



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**Facultad de Estudios Superiores Zaragoza**



**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE MICROFILTRACIÓN  
PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA  
DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

**TESIS**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTA

**RUT SARAIT VARGAS RAMÍREZ**

DIRECTOR DE TESIS

**DRA. MARÍA TERESA ORTA LEDESMA**

**MÉXICO, D.F. 2010**





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.



**EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
\*ZARAGOZA\*  
JEFATURA DE LA CARRERA DE INGENIERÍA  
QUÍMICA**

**OFICIO: FESZ/JCIQ/007/10**  
**ASUNTO: Asignación de Jurado**

**ALUMNO: VARGAS RAMÍREZ RUT SARAIT**  
**P R E S E N T E**

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

|                   |   |
|-------------------|---|
| <b>PRESIDENTE</b> | <b>I. Q. Gonzalo Rafael Coello García</b> |
| <b>VOCAL</b>      | <b>Dra. María Teresa Orta Ledesma</b>     |
| <b>SECRETARIO</b> | <b>I. Q. Ismael Bautista López</b>        |
| <b>SUPLENTE</b>   | <b>I. Q. Ana Lilia Maldonado Arellano</b> |
| <b>SUPLENTE</b>   | <b>Q. B. P. Dionisio Sánchez Sánchez</b>  |

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**  
**“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”**  
México D. F., a 22 de Abril de 2010

**JEFA DE LA CARRERA**

  
**I. Q. ZULIA GENNY SANDOVAL VILLANUEVA**





## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

*A*

A la máxima casa de estudios UNAM, muy en especial a la **F.E.S. Zaragoza**, porque dentro de ella viví una hermosa etapa de mi vida conociendo personas de gran calidad, ganando, pocos, pero muy buenos amigos, admirando el ejemplo de algunos profesores y a la par de todo esto adquiriendo conocimientos que son de utilidad en mi vida cotidiana y que sin duda son la base de una futura carrera exitosa.

*G*

*R*

*A*

Al Programa de Becas para Estudiantes Indígenas (México Nación Multicultural) porque el apoyo económico brindado llegó justo cuando las opciones se habían agotado, de verdad **muchas gracias a todos** los que conforman el equipo.

*D*

*E*

Al Instituto de Ingeniería por ser formador de tantos egresados que comienzan su carrera profesional en sus instalaciones y asesorados por sus investigadores.

*C*

*I*

A la Dra. Ma. Teresa Orta Ledesma, por la oportunidad de trabajar con usted.

*M*

Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental en especial a la Coordinadora del laboratorio Biol. Natasha Villaseñor Hernández y Biol. Livia Sánchez, gracias por su disposición, apoyo y conocimientos compartidos.

*I*

*E*

Al equipo de PALL Corporation en México, muy en especial a Ing. José Luis Bustos, Q.B.P. Dionisio Sánchez S., Ing. Felipe Pastrana por su total disposición y por la gran cantidad de conocimientos compartidos, todos Uds. son unos expertos en el tema.

*N*

*T*

A mis sinodales I.Q. Ana Lilia Maldonado A., I.Q. Gonzalo R. Coello García, I.Q. Ismael Bautista López, Q.B.P. Dionisio Sánchez S., por el tiempo dedicado al desarrollo y revisión de este trabajo.

*O*

*S*

A mis amigos Iván, Oscar, Sandy, Alberto, Juan Carlos, Gisella, Surisaddai; proyectos diferentes de vida pero con un punto de coincidencia, cada uno, de diferente manera, aportó enseñanzas valiosas a mi vida y me regaló un tesoro invaluable: su amistad y apoyo.



Estoy concluyendo una carrera de ciencia, matemáticas, tecnología; donde todos los acontecimientos tienen un “porque”, una solución “exacta”, un “descubrimiento”. Aún así este trabajo se lo dedico al ser más supremo y majestuoso que yo he podido conocer, a DIOS, a ti que un día me prometiste que llegaría este momento y heme aquí... no podría darle la honra a nadie más.

Con todo mi amor y admiración a Lucy y a Manuelito, mis padres.

A mis hermanos Felipe, José Luis, Jaime, Patricia, Elizabeth y Omar, quisiera tener al menos una de tantas cualidades que cada uno de ustedes tiene.

A mi pequeña mariposita Carmina Ximena, nunca olvides que eres un regalo de Dios para mi vida.

A Juan Carlos; te amo y agradezco tu amor, amistad, comprensión y apoyo. Sigue siendo mi compañero de vida.

