciones en la investigación y desarrollo de esta tecnología, en lugar de la congelación o la destilación para desalinizar agua, se basa en el reconocimiento de su bajo requerimiento de energía. Mientras que para permear, un metro cúbico de agua de mar se requiere de un gasto de energía 0.76 kW/h, la congelación consume 92 y la destilación 667 kW/h, desde el punto de vista energético.

No obstante el alto grado de desarrollo que han alcanzado estas tecnologías, persisten una serie de problemas asociados con su adecuada selección, operación y mantenimiento. (Martínez, et al 2004).

2.4. Intervalos de aplicación de los procesos de membranas según su tamaño de poro.

Los procesos de membrana que se aplican con mayor frecuencia al tratamiento de agua potable y de las aguas residuales son la Ósmosis Inversa, a la que es común que se le designa como (RO) por sus siglas de idioma inglés, la electrodiálisis (ED), la

Ultrafiltración (UF), la Nanofiltración (NF) y la Microfiltración (MF). Los intervalos de tamaño aplicables medidos en micras y los principales medios de separación por procesos de membrana se muestran en la figura 2.4.

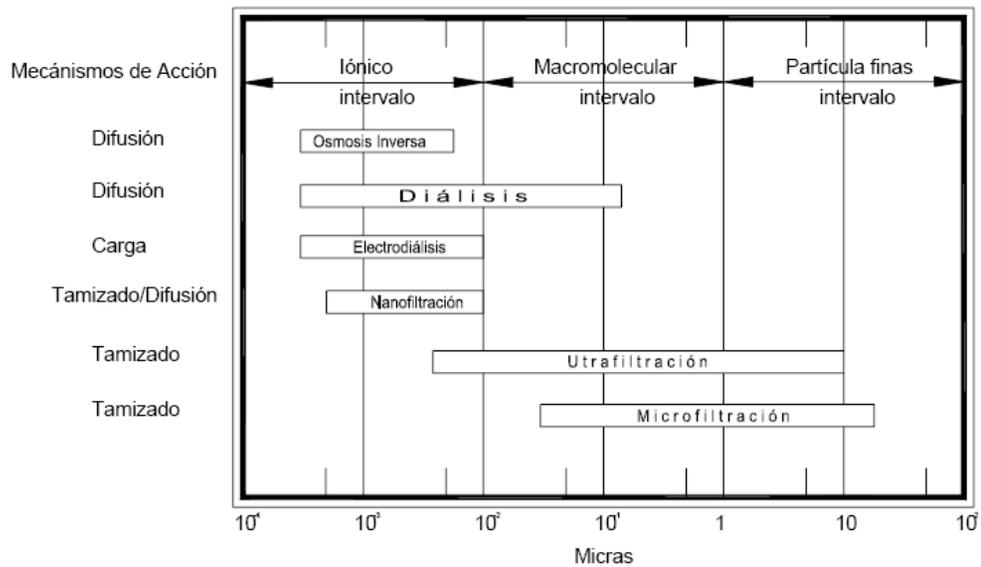


Figura 2.4. Intervalos de aplicación de los Procesos de Membrana

Los intervalos de tamaño aplicables señalados en la figura 2.4, están asociados al tamaño de poro de las membranas, los cuales se encuentran en los intervalos definidos en la tabla 7.

Tabla 7. Características de los sistemas de membrana

	MICROFILTRACION (MF)	ULTRAFILTRACION (UF)	NANOFILTRACION (NF)	OSMOSIS INVERSA (OI)
Presión(KPa)	100 – 400	200 – 700	1000 – 4000	1500 – 10000
Tamaño de Poro (μ)	0.15 – 25	0.004 – 10	0.0006 – 0.01	0.0004 – 0.007

Fuente: Con base en Skelton R. & Skerratt G. 1999 y Taylor J.S., 1989

De acuerdo con (*Schäfer et al. 1998*), establecieron un criterio de selección basado en el conocimiento de las características de tamaño de poro de las membranas y de su aplicación en la separación de iones, estipulando que:

- a) La Osmosis inversa separa todo tipo de iones
- b) La Nanofiltración se aplica a la separación de iones multivalentes.
- c) La Micro y Ultrafiltración permite el paso de iones por la apertura de poro.

En teoría, todas las moléculas mayores al peso molecular de corte definido por el tamaño de poro de la membrana deberían ser rechazadas, sin embargo, existen muchos factores que alteran el resultado (*Zander y Curry, 2001*), señalan que el pH y la fuerza iónica de la solución afecta el tamaño, su forma y la flexibilidad de un soluto.

Por su parte (*Lhassani et al. 2001*), establecieron que las propiedades de disolución en agua son más importantes que las características de tamaño, forma y peso de los compuestos.

Schafer, et al., 2001, comentan que la adición de reactivos coagulantes previo a la ultrafiltración permite el rechazo de partículas con peso molecular de corte inferior al definido por la membrana. Esto se refuerza con el trabajo de *Guo et al, 2001*, quienes establecen que, aplicando ultrafiltración en aguas naturales, se retienen iones mayoritarios como SO_4^{2-} (36%), Ca^{2+} (14%) y Mg^{2+} (13%), los cuales tienen peso molecular de corte mucho menor que el indicado por capacidad de retención de las membranas y que la retención disminuye al incrementar la salinidad (o fuerza iónica) y, también, con el decremento de la concentración de carbono orgánico disuelto.

Los autores asumen que este efecto se debió principalmente a la repulsión electrostática de la membrana cargada negativamente contra los aniones (SO_4^{2-}) con una retención de cationes (Ca^{2+} y Mg^{2+}) requeridos para mantener el balance de cargas.

2.5. Límites de operación de una membrana.

El análisis de la secuencia de transición de la acumulación de partículas hasta su adsorción irreversible en la superficie de la membrana, ha permitido establecer algunas de las estrategias de desarrollo y de condiciones de operación que mejoran el rendimiento de los sistemas de membrana (*Sablani et al., 2001*).

Se han desarrollado diversas teorías que explican las causas y la dinámica de la ensuciamiento de las membranas, entre las más aceptadas se encuentran la de la Concentración de Polarización.

Se entiende por concentración de polarización a la acumulación de macromoléculas en la proximidad de la superficie de la membrana que produce la gradual reducción del flujo de permeado y una diferencia de potencial (*Del Castillo, 1986; Nikolova, 1998*).

La formación de pasta, o gel de polarización, es un caso extremo de la concentración de polarización, donde una gran cantidad de macromoléculas son acumuladas en la superficie de la membrana debido a la exclusión por tamaño de los poros, y, fundamentalmente, a que la constante de difusión de este tipo de partículas es dos o tres órdenes de magnitud menor a la de las sales y moléculas pequeñas de materia orgánica (*Weber, 1972; Crozes et al., 1997*).

A la concentración de polarización se le considera como fenómeno reversible, que puede ser controlado en un módulo de membranas por medio de ajustes de velocidad del fluido, radiaciones ultrasónicas o generación de campos eléctricos (*Sablani et al., 2001*). En contraste, el ensuciamiento de la membrana (*fouling*) es el resultado de un grupo de efectos físicos, químicos y biológicos que afecta de manera irreversible la capacidad de permeado de la membrana.

Los estudios realizados por (*Chen et al., 1997*), sobre la transición dinámica de la concentración de polarización han permitido establecer el concepto de la existencia de un *flujo crítico* ($120 \text{ L/m}^2 \text{ h}$ para membranas de celulosa de $0.2 \text{ } \mu\text{m}$ de poro), el cual, al ser excedido consolida los coloides retenidos en la zona de concentración. Estos estudios han demostrado que los sistemas que operan con flujos por debajo del flujo crítico pueden

recuperar rápidamente su capacidad de permeado al modificar la velocidad o la dirección del fluido.

Al mismo tiempo, *Crozes et al, 1997*, evaluaron el efecto de la presión de operación sobre la transición de la concentración de polarización al estado irreversible. De manera análoga a *Chen et al, 1997*. Establecieron un valor de presión de operación límite en ultrafiltración, *presión crítica* (100 kPa), el cual, al ser excedido, produce el ensuciamiento irreversible de la membrana.

2.6 Membranas de ultrafiltración.

Las membranas semipermeables ya se utilizaron en el siglo XIX en el riñón artificial, por lo tanto lo justo no es hablar de una nueva tecnología, sino más bien de nuevas aplicaciones y desarrollo de nuevos materiales dentro de la tecnología de membranas.

Una membrana es una lámina que permite el paso selectivo de sustancias a su través. El flujo de estas sustancias puede ser determinada por diferentes "fuerzas impulsoras", principalmente: la presión, concentración y potencial eléctrico. La selectividad permitirá enriquecer o empobrecer una corriente o carga en una o varias sustancias.

El alimento se introduce en un módulo donde existe una membrana. De este módulo emergen dos corrientes: el rechazo, que contendrá las sustancias que no han logrado pasar a través de la membrana y el permeado que contendrá las sustancias que sí pueden pasar a través de la membrana. La selectividad de una membrana frente a una sustancia puede venir dada por dos factores distintos dependiendo de cómo describamos la membrana:

- **Tamaño:** La membrana consta de poros, las sustancias más grandes que el tamaño de estos poros no podrán pasar a través.

- A finidad química: Si una sustancia se incorpora fácilmente a la membrana podrá atravesarla, en caso contrario no.

El flujo de una sustancia a través de una membrana se lleva a cabo porque existe una "fuerza impulsora", es decir, algo que mantiene al sistema apartado del equilibrio. El flujo intenta compensar este desequilibrio y en último término es misión del diseñador mantener este desequilibrio para mantener el flujo.

En la figura 2.6.1 se muestra una clasificación general de los procesos arriba descritos, promovidos por la presión y por el efecto conjunto presión/concentración, según las propiedades de las membranas utilizadas, e specialmente de tamaño de poro (**Cross J. 1992**).