*D*

*E*

*D*

*I*

*C*

*A*

*T*

*O*

*R*

*I*

*A*



# EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

## ÍNDICE

| <u>Contenido</u>  | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| ÍNDICE DE TABLAS  | v           |
| ÍNDICE DE FIGURAS   | vi          |
| RESUMEN   | ix          |
| OBJETIVOS   | x           |
| HIPÓTESIS   | xi          |
| INTRODUCCIÓN  | xii         |
| <b>CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES</b>                                | <b>1</b>    |
| 1.1 La problemática del agua en el mundo                      | 2           |
| 1.1.1 El agua en América Latina                               | 4           |
| 1.1.2 El agua en México                                       | 6           |
| 1.1.3 El agua en Ciudad Universitaria                         | 10          |
| <b>CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO</b>                               | <b>17</b>   |
| 2.1 Contaminación del agua                                    | 18          |
| 2.1.1 Fuentes de contaminación                                | 20          |
| 2.2 Aguas Residuales  | 23          |
| 2.3 Tratamiento de aguas residuales                           | 24          |
| 2.3.1 Generalidades   | 24          |
| 2.3.2 Principales procesos de tratamiento de aguas residuales | 27          |
| 2.4 Tecnologías de Filtración                                 | 29          |
| 2.4.1 Generalidades de filtración                             | 29          |
| 2.4.1.1 Mecanismos de la filtración                           | 30          |
| 2.4.1.2 Factores que influyen en la filtración                | 35          |
| 2.4.2 Filtración por Membranas                                | 38          |
| 2.4.2.1 Generalidades de membranas                            | 40          |
| 2.4.2.2 Configuración de membranas                            | 47          |



# EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

|   |     |
|---|-----|
| 2.4.2.3 Configuración de módulo   | 51  |
| 2.5 Microfiltración (MF)  | 55  |
| 2.5.1 Generalidades de la Microfiltración   | 55  |
| 2.5.2 Parámetros de diseño  | 56  |
| 2.5.3 Configuraciones de membranas y módulos  | 59  |
| 2.5.4 Diseño y operación del proceso de Microfiltración   | 61  |
| 2.5.5 Calidad del agua después de la Microfiltración  | 63  |
| <b>CAPÍTULO 3 DESARROLLO DE LA ETAPA EXPERIMENTAL</b>   | 64  |
| 3.1 Procedencia del agua residual   | 65  |
| 3.2 Programa de muestreo  | 66  |
| 3.3 Descripción de las técnicas utilizadas  | 66  |
| 3.4 Metodología   | 74  |
| <b>CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>  | 78  |
| 4.1 Caracterización del efluente secundario antes de la MF  | 80  |
| 4.1.1 Parámetros Físicoquímicos: Sólidos Suspendidos Totales (SST), Turbidez (T)  | 80  |
| 4.1.2 Determinación de Componentes Orgánicos: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> ), Grasas y Aceites (G y A) | 80  |
| 4.1.3 Examen Microbiológico: Coliformes Fecales (CF), Huevos de Helminto (HH)   | 82  |
| 4.2 Caracterización del efluente secundario después de la MF  | 84  |
| 4.2.1 Parámetros Físicoquímicos: SST, T   | 85  |
| 4.2.2 Determinación de Componentes Orgánicos: DBO <sub>5</sub> , G y A  | 85  |
| 4.2.3 Examen Microbiológico: CF, HH   | 87  |
| 4.3 Evaluación del proceso de Microfiltración   | 89  |
| <b>CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>  | 98  |
| 5.1 Conclusiones  | 99  |
| 5.2 Recomendaciones   | 101 |
| <b>BIBLIOGRAFÍA</b>   | 102 |



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

### ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Capítulo 1</b>  | 1  |
| 1.1 Fuentes de abastecimiento de agua para la ZMVM                                   | 9  |
| 1.2 Abastecimiento de agua en el DF  | 9  |
| 1.3 Aportación de los pozos, durante el tercer trimestre del año 2007                | 11 |
| 1.4 Estado actual de las PTARBRAIN   | 16 |
| <b>Capítulo 2</b>  | 17 |
| 2.1 Sustancias tóxicas en productos de uso cotidiano que contaminan el agua          | 22 |
| 2.2 Procesos del tren de tratamiento al agua residual y dispositivos utilizados      | 23 |
| 2.3 Principales procesos biológicos aplicados al tratamiento de las aguas residuales | 28 |
| 2.4 Operaciones de membranas técnicamente relevantes en el tratamiento de aguas      | 42 |
| 2.5 Tabla comparativa de configuraciones: Tubular y Fibra Hueca                      | 60 |
| <b>Capítulo 4</b>  | 78 |
| 4.1 Sólidos Suspendidos Totales  | 79 |
| 4.2 Estadística Descriptiva de SST   | 79 |
| 4.3 Turbidez   | 80 |
| 4.4 Estadística Descriptiva de T   | 80 |
| 4.5 Demanda Bioquímica de Oxígeno  | 80 |
| 4.6 Estadística Descriptiva de DBO <sub>5</sub>                                      | 81 |
| 4.7 Grasas y Aceites   | 82 |
| 4.8 Estadística Descriptiva de G y A   | 82 |
| 4.9 Coliformes Fecales   | 82 |
| 4.10 Estadística Descriptiva de CF   | 83 |
| 4.11 Huevos de Helminto  | 83 |
| 4.12 Estadística Descriptiva de HH   | 83 |
| 4.13 Sólidos Suspendidos Totales   | 84 |
| 4.14 Estadística Descriptiva de SST  | 84 |
| 4.15 Turbidez  | 85 |
| 4.16 Estadística Descriptiva de T  | 85 |
| 4.17 Demanda Bioquímica de Oxígeno   | 85 |
| 4.18 Estadística Descriptiva de DBO <sub>5</sub>                                     | 86 |
| 4.19 Grasas y Aceites  | 87 |
| 4.20 Estadística Descriptiva de G y A  | 87 |
| 4.21 Coliformes Fecales  | 87 |
| 4.22 Huevos de Helminto  | 87 |
| 4.23 Porcentaje de remoción que se obtuvo en el permeado de la membrana de MF        | 94 |
| 4.24 Porcentos de recuperación y tiempo de operación                                 | 97 |



# EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Capítulo 1</b>   | 1  |
| 1.1 Distribución mundial del agua del planeta   | 2  |
| 1.2 Inversión anual para el abastecimiento de aguas residuales  | 5  |
| 1.3 Expansión de la mancha urbana   | 7  |
| 1.4 Contaminación de aguas superficiales  | 8  |
| 1.5 Diagrama de la Planta de Tratamiento de Agua Residual Cerro del Agua (PTARCA)                               | 12 |
| 1.6 Diagrama de la Planta de Tratamiento de Agua Residual Facultad de Ciencias Políticas y Sociales (PTARFCPyS) | 13 |
| 1.7 Diagrama de la Planta de Tratamiento de Agua Residual del Edificio 12 (PTARE12)                             | 14 |
| 1.8 Diagrama de la Planta de Tratamiento de Agua Residual Bio-Reactor Anaerobio Integrado (PTARBRAIN)           | 15 |
| <b>Capítulo 2</b>   | 17 |
| 2.1 Tren de tratamiento que recibe un agua residual   | 24 |
| 2.2 Potencial de retención en los diferentes procesos de filtración de membranas                                | 38 |
| 2.3 Separación por tecnología de membranas  | 40 |
| 2.4 Espectro de la Filtración por Membranas   | 41 |
| 2.5 Principio básico de la Osmosis Inversa (OI)   | 43 |
| 2.6 El proceso de la Nanofiltración (NF)  | 44 |
| 2.7 Retención de la Ultrafiltración (UF)  | 45 |
| 2.8 Retención de la Microfiltración (MF)  | 46 |
| 2.9 Configuración en Espiral  | 52 |
| 2.10 Configuración Tubular  | 53 |
| 2.11 Configuración Fibra Hueca  | 54 |
| 2.12 Acumulación de materiales de una membrana en presencia de flujo cruzado                                    | 58 |
| 2.13 Corte transversal del módulo con membranas de fibra hueca  | 59 |
| 2.14 Modos de operación de microfiltración  | 61 |
| <b>Capítulo 3</b>   | 64 |
| 3.1 Kit básico para SST   | 67 |
| 3.2 Estufa  | 67 |
| 3.3 PASTEL U-V  | 69 |
| 3.4 Equipo de extracción Soxhlet  | 70 |
| 3.5 Rotavapor durante la recuperación de Hexano   | 70 |
| 3.6 Kit básico para CF  | 72 |
| 3.7 Baño maría  | 72 |
| 3.8 Kit básico para HH  | 73 |
| 3.9 Etapa de centrifugación   | 73 |
| 3.10 Conteo, a nivel microscópico, de los HH  | 73 |
| 3.11 Turbidímetro   | 73 |