Además de estos procesos, se emplean otros que están promovidos por fuerzas impulsoras distintas de la presión:

La electrodiálisis se usa para separaciones de un medio líquido. Para ello se aplica un potencial eléctrico que arrastrará los iones desde el permeado al concentrado. Las membranas utilizadas son resinas de intercambio iónico, y la fuerza impulsora es un campo eléctrico.

La diálisis viene a ser una operación contraria a la de la osmosis inversa, en que se eliminan los solutos del rechazado poniendo en contacto éste con un permeado menos concentrado, siendo precisamente el gradiente de concentración el promotor del proceso.

La pervaporación aprovecha la compatibilidad química de un líquido con la membrana de modo que éste se disuelva en ella. Manteniendo una presión baja en el permeado, el soluto se vaporizará en la membrana y pasará al permeado.

El transporte activo es un mecanismo complejo, de hecho es como funcionan las membranas celulares. Utiliza enzimas capaces de captar un soluto en el lado más concentrado de la membrana y estas enzimas liberan la sustancia en el lado menos

concentrado. A nivel ingenieril esto se consigue empleando sustancias formadoras de complejos, en vez de enzimas (Crozes *et al.*, 1997).



Figura 2.6.1. Propiedades de membranas con rangos de separación

2.7 Ensuciamiento de las membranas.

El ensuciamiento o “fouling”, es el principal inconveniente de los procesos de membrana. Consiste en la deposición sobre o dentro de la membrana de diferentes elementos presentes en el agua. Pese a que el mecanismo de este proceso todavía no está del todo claro se considera una consecuencia de la interacción fisicoquímica de estos elementos con la membrana. En el caso de la depuración biológica, los elementos que suelen producir el

fouling son proteínas, materias coloidales o las sustancias poliméricas extracelulares (EPS) que son metabolitos excretados por la biomasa depuradora.

2.8 Aplicaciones industriales.

Módulos de membrana en las instalaciones. Un módulo de membrana es la unidad de operación en la que se disponen las membranas. Los factores más a tener en cuenta a la hora de escoger un módulo son la facilidad de montaje y el ensamblado, elevada capacidad de tratar el máximo de permeado posible con la mínima superficie - y permitir la modulación. En el mercado existen cuatro tipos principales:

a) De placa y bastidor. Se basan en un seguido de membranas situadas sobre unas placas de soporte dispuestas una a lado de otra en unidades individuales. Son fácilmente desmontables, pero disponen de una baja densidad de compactado (100 - 400 m²/m³).

b) De enrollamiento en espiral. Se basan en un envoltorio de dos membranas enrolladas en cilindros separados entre sí por el colector de permeado. Varios de estos cilindros se disponen de esta manera separados por un espaciador. Son módulos muy compactos (700 - 1000 m²/m³), pero el espaciador provoca que sea más susceptible a la obstrucción.

c) Tubulares. Son cilindros en cuyo interior se disponen las membranas también en forma cilíndrica. Son muy poco compactos pero muy robustos, y pueden procesar corrientes de gran velocidad.

d) De fibra hueca. Están formados por fibras que se reúnen conjuntos de miles y hasta millones dentro de unos cilindros de resina endurecida. Es el módulo más compacto (1000 - 10000 m²/m³), pero la presencia de tal cantidad de fibras hace que sean más propensas al ensuciamiento.

CAPITULO 3. METODOLOGIA

3.1. Efluente biológico secundario.

El efluente biológico secundario fue obtenido de la planta de tratamiento de aguas residuales Cerro de la Estrella, ubicada en la colonia del mismo nombre en la delegación Iztapalapa D.F. El tratamiento que recibe el agua residual que ingresa a la planta incluye: en primer lugar decantación por gravedad con sistema de recolección de sólidos, aeración y tratamiento biológico, sedimentación y un tratamiento terciario mediante filtración (filtros de grava, arena y antracita); para finalizar con la desinfección con cloro. Para este estudio se selecciono como punto de muestreo los tanques de sedimentación secundaria, tomando volúmenes de 60 L del efluente para las pruebas experimentales. En la figura 5.1 se muestra una vista aérea la ubicación de la planta de tratamiento Cerro de la Estrella y en la 5.2 una muestra del efluente secundario el cual fue utilizado para las pruebas experimentales.



Figura 3.1 .Localización aérea de la Planta “Cerro de la Estrella”.



Figura 3.2. Muestra del efluente biológico secundario

3.2. Análisis de parámetros fisicoquímicos.

Como control de las pruebas experimentales el día de nuestro se determinaron los parámetros fisicoquímicos pH, turbidez, demanda química de oxígeno (DQO), sólidos disueltos totales (SDT), color, conductividad eléctrica, para determinar las características fisicoquímicas del efluente secundario.

Los análisis fueron hechos de acuerdo a la metodología reportada por “Standard Methods for Water and Wastewater Examination (APHA, 1998).

pH, conductividad eléctrica, SDT, DQO, pertenecen a la 20^a edición del Stándar Methods, 1998.

Color y turbiedad corresponden a 14^a edición 1975.

Tabla 8. Parámetros medidos durante la caracterización del efluente secundario. (APHA, 1998).

PARÁMETRO	NO. TÉCNICA (APHA, 1998).
pH	4500 H Electrometría
Conductividad eléctrica (\square mhos/cm ²)	2510 B electrometría
SDT (mg/L)	2540 C Gravimetría
Turbidez (UNT)	214 A, Método nefelométrico
Color verdadero (U Pt-Co)	204 B, Método espectrofotométrico
DQO (mg/L)	5220 B

a) pH.

Este parámetro fue medido en forma directa por el método del electrodo, utilizando un potenciómetro marca ORION/MODELO 420A.

b) Turbidez.

La turbiedad fue medida directamente con un turbidímetro marca HACH, modelo 2100P. Es un parámetro que indica la falta de transparencia en el agua debido a la presencia de partículas suspendidas, cuantos más sólidos se encuentren en suspensión más sucia y más alta es la turbidez del agua.

c) Color.

Fue determinado por el método espectrofotométrico a 455 nm utilizando un espectrofotómetro HACH modelo DR/2000, con celdas de vidrio de 2 cm. de recorrido de luz. Para la determinación de este parámetro se selecciona el método de prueba (120) y ajusta la longitud de onda indicada; para una mejor lectura es conveniente calentar la lámpara durante una hora. Como blanco de referencia se utiliza agua destilada y los resultados se reportan en unidades platino cobalto (U Pt- Co).

d) Conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales (SDT).

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, de su movilidad, valencia y concentraciones relativas, así como de la temperatura de medición. Este parámetro al igual que el contenido de sólidos disueltos totales (SDT) se determinaron de forma directa, con un conductímetro marca HACH Company modelo 44600.

e) Demanda Química de Oxígeno (DQO).

Este parámetro es una medida indirecta del contenido de materia orgánica e inorgánica presentes en una muestra de agua, En este trabajo se utilizó como indicador del contenido de materia orgánica (coloidal y soluble), presente en agua residual tratada antes y después

de la filtración. El análisis se realizó de acuerdo al método 410.1-3 de la USEPA y al método 5220B del “Standard Methods” para aguas residuales.

El procedimiento consiste en colocar 2 ml de muestra en tubos que contienen la solución de dicromato y ácido sulfúrico. Posteriormente la muestra es sometida a un periodo de digestión de 2 horas a 150 °C en un reactor (placa de calentamiento), marca HACH modelo 45600. Al término del tiempo de digestión los tubos tienen que estar a temperatura ambiente para su posterior lectura en el espectrofotómetro marca HACH modelo DR/2000.

3.3. Pre-tratamiento del efluente biológico con ozono.

Para evaluar el efecto que tiene el ozono en el desempeño de la membrana de ultrafiltración el agua residual tratada fue sometida primero a un pre-tratamiento con ozono. La unidad de oxidación utilizada en este estudio está compuesta por el gas de alimentación, el generador de ozono, la unidad de contacto gas-líquido, un analizador de ozono en fase gas, un analizador de ozono en fase acuosa y la unidad de destrucción de ozono (Figura 3.3).

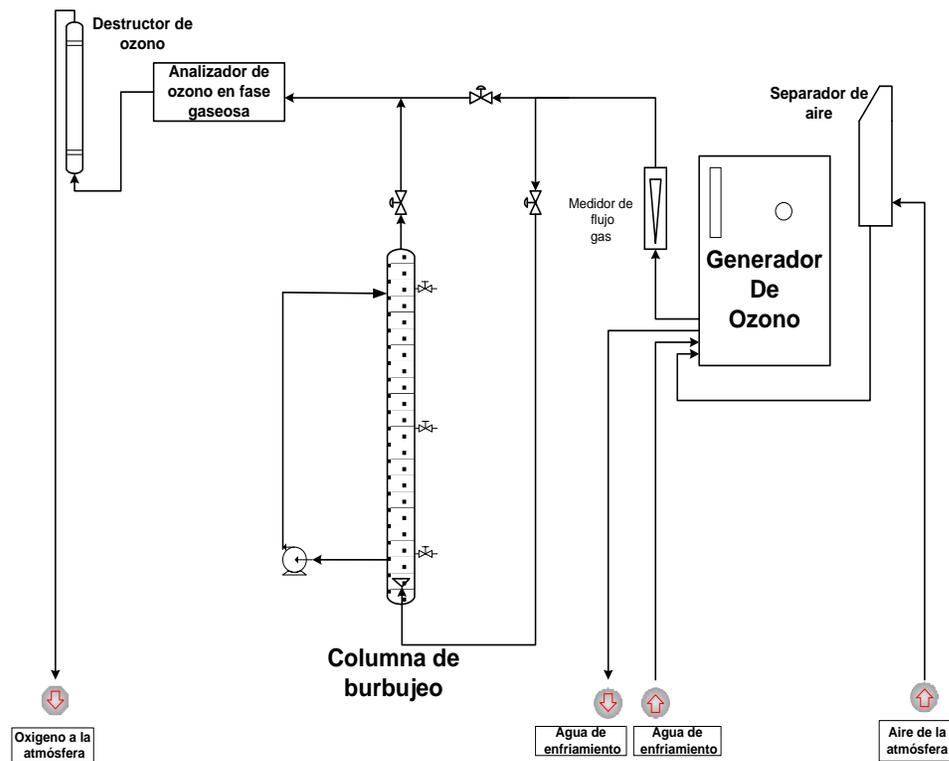


Figura 3.3. Arreglo experimental de la unidad de oxidación con ozono continuo.

El sistema utiliza como gas de alimentación aire enriquecido con oxígeno ($90\% \pm 5\%$) el cual se obtiene a partir de un separador de aire (Airsep modelo AS-12, Corporation USA). El ozono se produce haciendo pasar el gas de alimentación a través de un generador Lab 76 (Emery Trailigaz, USA) con capacidad de producción de 19 g de O_3/h . La unidad de contacto gas-líquido es una columna de burbujeo de 2 L de capacidad. El ozono es inyectado en el fondo de las unidades de contacto por medio de difusores de vidrio de placa porosa ($10-15\ \mu m$ de tamaño de poro). El ozono que proviene del reactor sin reaccionar es enviado a un analizador de ozono en fase gas (Ozone Analyzer BMT961TC) y finalmente es una unidad de destrucción catalítica para liberación segura del gas al ambiente.

Las condiciones de pre-tratamiento fueron establecidas a partir de resultados obtenidos en el trabajo “Oxidación con ozono de un efluente biológico para la recarga artificial de acuífero” (Ramírez 2008).

Con base en pruebas de absorción, demanda de ozono y oxidación de efluente secundario realizadas en dicho trabajo, se decidió utilizar en esta tesis una concentración de ozono en el gas de entrada al reactor de 2.3 mg/L y 4.6 mg/L respectivamente, un flujo de gas de ozono de 0.3 L/min. Durante 10 minutos de ozonación continua, con la finalidad de aplicar dosis de 3.8 y 7.6 mg/L de agua. Se utilizó un volumen de trabajo de 1.8 L, las pruebas se realizaron a temperatura ambiente ($20-21 \pm 2\ ^\circ C$).

3.4. Filtración del efluente biológico en membrana de ultrafiltración de fibra hueca.

Las pruebas experimentales de filtración del efluente biológico fueron desarrolladas en el módulo comercial ZW-1 (ZeeWeed-1 Bench Test Unit) el cual fue donado por la empresa transnacional ZENON Membrane Solutions (General Electric – ZENON Part of GE’s Water & Process Technologies Business) a través de un acuerdo de colaboración con el Grupo de Trabajo “*Tratamiento fisicoquímico de aguas y residuos sólidos*” de la Coordinación de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

3.5. Modulo de ultrafiltración ZW-1(Zenon®)

ZW-1 es una unidad a escala de laboratorio de ultrafiltración que actualmente se encuentran operando a escala industrial en plantas de tratamiento de agua residuales. Esta compuesto por una membrana de fibra hueca sumergible de 175 mm de altura y 56 mm de longitud como se muestra en la figura 3.5.



Figura 3.5. Modulo de ultrafiltración de fibra hueca ZW-1(Zenon®)

Tabla 9. Características y límites de operación de la membrana ZW-1 (Zenon®).

MODELO	ZW-1 MODULO SUMERGIBLE
Configuración	Por fuera/Fibra hueca
Área nominal de la superficie de la membrana	0.047 m ²
Permeado (volumen retenido en la membrana)	10 L
Límites de Operación:	
- Presión máxima transmembrana (PMT)	62 kPa (9 psi)
- Operación típica de (PMT)	10-50 kPa (1-7 psi)

La tabla 9 Muestra límites de operación y características del módulo ZW-1, como su área nominal, el volumen retenido en la membrana, su presión máxima transmembrana así como su operación típica de PMT.

Antes de someter a las pruebas de filtración la membrana fue tratada de acuerdo al siguiente procedimiento. Inmediatamente después de desempacar la membrana se colocó en un recipiente de 2-5 L de capacidad conteniendo agua limpia (destilada o de la llave) a una temperatura no mayor a 40° C. Posteriormente el módulo se conectó a las líneas de agua y de aire respectivamente como lo indica el manual de operación. Paso seguido se abre la corriente de aire y se alimenta un flujo de agua (50 ml/min) durante 5 minutos. Al término de los 5 min el agua del recipiente fue drenada y se volvió a llenar con más agua limpia agregando NaOCl hasta alcanzar una concentración de 200 ppm dejando la membrana en contacto con esta solución durante un tiempo mínimo de 5 horas. Finalmente el sistema fue puesto en operación con agua destilada para determinar la “línea base de operación” manteniendo una presión de 35 kPa (5 psi).

3.6. Arreglo experimental de la unidad comercial de ultrafiltración ZW-1 (Zenon®)

El arreglo experimental del sistema de ultrafiltración fue conformado tomando en cuenta las especificaciones técnicas de la membrana y de acuerdo al esquema propuesto por el proveedor como se muestra en la Figura 3.6: 1) módulo de membrana de fibra hueca (ZW-1) sumergible de 175 mm de altura y 58 mm de longitud; 2) tanque de proceso con capacidad de 2 L con suficiente profundidad para contener la membrana; 3) un medidor de presión, con un rango de 0 a 100 P SI (Falcon bary powered digital pressure, DPG 1000B); 4) medidor de flujo de agua de 5 a 50 L/min (Cole Palmer, KH-32460-30); 4) bomba de presión de desplazamiento positivo de velocidad variable, de 3 a 50 ml/min (Master flex, 7520-50); 5) tanque de recepción del efluente filtrado.

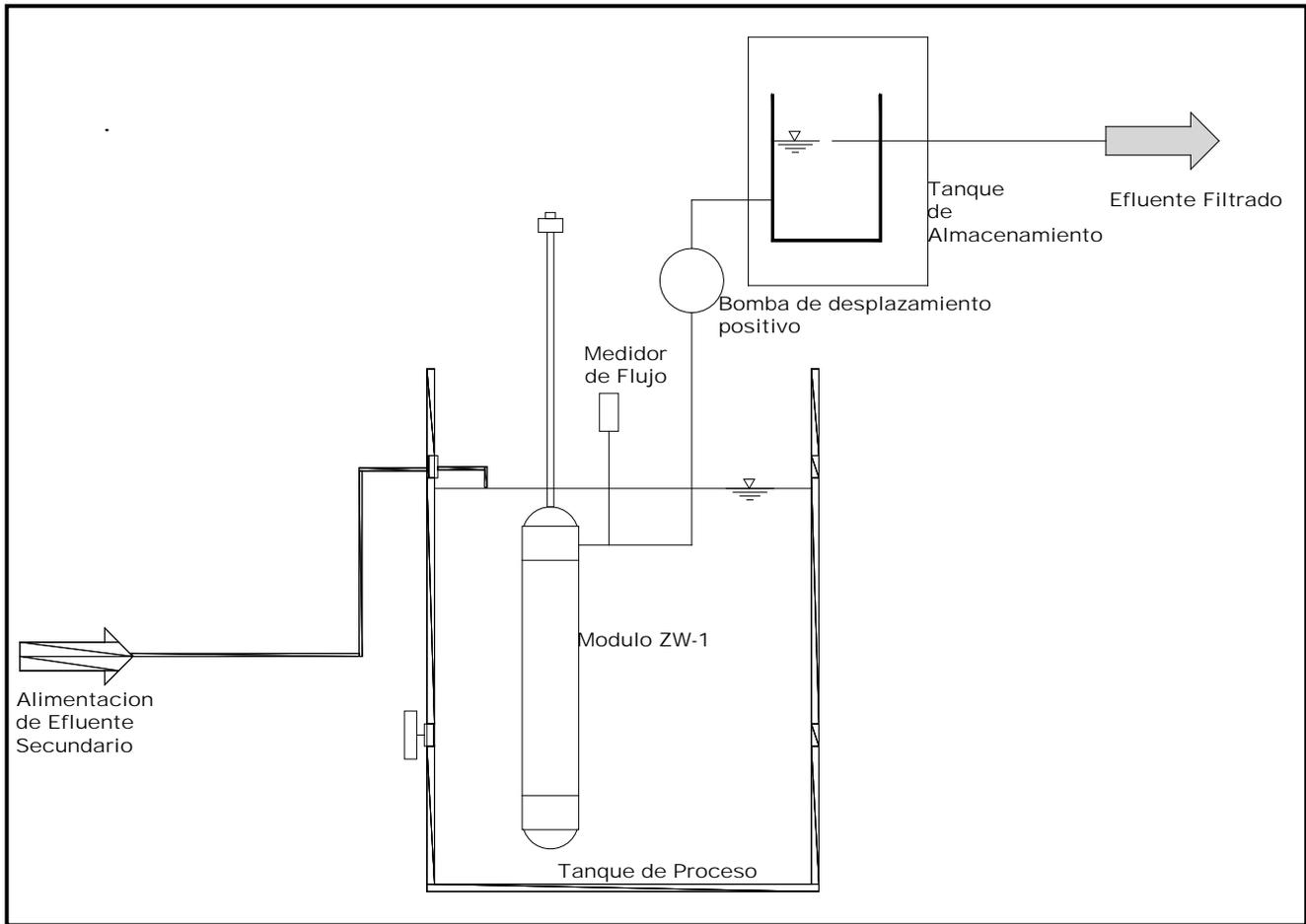


Figura 3.6. Diagrama de Ultrafiltración (Diagrama de Flujo).

CAPITULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Caracterización Físicoquímica del efluente biológico secundario.

El mismo día del muestreo para conocer la calidad del efluente a tratar en esta investigación se realizó una caracterización físicoquímica general donde se midieron parámetros como: pH, turbidez, demanda química de oxígeno (DQO), sólidos disueltos totales (SDT), color, conductividad eléctrica. Los valores obtenidos de las características físicoquímicas de l efluente biológico secundario a lo largo del estudio se resumen en la tabla 10 para diferentes lotes de muestreo.