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

|   |           |
|---|-----------|
| 3.12 Determinación de la TMP                            | 75        |
| 3.13 Diagrama de flujo del módulo de MF                 | 76        |
| <b>Capítulo 4</b>                                       | <b>78</b> |
| 4.1 Comparación del proceso de MF para SST              | 89        |
| 4.2 Comparación del proceso de MF para T                | 90        |
| 4.3 Comparación del proceso de MF para DBO <sub>5</sub> | 91        |
| 4.4 Comparación del proceso de MF para G y A            | 92        |
| 4.5 Comparación del proceso de MF para CF               | 93        |
| 4.6 Comparación del proceso de MF para HH               | 94        |
| 4.7 TMP vs t  | 96        |
| 4.8 TMP vs t  | 96        |



# **EVALUACIÓN DEL PROCESO DE MICROFILTRACIÓN PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**





## **RESUMEN**

El siguiente trabajo tiene como propósito evaluar el proceso de Microfiltración aplicado al efluente de una Planta de Tratamiento de Agua Residual.

El tema de este trabajo de tesis, surge de la necesidad por parte del proyecto PUMAGUA, de mejorar la calidad del agua tratada que se reusa en riego de áreas verdes de ciudad universitaria; con la intención de integrar al tren de tratamiento de la planta de Cerro del Agua un módulo de Microfiltración por membranas. Actualmente la PTARCA no esta cumpliendo con los límites que exige la NOM-003-SEMARNAT-1997, siendo la mayor preocupación los alumnos que están en contacto con las áreas verdes que son regadas con esta agua tratada.

Los parámetros a evaluar son: Demanda Bioquímica de Oxígeno, Sólidos Suspendidos Totales, Grasas y Aceites, Coliformes Fecales y Huevos de Helminto. La elección de estos parámetros se hizo de acuerdo a lo establecido en la NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público.

El desarrollo experimental se pudo llevar a cabo gracias a la donación de un módulo XUNP-003 N/S 01220306 de Microfiltración escala laboratorio, que realizó el grupo SIMEX y la compañía PALL Corporation en México. Con el cual se pudieron realizar las pruebas necesarias.

La investigación bibliográfica realizada al comienzo y durante el desarrollo de este trabajo, indica que la Microfiltración es una alternativa bastante recomendada para tratamientos terciarios avanzados, el cual pretende dársele al agua de la planta de CA, ya que el efluente obtenido de una Microfiltración mejora notablemente la calidad del agua.

La calidad del agua permeada por filtración en membranas de fibra hueca XUNP-003 mejoró su calidad con respecto al efluente biológico sin filtrar. Particularmente se observaron reducciones en el contenido de sólidos suspendidos del 92%, turbiedad del 98%, DBO<sub>5</sub> del 60%, G y A del 72%, CF y HH del 100%. Deduciéndose que gran parte de la materia presente en el efluente biológico puede ser removida mediante un simple proceso de Microfiltración.

La membrana se recuperó en un promedio del 99% después de ser sometida a limpiezas con reactivos químicos, como son el NaOCl, NaOH, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y el C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub>.

Los resultados del estudio sugieren que la membrana de Microfiltración puede ser la opción recomendable para mejorar la calidad del agua residual de la planta de tratamiento de Cerro del Agua (PTARCA).



## **OBJETIVOS**

### **1. Objetivo general**

Someter a una evaluación el efluente secundario del tratamiento de una planta de aguas residuales, el cual es filtrado a través de una membrana de Microfiltración a nivel laboratorio; realizándole los análisis físicos, químicos y microbiológicos que permitan obtener resultados reales del funcionamiento del equipo de Microfiltración el cual, en un futuro, se espera pueda ser instalado en el proceso de tratamiento de aguas residuales en la planta de Cerro del Agua de Ciudad Universitaria a fin de mejorar la calidad del agua y tener un mayor aprovechamiento en la reutilización de dicho líquido.

### **2. Objetivos particulares**

- ✓ Caracterizar el agua cruda y el agua tratada de la PTARCA, realizando el análisis de muestras siguiendo un programa de monitoreo.
- ✓ Evaluar la calidad del agua residual permeada por la membrana de microfiltración, mediante la realización de pruebas físicas, químicas y microbiológicas.
- ✓ Evaluar la eficiencia de remoción de la membrana de microfiltración a nivel laboratorio.