Tabla 10. Caracterización físicoquímica del efluente biológico secundario.

Parámetro	Fechas de muestreo							Promedio
	14/08/07	23/08/07	04/09/07	13/09/07	11/10/07	16/10/07	23/10/07	
pH	7.28	7.32	7.6	7.56	7.18	7.28	7.34	7.36 ± 0.16
Temperatura (° C)	25	25	25	25	25	25	25	25 ± 0
Conductividad eléctrica(µmhos/cm)	0.682	0.668	0.668	0.579	0.575	0.727	0.735	0.58 ± 0.23
SDT (mg/L)	34.1	33.4	34.6	29	28.9	32	36.9	32.7 ± 3.163
Color (U-Pt Co)	45	55	55	30	45	35	31	42.29±10.56
Turbidez (UNT)	10.3	20.5	18.5	7	6	4.65	5	10.28 ±6.59
DQO (mg/L)	35	35	40	20	25	30	28	30.43 ±6.80

Durante la caracterización del efluente biológico secundario proveniente de la planta tratadora de aguas residuales Cerro de la Estrella, los datos que se obtuvieron demuestran que los niveles de materia orgánica contaminante no son tan elevados como se esperaba en un caso particular, por ejemplo la Demanda química de oxígeno(DQO) reportado por (Lubello 2003) fue de : 41 mg /L, la obtenida durante esta caracterización fue de 30 ± 6.80

mg/L, ya que este parámetro indica la posible cantidad de materia orgánica presente en el agua, podemos mencionar que en la muestra de agua analizada existió menos materia que la usada por (Lubello 2003), que en su análisis utilizó el mismo tipo de agua (efluente secundario). Más sin embargo en el caso de los sólidos disueltos totales (SDT), se obtuvo un valor de: 33 ± 3 mg/L que comparado con el de (Lubello 2003) que reporta en su trabajo una concentración de: 23 mg/L, que es un 30 % mayor el obtenido en el análisis realizado en este trabajo.

4.2. Filtración del efluente secundario en membrana de fibra hueca Zenon ZW-1.

Para conocer el desempeño de la unidad de ultrafiltración durante el tratamiento de l efluente biológico secundario se realizaron pruebas de filtración bajo condiciones de operación controladas de flujo de agua y presión de operación de acuerdo a las recomendaciones técnicas del proveedor.

4.3. Línea base de operación de la membrana de ultrafiltración

Antes de realizar los ensayos experimentales con el agua residual (efluente secundario), la membrana fue operada con agua de stilada para establecer la línea base de operación en términos de parámetros como el flux y el tiempo de corrida, esto significa el desempeño de la membrana en ausencia de problemas de taponamiento. Las condiciones de flujo de agua y presión de membrana fueron respectivamente de 0.062 L/min y 5 psi. Por razones de seguridad y especificaciones del proveedor en todas las pruebas experimentales la presión máxima de operación que se manejo fue de 5 psi. Los resultados obtenidos se presentan en la grafica 4.3.

La membrana de ultrafiltración operó satisfactoriamente durante 120 min y como era de esperarse no se registraron cambios significativos en el flujo de agua, en el flux ni en la presión de operación. Para fines de este estudio se considero como línea base de operación

un flux $1.4 \pm 0.031 \text{ L/m}^2 \cdot \text{min}$ y 5 psi de presión. Una disminución en el valor del flux o un incremento de la presión de membrana sería un indicativo de taponamiento de la membrana y por lo tanto una afectación al desempeño de la misma.

4.4. Desempeño de la membrana de ultrafiltración durante la filtración del efluente biológico secundario.

Un aspecto importante a considerar en el uso de sistemas de filtración es el desempeño de la membrana en cuanto a los tiempos de corrida o de operación y el taponamiento o ensuciamiento de la membrana. Dependiendo de la calidad del agua a tratar las membranas tienden a taponarse gradualmente debido a la retención de sólidos y materia coloidal viéndose afectado la eficiencia del proceso (*B. Schlichtera et al. 2004*).

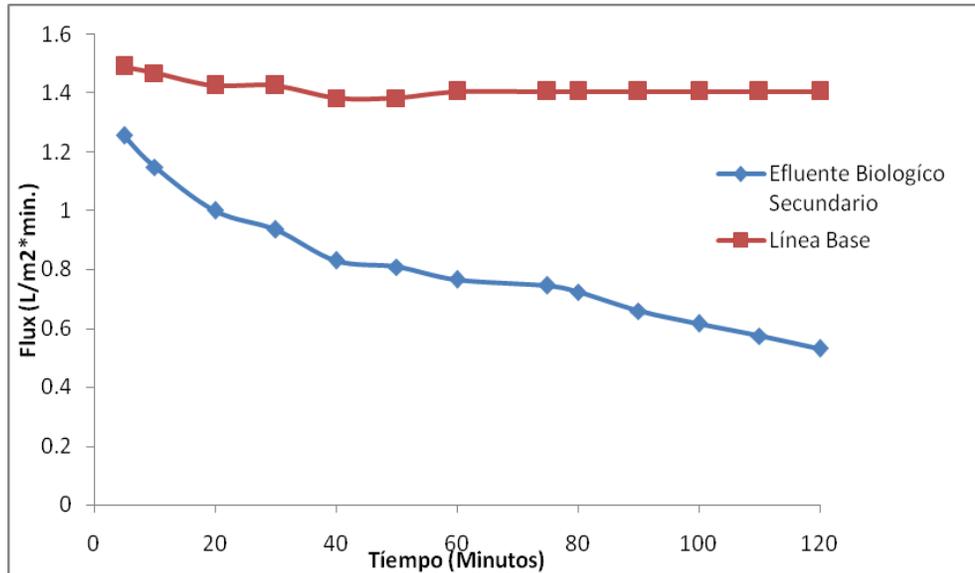
Para conocer el funcionamiento de la unidad de ultrafiltración comercial ZW-1 y el grado de puración que puede alcanzarse en el efluente final, se realizaron pruebas experimentales de filtración en continuo con el efluente biológico secundario.

Cabe señalar que para reducir los tiempos de experimentación, el flujo de agua que se maneja en estas pruebas (0.062 L/min) fue 2.5 veces mayor con respecto al valor recomendado (0.025 L/min) manteniendo las 5 psi de presión para garantizar la seguridad de la membrana.

La grafica 4.4 muestra el desempeño de la membrana durante una corrida de 120 minutos. Se puede observar una rápida caída en el flux desde los primeros minutos reduciéndose hasta en un 57% al final de las 2 h operación con respecto al valor inicial ($1.26 \text{ L/m}^2 \cdot \text{min}$).

Lo anterior se debe a que materia coloidal y sólidos suspendidos que están presentes en el efluente secundario y que tienen un tamaño de partículas de 0.1 a 10 micras están siendo retenidos en la membrana. En la medida que avanza el tiempo de operación estos materiales se van acumulando y con el paso del tiempo dan como resultado el taponamiento o “*fouling*” de la membrana lo que provoca que el flujo de agua disminuya y así también el flux.

En la misma grafica 4.4 se compara la línea base de operación y desempeño del sistema de ultrafiltración durante el tratamiento del efluente secundario.



Grafica 4.4. Comparación de flujo del permeado entre el efluente secundario y la línea base.

Un inconveniente adicional del taponamiento de las membranas es que además de que se tiene una disminución en el volumen de agua tratada, el retro-lavado de membranas y el intercambio de módulos de filtración, se tiene que hacer con mayor frecuencia.

4.5. Efecto del ozono como etapa de pre-tratamiento en el desempeño de la membrana de ultrafiltración.

Un primer experimento fue realizado para la evaluación del ozono en el tratamiento del efluente secundario. Las condiciones de operación se muestran en la tabla 11.

Tabla 11. Condiciones de operación para la evaluación del ozono $D[O_3]=3.83 \text{ mg/L}$.

PARÁMETRO	VALOR
Ozono generado a la entrada $[O_3]_{ge}$	2.3 mg/ L
Gasto Q	0.3 L/ Min.
Volumen efluente $Vol_{Efluente}$	1.8 L
Tiempo de operación	10 Min.
Dosis $D[O_3]$	3.83 mg/ L

Las condiciones de operación para el proceso de ozonación de la tabla 11 fueron determinadas conforme a estudios previos reportados por (**Ramírez, 2008**), realizados con el mismo efluente biológico secundario de la planta “Cerro de la Estrella”.

El efecto del ozono como etapa de pre-tratamiento, en el proceso de filtración sobre el efluente biológico secundario se presenta en la gráfica 4.5 donde se muestra el desempeño de la membrana, a través del flux, durante un tiempo de operación de 120 minutos.

En la gráfica 4.5 se muestra una pequeña mejora en el desempeño de la membrana debido al efecto de la ozonación, ocasionando un menor incremento en el flux operación, comparado con los resultados obtenidos en el proceso anterior (ver gráfica 4.4). Como se menciona en los antecedentes de este trabajo, el ozono actúa y modifica la materia orgánica presente en el efluente, disminuyendo así el taponamiento de la membrana lo cual se traduce en un aumento del tiempo de operación para un régimen de flux de terminado (**Mozia et al, 2005**).

Un segundo experimento fue realizado para evaluar el efecto que tiene el ozono en una mayor dosis(7.6mg/L); estas condiciones se muestran en la tabla 12.

Tabla 12. Condiciones de operación: segunda corrida $D[\text{O}_3] = 7.6 \text{ mg/L}$.

PARÁMETRO	VALOR
Ozono generado a la entrada $[\text{O}_3]_{ge}$	4.6 mg/ L
Gasto Q	0.3 L/ Min.
Volumen efluente Vol_{Efluente}	1.8 L
Tiempo de operación	10 Min.
Dosis $D[\text{O}_3]$	7.6 mg/ L

La grafica 4.5 muestra que con mayor dosis de ozono se logra mejorar a un mas el desempeño de la membrana aunque esta mejora no es proporcional a la dosis aplicada.

Con la dosis de ozono de 3.83 mg/L (ver grafica 4.4), después de 120 minutos operación, el flux se incrementa de 0.54 L/m²*min. (Filtración sin pre-ozonacion) a 0.85 L/m²*min. (Con pre-ozonacion); cuando se aplican dosis de ozono de 7.6 mg/L, el flux se logra mantener hasta en 1 L/m²*min.; 79 % con respecto al flux inicial. En la grafica 4.5 se comparan los resultados obtenidos bajo a mbas c ondiciones de t ratamiento. Dichos datos da n c omo resultado que a partir del minuto 40 l os flux de terminados comienzan a cambiar no m uy significativamente, pero si con un margen de error de un $\pm 5 \%$. Figura 4.5.

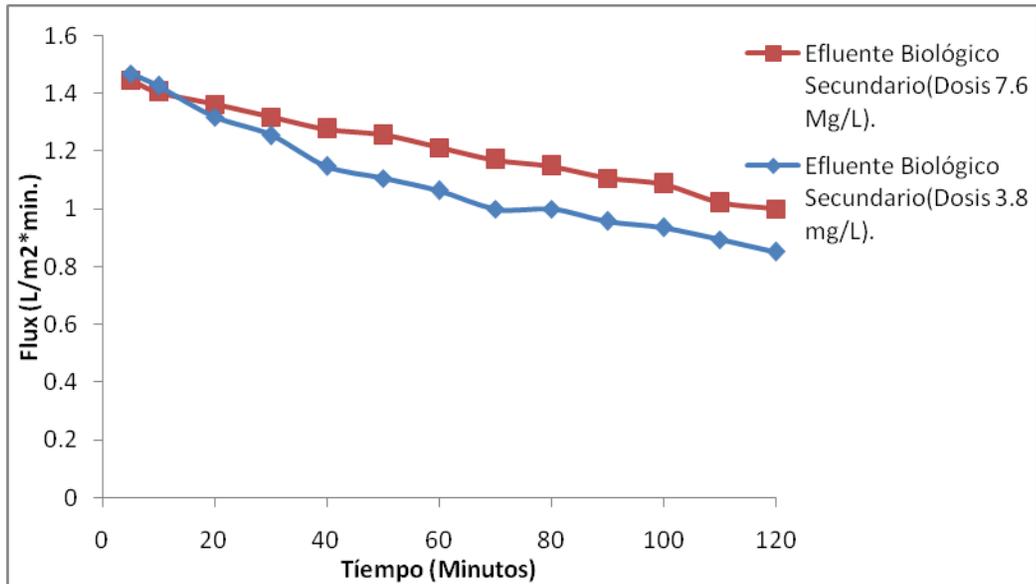


Figura 4.5. Grafica de comparación del efluente ozonado a una dosis de 7.6 y 3.8 mg/L.

Tabla 13. Corridas de filtración en membranas de ultrafiltración de fibra hueca con y sin pre-tratamiento con ozono.

TIEMPO (Minutos).	J (L/m²*min.)		
	FILTRACIÓN	3.83 mg/L+FILTRACIÓN	7.6 mg/L+FILTRACIÓN
0.0	0.0	0.0	0.0
5.0	1.25	1.47	1.45
10.0	1.15	1.43	1.40
20.0	1.00	1.32	1.36
30.0	0.93	1.26	1.32
40.0	0.83	1.15	1.28
50.0	0.80	1.11	1.26
60.0	0.76	1.06	1.21
70.0	0.74	1.00	1.17
80.0	0.72	1.00	1.15
90.0	0.65	0.96	1.11
100.0	0.61	0.94	1.09
110.0	0.57	0.89	1.02
120.0	0.53	0.85	1.00

En la tabla 13 se muestra una comparación de las tres corridas de filtración realizadas incluyendo el proceso con y sin pre-tratamiento con ozono.

Así mismo podemos observar que con una concentración de 3.83 mg/L hay un porcentaje un tanto mayor de taponamiento, que en una concentración de 7.6 mg/L. Esto a raíz que el agua al ser sometida a una concentración más alta de ozono, la materia orgánica presente es trasformada considerablemente, ocasionando un menor taponamiento y aumentando el flux por la membrana. Por tanto los resultados en la etapa de pre-tratamiento con ozono concuerdan con lo reportado por *Minhalmaa et al. 2005*.

4.6. Calidad del efluente filtrado en membrana de fibra hueca ZW-1 (Zenon®).

El efluente obtenido por ultrafiltración fue analizado para estimar la calidad de la agua tratada. Los resultados de este análisis se presentan en la tabla 14. La calidad de la agua obtenida por ultrafiltración en membranas de fibra hueca ZW-1 mejora su calidad significativamente con respecto al efluente biológico sin filtrar. Particularmente se observa una reducción en el contenido de color del 67%, turbidez 80%, y DQO del 40%. De estos resultados se deduce que una parte de la materia presente en el efluente biológico puede ser removida mediante un simple proceso de ultrafiltración.

Tabla 14. Analisis del efluente secundario filtrado por la unidad ZW-1. (Zenon®).

PARÁMETRO	EFLUENTE BIOLÓGICO SECUNDARIO	EFLUENTE FILTRADO (ZW-1)
pH	7	7
Temperatura (°C)	25	25
Conductividad eléctrica (µmhos/cm)	580	620
SDT (mg/L)	327	315
Color verdadero (Unidades Pt Co)	42	14
Turbidez (UNT)	10	2
DQO (mg/L)	30	18

Los resultados obtenidos en este trabajo coinciden con reportado por *Lubello et al., 2003* quienes utilizaron el mismo tipo de membrana (ZW-10, ZeoWeed) como tratamiento terciario de un efluente secundario con fines de reúso industrial.

Los autores obtienen remociones en turbiedad del 94% y en DQO de 32%. Estos resultados corroboran la eficiencia que tiene las membranas comerciales de este tipo para el tratamiento de efluentes secundarios.

Tabla 15. Resultados obtenidos en la filtración de un efluente secundario por ultrafiltración en modulo ZW-10 (Zenon®). Lubello et al., 2003.

PARÁMETRO	EFLUENTE BIOLÓGICO SECUNDARIO	EFLUENTE FILTRADO (ZW-10)
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	23	0.32
Turbidez (UNT)	7	0.4
DQO (mg/L)	41	27

Los resultados arrojados por los experimentos de ultrafiltración, se reportaron en la tabla 16, estos nos dicen que en efecto el tratamiento de ultrafiltración da buenos resultados en la remoción de parámetros fisicoquímicos como la turbidez, color y la DQO al igual que los SDT removiéndonos el color en un 74 %, y en un 84 % la turbidez con respecto a la DQO la remoción del mismo fue de un 28 %, y los sólidos disueltos totales los redujo en un 6 %. Esto comparado con el efluente concentrado ó rechazo.

Tabla 16. Comparación entre el efluente filtrado y el concentrado.

PARÁMETRO	EFLUENTE FILTRADO Ó PERMEADO	EFLUENTE CONCENTRADO Ó RECHAZO
pH	7.4	7.4
Temperatura (°C)	25	25
Conductividad eléctrica(µmhos/cm)	620	650
SDT(mg/L)	315	336
Color (U Pt Co)	14	55
Turbidez (UNT)	2	13
DQO(mg/L)	18	25

4.7. Estimar la calidad final del agua tratada, mediante ozono y ultrafiltración, bajo las mejores condiciones de operación.

Los resultados de la tabla 17 indican la calidad del efluente secundario tratado por ultrafiltración y mediante la combinación de ozono-ultrafiltración. Dichos resultados muestran que ambos métodos de tratamiento, ozono y ultrafiltración, mejoran significativamente la calidad del agua, obteniéndose un efluente final con menor contenido de SDT, color, turbidez y el DQO.

Con el esquema de tratamiento propuesto en esta tesis (ozono-ultrafiltración), se puede observar que el ozono puede contribuir de manera importante, no solo mejorando el desempeño de la membrana disminuyendo el problema del taponamiento, adicionalmente y como se puede ver en los resultados de la tabla 17, el ozono puede contribuir en la calidad del efluente final.

El efecto en la calidad del agua se puede con la combinación ozono-ultrafiltración, al reducir el contenido de SDT en un 12 %, la remoción de color fue de 88 % y la de turbidez de un 92 %, con respecto al DQO la remoción fue de 56 %, esto comparado con calidad inicial del efluente secundario.

Tabla 17. Calidad del efluente biológico y el agua tratada con ozono y ultrafiltración en membrana de fibra hueca.

Parámetro	Efluente biológico secundario	Tratamiento del efluente secundario		
		UF	O3	O3 + UF
pH	7.4	7.4	7.9	7.9
Conductividad eléctrica (mS/cm)	662	620	713	681
SDT(mg/L)	327	315	290	285
Color (U Pt Co)	42	14	13	5
Turbidez (UNT)	10	2	3	0.8
DQO(mg/L)	30	18	19	13

5. Estimación del costo de tratamiento del efluente secundario.

5.1. Estimación de costos de la etapa de pre-ozonacion.

Debido a que la aplicación de ozono en el tratamiento de aguas en México es relativamente nuevo, no existe índices de de costos locales. Por lo tanto se partirá de datos de 20 plantas construidas en Estados Unidos. Los parámetros necesarios para llevar a cabo la evaluación económica son la dosis, el tiempo de contacto y el flujo de agua a tratar.

El costo por metro cúbico de agua para la eliminación de algún contaminante, es la suma de los costos de capital mas los de operación. Dentro de los costos de capital se encuentra la generación de ozono la cual incluye el tratamiento de aire, el equipo de generación y de destrucción de ozono, tuberías, válvulas, instrumentación, sistema de disolución de ozono (Contactor), sistema de control e instalación.