## **HIPOTESIS DE TRABAJO**

Los resultados de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos que se le realicen al agua tratada, nos permitirán conocer la calidad de ésta, antes y después de pasar por el proceso de Microfiltración, esto con la finalidad de conocer su funcionamiento y evaluar dicho proceso para así poder determinar el impacto que tiene en el tratamiento de aguas residuales.



## INTRODUCCIÓN

Al inaugurar el encuentro celebrado en Estocolmo del 18 al 22 de agosto, en la “Semana Mundial del Agua”, el profesor británico John Anthony Allan, ganador del Premio del Agua de Estocolmo 2008, sostuvo ***“durante los últimos 25 años tuvimos una forma de vida muy lujosa, sin preocuparnos para nada del medio ambiente. Ahora hay que cambiar la forma en la que consumimos, compramos y comemos”***. [www.elnuevodiario.com](http://www.elnuevodiario.com)

De acuerdo al Banco Mundial, más de 300 millones de habitantes de ciudades en Latinoamérica producen 225,000 toneladas de residuos sólidos cada día. Sin embargo, menos del 5% de las aguas de alcantarillado de las ciudades reciben tratamiento.

En Latinoamérica, muchas corrientes son receptoras de descargas directas de residuos domésticos e industriales. Con la ausencia de tratamiento, las aguas negras son por lo general vertidas en aguas superficiales, creando un riesgo obvio para la salud humana, la ecología y los animales.

De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud, sólo en Brasil, 20 niños mueren cada día debido a la falta de tratamiento de aguas negras. Este es un problema que está directamente relacionado con la presencia de enfermedades infecciosas tales como el cólera, hepatitis, disentería, gastroenteritis y muchas otras.

Los requisitos ambientales cada vez más estrictos en los países desarrollados han resultado en la transferencia de residuos peligrosos (o la fabricación que los involucra) a otros países. Se reporta que la mayor cantidad de residuos peligrosos va de los Estados Unidos hacia México. Los residuos de fabricantes locales, al igual que los residuos importados, idealmente deberían ser controlados en su fuente de producción. Grandes ciudades como la Ciudad de México y São Paulo-Santos se encuentran a menudo altamente contaminadas y carecen de infraestructura de saneamiento para tratar los residuos peligrosos.

La prevención de la contaminación es mucho menos costosa que tratar de limpiar un suministro de agua contaminada o rectificar un brote de enfermedades contagiosas.

Según un estudio patrocinado por el Banco Mundial en 1997, la construcción de una planta convencional para el tratamiento secundario de aguas residuales para una población de 1 millón de habitantes requiere una inversión capital de aproximadamente US\$100 millones, sin mencionar los costos sustanciales de operación y mantenimiento para su operación continua. Aunque respecto a esto una evaluación revela que de las plantas de tratamiento de aguas de alcantarillado en México, solamente el 5% de las plantas existentes están siendo operadas de manera satisfactoria. Sin embargo, los costos económicos asociados con un brote de enfermedad indican que la inversión inicial de capital valdría mucho la pena.



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

---

Según una de las estimaciones más aceptadas, poco más del 97% del volumen de agua existente en nuestro planeta es agua salada y está contenida en océanos y mares; mientras que apenas algo menos del 3% es agua dulce o de baja salinidad.

Del volumen total de agua dulce, estimado en unos 38 millones de kilómetros cúbicos, poco más del 75% está concentrado en casquetes polares, nieves eternas y glaciares; el 21% está almacenado en el subsuelo, y el 4% restante corresponde a los cuerpos y cursos de agua superficial (lagos y ríos).

El agua dulce almacenada en el subsuelo es muy superior a la existente en las corrientes superficiales; pero sólo es aprovechable en parte, debido a limitaciones físicas y económicas. Gran parte del agua dulce aprovechable transita y se almacena en los primeros 1,000 m a partir de la superficie del terreno, donde se alojan los acuíferos de mayor permeabilidad, de renovación más activa, económicamente accesibles y con agua de buena calidad (CONAGUA, 2007).

Este problema al cual nos enfrentamos en la actualidad, es un tema que cada día ocupa más la atención de científicos, técnicos, políticos y en general, de muchos de los habitantes del planeta.

Tal es el caso del Consejo Técnico de la Investigación Científica de la UNAM que ha considerado imperativo adoptar medidas concretas para lograr el uso y manejo eficiente del agua en todas sus instalaciones.

Fue por ello, que el **Instituto de Ingeniería** se dio a la tarea de plantear los presentes Términos de Referencia para poner en marcha el "**Programa de Manejo, Uso y Reuso del Agua en la UNAM**".

La escasez de este vital líquido obliga a no quitar el dedo del renglón y reiterar nuevamente una llamada a la moderación de consumo por parte de la población a nivel mundial, ya que sin la colaboración de la población en general cualquier esfuerzo de instituciones encargadas de esta problemática será insuficiente.



# CAPITULO 1

## ANTECEDENTES





## 1.1 LA PROBLEMÁTICA DEL AGUA EN EL MUNDO

Del total del Agua del Mundo: el 3% es agua dulce y el 97 % se encuentra en océanos y mares. De ese 3%, el 79% está en la cresta de los glaciares, el 20% se encuentra en aguas subterráneas el 1% en las superficies accesibles. De ese 1%, el 52% se encuentra en lagos, 38% en la humedad del suelo, el 8% es agua contenida en la atmósfera, el 1% es agua que está en los organismos vivos y el 1% en ríos y arroyos (figura 1.1).

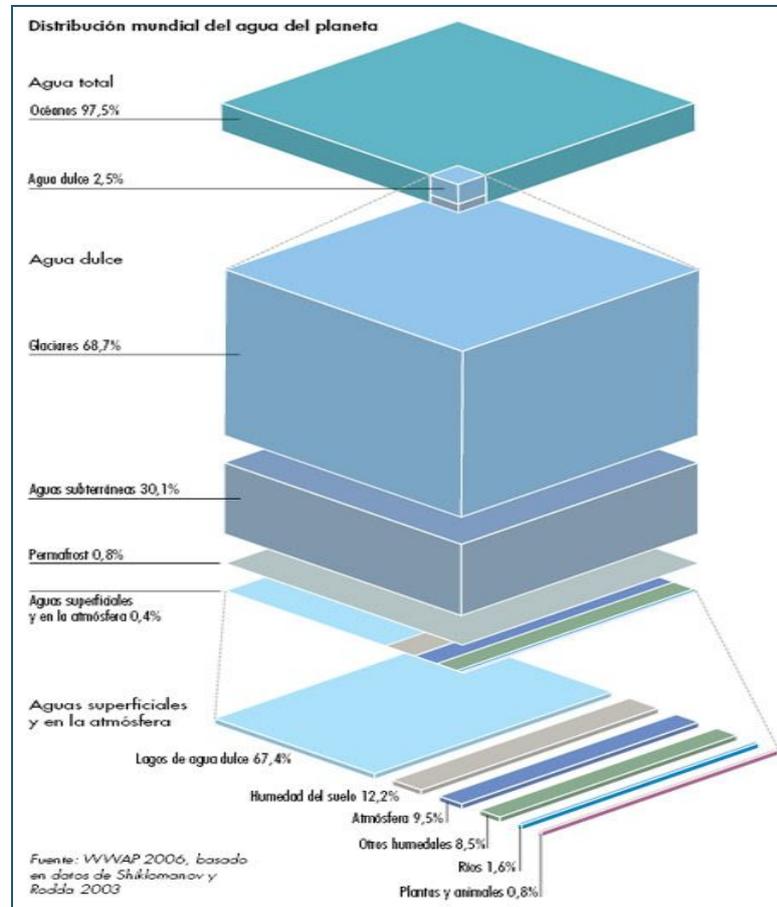


Fig. 1.1 Distribución mundial del agua del planeta  
Fuente: www.WWAP, 2006.

El agua juega un papel central, tanto directa como indirectamente, en el desarrollo, crecimiento y supervivencia de los seres vivos; es uno de los principales elementos que existe en el medio externo donde se desenvuelve la vida de los seres humanos. Sin ella la vida sería imposible, no solo para el hombre, sino también en todos los animales y las plantas. Es de hacer notar que el 60% del peso de nuestro cuerpo corresponde al agua que interviene en la formación de los tejidos. Todas nuestras células tienen un alto porcentaje de agua, llegando a un 80% en la composición de la sangre, y gracias al agua es posible la mayor parte de los intercambios nutritivos.



## **EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

---

Solo una ínfima parte del agua presente en el planeta es apta y accesible para su potabilización. En la actualidad alrededor de 1500 millones de personas en el mundo carecen de agua potable y aproximadamente 10.000 niños mueren cada día por la contaminación de las aguas. Para el año 2017, dice la ONU, cerca de 70% de la población global tendrá problemas para acceder a agua dulce. Y para 2025, aproximadamente 40% de la población vivirá en regiones donde escasea el líquido (bbcmundo.com).