El porcentaje estimado para los componentes que integran los costos de capital (A.W.W.A 1990) son:

- Equipo de generación 53 %
 - Construcción 25 %
 - Contactor 22 %
- Total: 100 %

Como costos de mantenimiento y operación

- Potencia para el gas de alimentación, generación y sistemas de construcción de ozono.
- Mano de obra para operar el equipo 24 hr/día
- Mantenimiento
- Enfriamiento

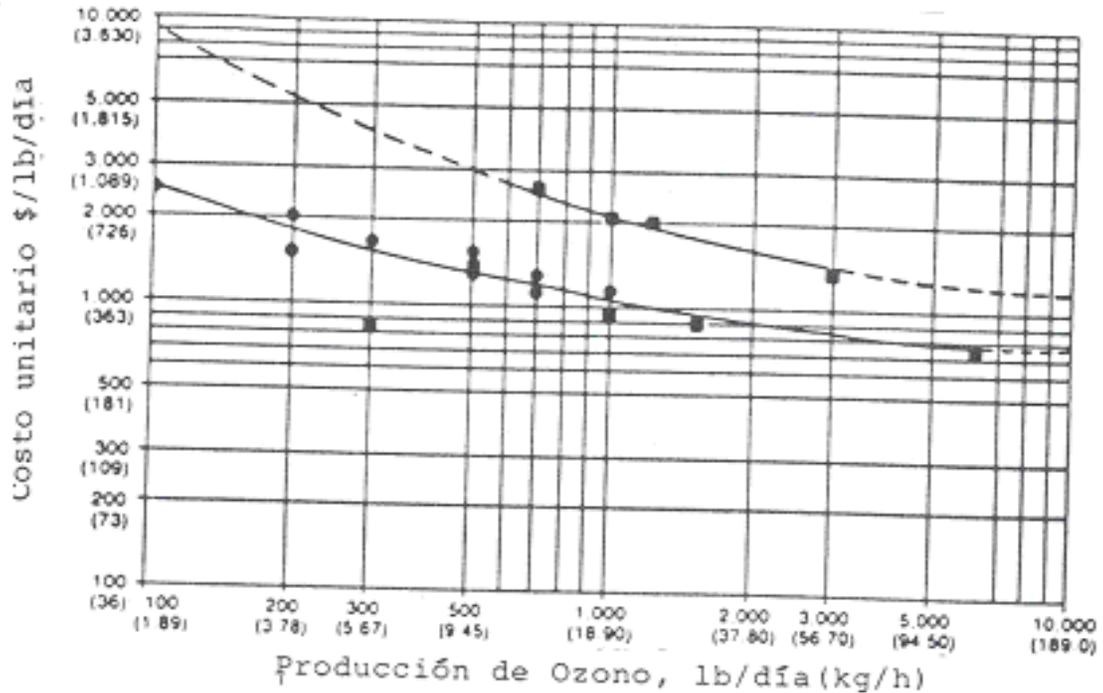
Tabla 18. Porcentajes estimados para cada uno de los componentes de mantenimiento para grandes y pequeños sistemas.

	Sistemas pequeños (menos de 1.89 Kg/h de ozono).	Sistemas mayores (1.89Kg/h de ozono).
Potencia		
Mano de obra	75%	75%
Mantenimiento	38%	5%
Enfriamiento	38%	15%
	2%	5%

Se puede observar que el costo mayor para los sistemas grandes es el de potencia (A.W.W.A. 1990)

En este trabajo de los costos de capital para el efecto del ozono en la operación de una membrana de ultrafiltración en un efluente biológico secundario de la planta tratadora de agua residual de la “Cerro de la Estrella”, fueron estimados tomando como base la información obtenida de 20 plantas instaladas en los Estados Unidos y Francia.

A partir de la figura 5 es posible estimar el costo unitario de generación de ozono en \$USD/lb/día con base en los requerimientos de producción (lb/día ó Kg/h); ello incluye los costos de tratamiento de aire, generación de ozono, de succión de ozono, tuberías, válvulas, instrumentación, difusores, sistemas de control e instalación. En la figura se pueden observar 2 curvas, se recomienda utilizar la curva superior, ya que con ella la estimación es más real. Los círculos representan los costos para las plantas estadounidenses y los cuadros de las plantas francesas.



Gráfica 5. Gráfica para estimar costos de capital.

La producción de ozono requerida por el proceso (Capacidad a instalar) se puede calcular con la siguiente relación:

Donde:

P : Producción (Kg/h)

Q_L : Flujo de agua a tratar (m^3/hr)

D : Dosis (Kg/m^3)

3.6: Factor para convertir a Kg/h

Con el dato de producción de ozono y utilizando la figura se obtiene el costo unitario para la producción de ozono. Posteriormente, aplicando los porcentajes estimados para los costos de capital es posible estimar el costo de capital total, al que hay que sumar los de mantenimiento y operación, ya que estos últimos se calculan a partir de parámetros de

operación anual; es decir, un flujo promedio anual una dosis promedio anual, las cuales deben ser inferiores a las del diseño.

Para obtener los costos de capital se aplica una depreciación del 15 % de interés (IVA) a 10 años utilizando el método lineal propuesto por (Solanet et al., 1989) de acuerdo con la siguiente relación:

$$\text{Costo de capital anual} = \frac{Ct(i(1-i)^n)}{((1-i)^n - 1)}$$

Donde:

Ct : Costo de capital total

i : Interés (IVA)

n : Numero de años a amortizar

Para obtener los costos de mantenimiento y operación, se tiene que calcular el costo de potencia y los porcentajes anteriormente presentados. El costo de potencia se calcula de la siguiente forma:

$$CP(\$ / h) = (P_M kw / h)(E_e kwh / kg)(CE\$ / kwh)$$

Donde:

CP : Costo de potencia

P_M : Producción promedio

E_e : Energía específica

CE : Costo de energía

Cálculos:

Tabla 19. Condiciones de operación óptimas para estimar el costo de tratamiento del efluente secundario.

PARAMETRO	CANTIDAD
Dosis	7.6 mg/L
Tiempo de Contacto	10 Minutos
Flujo de agua a tratar	2 m ³ /s

Capacidad a instalar: $(2 \text{ m}^3/\text{s}) \times (7.6 \text{ mg/L}) \times (1000\text{L}/ \text{m}^3) \times (1 \text{ Kg}/1000000\text{mg}) \times (3600\text{s}/\text{h})$
= 54.72 Kg/ h

Con este valor, obtenemos de la figura, el valor de 1500 dls/lb/día

$(1500 \text{ dls}/\text{lb}/\text{día}) \times (24\text{h}/\text{día}) \times (1 \text{ lb}/0.4535 \text{ Kg}) = \$ 79,382.58$

El costo de generación anterior representa aproximadamente el 53 % de los costos de capital totales; y en base a este calculamos los costos para la construcción (25 %) y el contactor (22 %). La suma de los costos anteriores representa:

El costo de capital total = \$ 208, 725,260.8

El costo de capital anual se calcula de la siguiente manera:

Costo de Capital Anual = $(\$ 208, 725,260.8) \times (0.15 (1+0.15)^{10}) / ((1+0.15)^{10}-1) =$

\$ 41, 594,249.02

Tabla 20. Costos

CONCEPTO	COSTO
Costo de generación	\$ 110, 624, 388.2
Costo de construcción	\$ 52, 181, 315.19
Costo de contactor	\$ 45, 919,557.37
Costo de capital total	\$ 208, 725, 260.8
Costo de capital anual	\$ 41, 594, 249.02

El tipo de cambio fue de 11.00 pesos por cada dólar.

Los costos de mantenimiento y operación se calculan a partir de los datos promedio que se presentan a continuación:

Tabla 21. Datos para el cálculo de los costos de operación y mantenimiento.

PARAMETRO	CANTIDAD
Dosis promedio	7.6 mg/ L
Tiempo de Contacto	10 Minutos
Flujo de agua a tratar	2 m ³ / s
Costo de energía eléctrica zona centro	\$ 0.6559/Kwh
Energía específica	26.4 Kwh/Kg

Calculo del costo anual de potencia:

$$(54.72 \text{ Kg/h}) \times (26.4 \text{ Kwh}) = 1,444.6$$

$$(1,444.6 \text{ Kwh/h}) \times (24\text{h/dia}) \times (365 \text{ días / año}) \times (0.6559 \text{ Kwh}) = \$ 8, 300,215.10 \text{ Anuales.}$$

El costo anterior representa aproximadamente el 75 % de los costos totales de mantenimiento y operación y en base a este calculamos un 5 % para el agua de enfriamiento, un 5 % para mano de obra y un 15 % para mantenimiento. La suma de los valores anteriores nos da el costo total de mantenimiento y operación.

Los costos obtenidos se representan continuación:

Tabla 22. Costos obtenidos.

PARAMETRO	CANTIDAD
Costo anual de potencia	\$ 8, 300, 215.10
Costo de mantenimiento	\$ 1, 660, 043.02
Costo de agua de enfriamiento	\$ 553, 347.67
Costo de mano de obra	\$ 553, 347.67
Costo total de M y O	\$ 11, 066,953.46

Si se divide los costos de capital anual y los costos de M y O anual entre el número de metros cúbicos a tratar al año obtenemos el costo por ozonar cada metro cúbico de efluente biológico secundario de la planta “Cerro de la Estrella”.

$$2 \text{ m}^3/\text{s} = 63, 072, 000 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$(\$ 11, 066, 953.46/\text{año}) / (63, 072, 000 \text{ m}^3/\text{año}) = 0.1754 \text{ \$/m}^3$$

Por lo tanto el costo estimado utilizándola tecnología de ozono por cada m³ es de 0.1754
\$/m³

5.2. Estimación de costo del proceso de membrana.

Estimando un costo a nivel industrial se tomó el tipo de membrana “Zenon ZW-1000 Jr. System”, la cual tiene un costo por módulo de U\$ 200 con una capacidad máxima de filtrado de 1224 L/D, por lo tanto:

$$\text{Flujo planta Cerro de la Estrella} = 2,000 \text{ L/s} = 172, 800,000 \text{ L/D}$$

Por lo tanto:

Costo estimado para la implementación del sistema de filtración de la planta es de aproximadamente 28,235,294.12 U\$

282,352,941 \$

Nota. El costo tomado por dólar es de \$ 11 según el banco de México.