Los pronósticos para el futuro no son muy tranquilizadores, ya que ciudades densamente pobladas como México, San Pablo, El Cairo, Los Ángeles por nombrar solo algunas, tendrán serias dificultades con las necesidades de abastecimiento de agua para la población.

Si a esto le sumamos una industrialización sin control, el crecimiento demográfico y el uso doméstico indiscriminado, así como una creciente contaminación y excesivo derroche, la crisis hídrica se agrava cada día.



### **1.1.1. EL AGUA EN AMÉRICA LATINA**

Aproximadamente el 35 % del agua potable del mundo se encuentra en América Latina. Solamente Brasil alberga el 20% del recurso hídrico mundial en la cuenca del Amazonas, mientras que Sudamérica alberga cuatro de los 25 ríos más caudalosos del mundo: Amazonas, Paraná, Orinoco y Magdalena. A esto se agrega la existencia de grandes lagos como el Maracaibo en Venezuela, el Lago Cocibolca en Nicaragua, el Titicaca compartido por Perú y Bolivia, el Poopó en Bolivia, y el Buenos Aires compartido por Chile y Argentina. Con esta riqueza hídrica, la disponibilidad de agua per cápita en América Latina debería ser algo menor a los 3,100 m<sup>3</sup> por persona al año, siendo esta superior a la de cualquier otra región de la tierra ([www.agua.org.mx](http://www.agua.org.mx)).

Independientemente del cambio climático, la presión sobre los recursos hídricos tiende a incrementarse por el aumento en la demanda humana de poblaciones en crecimiento y por la actividad económica. Los cálculos de la disponibilidad de agua potable y los impactos del cambio climático en México y Sudamérica durante el próximo cuarto de siglo indican que antes de 2025 cerca del 70 % de la población vivirá en regiones con bajo abastecimiento de agua (*Climate change in Latin America, 2004*).

El agua, bien de la naturaleza, origen de la vida y fundamento de la supervivencia es, en América Latina, una región que posee recursos hídricos abundantes, un recurso natural escaso, limitado, no renovable, privatizado y politizado, un servicio mal distribuido, factor adicional de inequidad; problemas que hacen del agua un obstáculo para el crecimiento y el desarrollo de cualquier región.

#### **LA PROBLEMÁTICA**

De 1950 a 1995, la población de Latinoamérica aumentó de 179 millones a 481 millones de habitantes, lo cual correspondió con una carga mayor sobre la infraestructura existente y un aumento en la producción de residuos domésticos. La tendencia de aumento en la población seguirá, de manera increíble, durante las próximas décadas, al igual que las presiones sobre la infraestructura.

De acuerdo al Banco Mundial, más de 300 millones de habitantes de ciudades en Latinoamérica producen 225,000 toneladas de residuos sólidos cada día. Sin embargo, menos del 5% de las aguas de alcantarillado de las ciudades reciben tratamiento. Con la ausencia de tratamiento, las aguas negras son por lo general vertidas en aguas superficiales, creando un riesgo obvio para la salud humana, la ecología y los animales ([www.esd.worldbank.org](http://www.esd.worldbank.org)).





## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Es difícil generalizar acerca de cualquier condición en Latinoamérica, debido a la diversidad económica, social y ambiental de la región, tanto entre país y país como dentro de una misma nación. Sin embargo las grandes ciudades como la Ciudad de México y São Paulo-Santos se encuentran a menudo altamente contaminadas y carecen de infraestructura de saneamiento para tratar los residuos peligrosos.

Para mejorar las condiciones de salud y saneamiento en las regiones en vías de desarrollo, se necesitan plantas de tratamiento eficientes para el manejo de agua potable y aguas residuales. Sin embargo, dichos esfuerzos requieren inversiones sustanciales de capital. Se necesitan miles de millones de dólares para servir a la región latinoamericana. Solamente en México, se estima una inversión de US\$2,900 millones para proporcionar agua limpia y servicios de saneamiento a los habitantes urbanos.

En 1995, el Banco Mundial estimó que se requeriría una inversión de US\$12,000 millones anuales durante 10 años para elevar los estándares de abastecimiento de agua y de aguas residuales a niveles razonables. Aproximadamente US\$7,000 millones sería para aguas residuales, con US\$4,400 millones para la recolección de aguas de alcantarillado, US\$1,200 millones para tratamiento, US\$1,200 millones para rehabilitación de las instalaciones existentes, y el resto para el saneamiento rural. Estas estimaciones de costos estuvieron basadas en una meta de tratamiento de aguas residuales para 60% de la población con sistema de alcantarillado público (Reynolds, 2002) (figura 1.2).