$(\$ 293,419,894.5/\text{año}) / (63,072,000 \text{ m}^3/\text{año}) = 4.65 \text{ \$/m}^3$

De acuerdo a los cálculos anteriores los costos utilizando las tecnologías de ozono y membrana de fibra hueca obtenemos el siguiente estimado de costos.

$\text{Total} = 4.82 \text{ \$/m}^3 = 48.2 \text{ USD \$}$

Por lo tanto podemos concluir que el costo de tratamiento por ozono está dentro de lo factible de acuerdo a estudios preliminares, (Correa, 2008). Pero la utilización de otra tecnología (membrana de fibra hueca), hace que se incrementen aproximadamente 4 pesos por encima del costo de tratamiento por ozono.

Nota: En esta estimación de costos no fue considerada la Depreciación, por que solo es un estimado y no un cálculo real.

6. CONCLUSIONES.

Con base en la experimentación y los resultados obtenidos se demuestra que el ozono tiene la capacidad de eliminar materia orgánica presente en un efluente biológico secundario, y por tanto aumentar el desempeño de una membrana de ultrafiltración así como mejorar la calidad del agua. La reducción del 89 % de color, 57 % de DQO del efluente secundario así como las variaciones en los experimentos de ultrafiltración-ozono corroboran la hipótesis planteada al inicio de esta investigación.

Conclusiones Particulares.

1.- Se caracterizó el efluente secundario en base a parámetros físicos y químicos como el color, turbidez, conductividad y SDT. Los resultados obtenidos durante la caracterización y comparación en los parámetros establecidos en la norma son altos, por lo tanto el efluente secundario aun no es apto para la utilización de recarga de mantos acuíferos, si no antes haber llevado un tratamiento previo que nos permita obtener parámetros y resultados que estén dentro de lo que establece la norma.

2.- Durante la búsqueda de las mejores condiciones de operación de la unidad de ultrafiltración, se realizaron pruebas experimentales de ultrafiltración en forma continua con el efluente secundario, llegando a las condiciones óptimas de operación del módulo de ultrafiltración (ZW-1). Particularmente para este punto se redujo los tiempos de operación de la experimentación para un mejor análisis de los resultados. Se realizaron varias corridas con el módulo de ultrafiltración y el efluente secundario en tiempos de operación de 120 minutos, el flujo del agua que se maneja en estas pruebas (0.062 L/min.) fue 2.5 veces mayor con respecto al valor recomendado (0.025 L/min.) manteniendo las 5 psi de presión para garantizar la seguridad de la membrana.

3.- En el momento de evaluar el efecto del ozono como etapa de pre-tratamiento, se utilizaron dos condiciones de operación determinadas conforme a estudios preliminares, las dosis de ozono utilizadas fueron de 3.85 y 7.6 mg/L. El efecto que tubo el ozono en el efluente secundario con estas dosis fue la disminución de parámetros como turbidez y un 36 % para el DQO, esto para una dosis de ozono de 7.6 mg/L.

El ozono como etapa de pre-tratamiento remueve materia orgánica presente en el agua, aumentando el desempeño de la membrana y mejorando tiempo de operación, teniendo como mejor resultado el pre-tratamiento de ozono reduciendo parámetros fisicoquímicos (Color, DQO, Turbidez), así como aumentar la calidad del agua tratada.

Consecuentemente el efecto que tubo el ozono como pre-tratamiento del efluente secundario redujo parámetros fisicoquímicos, así como materia orgánica e inorgánica reportada en la literatura.

4.- La calidad del agua obtenida por filtración de membranas e fibra hueca (ZW-1), mejora su calidad significativamente con respecto al efluente biológico sin filtrar.

Particularmente se observa una reducción el contenido de color del 67 %, turbidez 80 %, y DQO del 40 %. De estos resultados se deduce que una parte de la materia presente en el efluente biológico puede ser removida mediante un simple proceso de ultrafiltración usando membranas de fibra hueca. Sin embargo la remoción mas reveladora se tubo con la combinación de ozono-ultrafiltración, obteniendo una eliminación alta de parámetros como SDT en un 13 %, la remoción del color fue de 89 %, en la turbidez la disminución fue de un 93 %, con respecto a la DQO la remoción fue de un 57 % esto comparado con la caracterización previa del efluente secundario. Al ser comparado el efluente tratado con ozono-ultrafiltración, arrojaron resultados como por ejemplo, color de 5 U-Pt Co, una turbidez de 0.8 UNT y los SDT de 285 mg/L, los cuales están dentro de lo permitido en la norma.

5.- La estimación de costo realizada en una investigación, para el tratamiento del efluente secundario de la planta Cerro de la Estrella, considerando que el flujo de agua que esta planta trata es de aproximadamente 2000 L/seg., incluyendo solo la aplicación de ozono sería el costo de \$ 0.18 por cada metro cúbico de agua. Considerando la combinación de métodos de tratamiento ozono-ultrafiltración, el costo se incrementa a \$ 4.82 por cada metro cúbico de agua a tratada.

Conclusión Final.

De acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo se concluye que el ozono junto con otra tecnología (ultrafiltración), hacen posible que el agua este dentro de lo que especifica la Norma (PROY-NADF-003-AGUA-2002), para la recarga de mantos acuíferos.

BIBLIOGRAFIA

- APHA, AWWA, and WEF, American Public Health Association/American Water Works Association/ Water Environmental Federation (1998). Standard Methods for the Examination of waters and wastewaters 20th Edition, Washington DC, USA.
- APHA, AWWA, WPCE. Standard Methods for the examination of water and wastewater, 19th Ed. Washington D.C. (1995 and 1992).
- Aptel P. y Buckley C., Tipos de Operaciones de Membrana en Tratamiento del Agua por Procesos de Membrana, Principios Procesos y Aplicaciones. American Water Works Association Research Foundation, Lyonnaise des Eaux, Water Research. Commission of South Africa. Ed. McGraw Hill. (1998).
- M. Bataller, E. Véliz, L. A. Fernández, C. Hernández, I. Fernández, C. Álvarez, E. Sánchez., Secondary Effluent Treatment with Ozone. IOA 17th World Ozone. (2005).
- Bourgeois K. N., Darby J. L. y Tchobanoglous G., Ultrafiltration of wastewater: effects of particles, mode of operation, and backwash effectiveness Water Research Vol. 35 No. 1, pp. 77-90. (2001).
- Bouwer H. Renovation wastewater with rapid infiltration land treatment systems. In: "Artificial Recharge of Groundwater, T. Asano (ed.) Butterworth Pub. Boston, Ma. 359-395.(1994).
- Botha G., Sanderson R. y Buckley C., Brief Historical Review of Membrane Development and Membrane Applications in Wastewater Treatment in Southern Africa", en Membrane Technology in Wastewater Management. Water Science and Technology. Vol. 25, No. 10, pp. 1-4. Gran Bretaña. (1992).
- Bouwer H., Rice R.C., Lance J.C. and Gilbert R.G. Rapid-infiltration research-the Flushing Meadow Project, Arizona. JWPCF, Vol. 52, 10, 2457-2470. (1980).
- Correa González J. Ismael (2007). Cuantificación y eliminación del olor y sabor en agua superficial tratada para abastecimiento potable. Tesis de Licenciatura. FES-Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México.

- Castellán, Enrique. Análisis y Perspectiva del Recurso Hidráulico en México CIMMA IPN. (2000).
- Chang R., Química. Cuarta edición, McGraw-Hill. México. (1995).
- Chen V ., Fane, A .G., Madaeni, S . y Wenten, I.G. Particle deposition during membrane filtration of colloids: transition between concentration polarization and cake formation, Journal of Membrane Science, Vol 125, pp. 109-122. (1997).
- Cross J . Membrane Processes: Versatile Technology for Cutting Cost and Protecting the Environment. Ernst M., M. Jenkel. Ozonation of DOC municipal WWTP effluents for groundwater recharge water Science and Technology, Volume 40, (4-5), pp. 277-284. (1992).
- Comisión Nacional de Agua, CONAGUA, Estadísticas de la Agua en México. (2005).
- Van Houtte E. and Johan Verbauwhe, Torreele s water re-use facility enabled sustainable groundwater management in the Flemish dune (Belgium), 6th IWA Specialist conference on Wastewater Reclamation and Reuse for Sustainability, (2007).
- Karnika B.S., S .H. Davies, M .J. Baumann, S .J. Masten, The effects of combined ozonation and filtration on disinfection by-product formation. Water Research 39 (2005) 2839–2850. (2005).
- C. Lubello, R. Gori, A.M. de Bernardinis .Ultrafiltration as tertiary treatment for industrial reuse. (2003).
- Mozia S, Maria Tomaszewska, Antoni W. Morawski. Application of an ozonation–adsorption–ultrafiltration System for surface water treatment. Desalination 190 (2006) 308–314. (2005).
- Minhalmaa M ., R. Domínguez, Norberta de Pinho. Cork processing wastewaters treatment by an ozonation/ultrafiltration integrated process. Desalination 191 (2006) 148–152. (2005).

- Monroy O. Cervantes F. Viniestra G., Biotecnologías para el tratamiento de las aguas residuales de la ciudad de México. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa.(1997).
- Mendez C. & Diaz, M. Depuración de aguas residuales. Tecnología de aguas. 183: 27-32. (1998).
- Proyecto de *Norma Ambiental para el Distrito Federal PROY-NADF-003-AGUA-2002*, que establece las condiciones y requisitos para la recarga en el Distrito Federal por inyección directa de agua residual tratada al acuífero de la zona metropolitana de la Ciudad de México.
- Peter S. Cartwright. *Advanced technologies for cleaner wastewater treatment, Precision Cleaning 95 Proceedings*, pp. 161-176.(1995).
- Ramírez H. Raul (2008). Oxidación con ozono de un efluente biológico para la recarga artificial de un acuífero. Tesis de Licenciatura, FES-Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Shu-Hai Y. Dyi-Hwa T. Wei-Chun H. Effect and mechanism of Ultrafiltration membrane fouling removal by Ozonation. *Desalination*, (2007) 224-230. (2005).
- Shu-Hai Y. Dyi-Hwa T. Wei-Chun H. Effect and mechanism of ultrafiltration membrane fouling removal by ozonation. *Desalination* 202 (2007) 224–230. (2005).
- Schlichter B. V. Mavrov, H. Chmiel. Study of a hybrid process combining ozonation and microfiltration/ultrafiltration for drinking water production from surface water. *Desalination* 168 (2004) 307-317. (2004).
- Salgot, M. and Angelakis, A. *Guidelines and regulations on wastewater reuse*. Chap 23 in: Lens, P., Zeeman, G., Lettinga, G. (Eds.). *Decentralised sanitation and reuse: Concepts, systems and implementation*. IWA Publishing, London, U.K. (1996).
- Wang X. Lei Wang L. Ying Liu, Duan W. Ozonation pretreatment for ultrafiltration of the secondary effluent. *Journal of Membrane Science* 287 (2007) 187–191. (2006).

- WHO. World Health Organization. Health risks in aquifer recharge using reclaimed water: State of the art report. Edited by Aertgeerts R and Angelakis A , 280pp. (2003).
- Young G . P ark. Effect of ozonation for reducing membrane-fouling in the UF membrane. Desalination 147 (2002) 4348. (2002).
- Young G . P ark, Effect of Ozonation for reducing membrane-fouling in the UF membrane. Department of Chemical Engineering, Daejin University, 11-1 Sundari Pochungoon Gyungkido 487-711 Korea. (2002).
- Young G . P ark. Effect of Ozonation for reducing membrane-fouling in the UF membrane. Department of Chemical Engineering, Daejin University, 11-1 Sundari Pochungoon Gyungkido 487-711 Korea. (2002).

ANEXO 1.

Proyecto de Norma (PROY-NADF-003-AGUA-2002), e estos parámetros microbiológicos, físicos y químicos se listaran a continuación:

CARACTERÍSTICA	LÍMITE MAX. PERMISIBLE
E. coli o coliformes fecales u organismos	Ausente
Termotolerantes.	
Enterovirus.	Ausente
Estreptococos fecales.	Ausente
Giardia lamblia.	Ausente

- Límites máximos permisibles de las características físicas:

Tabla 2

CARACTERÍSTICA	LÍMITE MAX. PERMISIBLE
Color	15 unidades de color verdadero en la escala platino cobalto
Conductividad	No ser mayor en 15 % al agua del acuífero
Turbiedad	5 UNT

- Límites máximos permisibles de las características químicas:

Tabla 3

CARACTERÍSTICA	LÍMITE MAX. PERMISIBLE (MG/L)
Aluminio	0.2
Arsénico	0.025
Bario	0.7
Benceno	0.01

Boro	0.3
Cadmio	0.003
Carbono Orgánico Total	1
Cianuros	0.07
Cloro libre residual	0
Cloruros (como Cl ⁻)	250
Cloruro de vinilo	0.005
Cobre	2
Cromo total	0.05
1,1-Dicloro etileno	0.03
Dureza Total (como CaCO ₃)	500
Estireno	0.02
Etilbenceno	0.3
Fenoles o compuestos fenólicos	0.3
Fluoruros	1.5
Fósforo	1
Hidrocarburos poliaromáticos HPA	0.0002
Hierro	0.3
Manganeso	0.15
Mercurio	0.001
Metil terbutil éter	0.03
Nitratos (como N)	10
Nitritos (como N)	1
Nitrógeno amoniacal (como N)	0.5
Percloroetileno o tetracloroetileno	0.04
Ph	6.5 - 8.5
Plomo	0.01
SAAM	0.5

Sodio	200
Sólidos disueltos totales	1000
Sólidos suspendidos totales	5
Sulfatos (como SO ₄)	400
Tolueno	0.7
Trihalometanos totales	0.2
Tricloroetileno	0.07
1,1,1-Tricloroetano	2
Xilenos (tres isómeros)	0.5
Zinc	5
Plaguicidas clorados (µg / L)	
1,2-dibromo-3-cloropropano	1
2,4 D	30
Alalocloro	20
Aldicarb	10
Aldrín y dieldrín	0.03
Atrazina	2
Carbofurano	5
Clordano	0.2
DDT	1
Gama-HCH (lindano)	2
Heptacloro y opóxido de heptacloro	0.03
Hexaclorobenceno	1
Metoxicloro	20



Figura a) Efluente secundario tratado (O_3 -Uf)



Figura b) Efluente secundario tratado con O_3 .



c) Efluente secundario de la Planta tratadora Cerro de la Estrella.

Tabla de comparación de los sistemas a escala Zeeweed.

Comparison Summary Table for Bench Scale ZeeWeed Systems			
<p>General Description</p>	<p>Zenon ZW-1 Module plus User-supplied System</p> <p>Compact, inexpensive, flexible, manual bench top system to investigate of effect ZW filtration on water quality and perform fouling/cleaning studies in water and wastewater (including ZenoGem) applications. Can be used as process screening tool.</p> <p>A research and applications tool.</p>	<p>Zenon ZW-10 System</p> <p>Small, flexible, automated frame-mounted system to emulate the full scale ZW-500 in water and wastewater (including ZenoGem) applications. Process feasibility can be determined on a larger scale than ZW-1, however, scaling to ZW-500 is not possible.</p> <p>A research and applications tool.</p>	<p>Zenon ZW-1000 Jr. System</p> <p>Small, automated frame-mounted system to emulate full scale ZW-1000 applications. Process feasibility can be determined with low solids water streams only (ie. Surface or ground waters). Limited process variables. Scaling to full size ZW-1000 is limited.</p> <p>Mainly an applications feasibility tool.</p>
<p>System Characteristics</p>	<p>Zenon ZW-1</p>	<p>Zenon ZW-10 System</p>	<p>Zenon ZW-1000 Jr. System</p>

Approximate System Cost	US\$2000(US\$125 per module)	US\$8000 (US\$200 per module)	US\$8000 (US\$200 per module)
System Process Flow (L/day)	7.2 to 36	432 to 2160	360 to 1224
Membrane Configuration	Integral Immersed Module	Integral Immersed Module	External Housed Immersed Module
Process Tank Volume (L)	2 to 20	190	68 (Feed Tank)
Backpulse Tank Volume (L)	1 to 2 (optional)	15	9
Type of Control	Manual (semi-automatic optional)	Automatic	Automatic
Membrane Characteristics			
Outside Diameter (mm)	2	2	0.6
General Type	supported , non-ionic, hydrophilic	supported , non-ionic, hydrophilic	unsupported , non-ionic, hydrophilic
Nominal Pore Diameter (micro m)	0.08	0.08	0.02
Module Characteristics			
Effective Membrane Surface Area (sq m)	0.047	0.93	1
Module Dimensions (cm)	Length = 17.5. Diameter = 5.8	Length = 69.2. Diameter = 11	Length = 79. Diameter = 7
Holdup Volume (mL)	10	130	1 liter, including shell side
System Operation	Zenon ZW-1	Zenon ZW-10 System	Zenon ZW-1000 Jr. System

Backpulse	No (option)	Yes	Yes
Maximum Permeation Pressure (bar)	0.6	0.6	0.83
Operating Transmembrane Pressure (bar)	0.07 to 0.55	0.07 to 0.55	0.07 to 0.55
Permeate Flow Range, Net (mL/min)	5 to 25	300 to 1200	250 to 850
Typical Permeate Flow, Net (mL/min)	20	700	500
Maximum Backpulse Pressure (bar)	0.7	0.7	0.7
Maximum Scouring Air Flow (cu m/hour)	1.8	7.2	0.3
Maximum Operating Temperature (deg C)	40	40	35
Maximum Cleaning Temperature (deg C)	40	40	35
Operating pH Range	5 to 9	5 to 9	5 to 9.5 at <30 deg C, 5 to 8 at >30 deg C
Cleaning pH Range	2 to 10.5	2 to 10.5	2 to 11 at <30 deg C, 2 to 9 at >30 deg C
Maximum OCl- Exposure (ppm-hours)	1000000	1000000	1000000
Maximum OCl- Concentration (ppm)	1000	1000	500
Maximum Feed Suspended Solids (mg/L)	25000	25000	500
			Max Feed Turbidity = 50 NTU

	Zenon ZW-1	Zenon ZW-10 System	Zenon ZW-1000 Jr. System
Some Typical Applications			
<u>Water Processes</u>			
Direct filtration of surface and groundwaters	Yes	Yes	Yes
Polishing preclarified water	Yes	Yes	Yes
Fe and Mn removal	Yes	Yes	Yes
Arsenic removal with Fe	Yes	Yes	Yes
Seawater pretreatment for RO	Yes	Yes	Yes
Enhanced coagulation	Yes	Yes	Yes
Taste and odour removal	Yes	Yes	Yes
Lime softening	Yes	Yes	Yes
RO pretreatment for recycle	Yes	Yes	Yes
<u>Wastewater Processes</u>			
Filter backwash treatment	Yes	Yes	No
ZenoGem activated sludge	Yes	Yes	No
Other membrane bioreactor	Yes	Yes	No
Cooling water in metalworking	Yes	Yes	No
Pulp & paper wastewater	Yes	Yes	No
Dairy wastewater	Yes	Yes	No
Dinitrophenol wastewater	Yes	Yes	No
Moving bed biofilm reactor	Yes	Yes	No
BNR - nitrogen, phosphorus	Yes	Yes	No
Fruit/winery wastewater	Yes	Yes	No
Bioflocculation	Yes	Yes	No

Soil Treatment	Yes	Yes	No
Perchlorate water/wastewater			