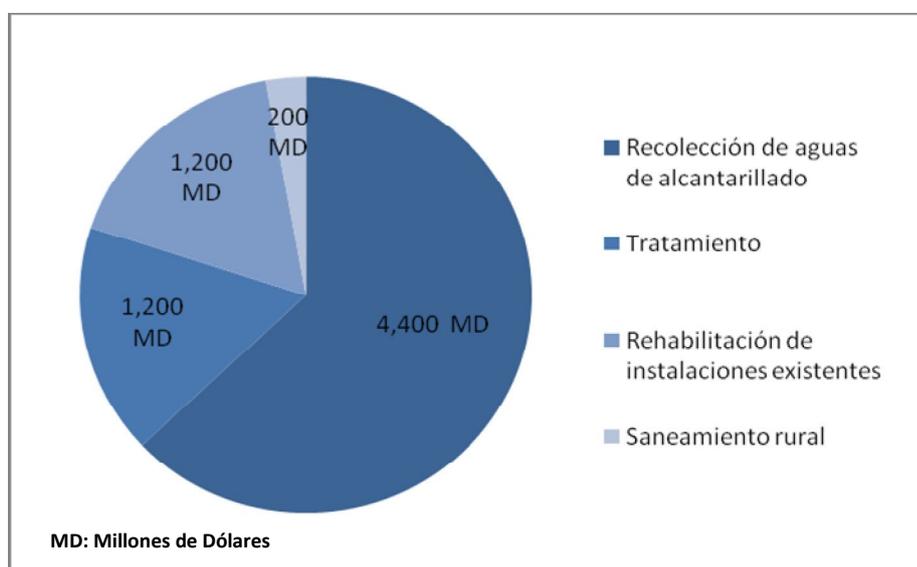


Fig. 1.2 Inversión anual para el abastecimiento de aguas residuales



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

### 1.1.2. EL AGUA EN MÉXICO

De acuerdo con el conteo de 2005, la población de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) llegó a 19.2 millones y la del DF a 8.7 millones. La ZMVM de acuerdo con el INEGI a partir de 2006, incluye a las 16 delegaciones del DF, 59 municipios conurbados del Estado de México y 1 municipio del Estado de Hidalgo (INEGI, 2006).

De acuerdo con esta definición, la ZMVM se sitúa dentro del sistema formado por las siguientes coordenadas geográficas: al Norte, 20° 03', al Sur, 18° 56'; de latitud Norte al Este 98° 36', al Oeste 99° 40' de longitud Oeste. Abarca una superficie que representa el 0.39% del total nacional. Gran parte de la ZMVM presenta alturas que van desde los 2,240 metros sobre el nivel de mar (msnm) en sus partes planas, hasta sus elevaciones principales, el Cerro Telapón con 4,030 msnm y el Volcán Ajusco con 3,930 msnm.

#### LA URBANIZACIÓN DE LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO (ZMVM)

La zona metropolitana es producto del proceso de urbanización del Distrito Federal sobre su periferia, que fue absorbiendo pueblos, ciudades pequeñas y ámbitos rurales, ya sea como zonas predominantemente habitacionales o como centros de actividad económica entre los cuales la población se desplaza de manera cotidiana, conformando un conjunto de unidades político-administrativas contiguas, integradas social y económicamente y determinando una nueva funcionalidad espacial (PNUMA, SMA, GEO, 2003).

Los procesos de urbanización del Distrito Federal, aunados al crecimiento de la población de los municipios conurbados y a la migración configura la compleja dinámica demográfica. La tasa de crecimiento poblacional depende del crecimiento natural y de la migración. Es así que durante décadas el crecimiento económico, comercial y cultural de la capital atrajo a la población de otras zonas de la república. El punto culminante de la migración de habitantes rurales y de otras áreas urbanas al Distrito Federal fue en 1970, cuando el flujo de emigrantes alcanzo el 38% del total de movimientos interestatales de todo el país. Entre 1940 y 1970 la población del DF se quintuplicó, pasando de 1.8 millones a 8.6 millones de habitantes (Negrete, 2000).

De esta forma, la población del Distrito Federal era de 3 millones de habitantes y la de la zona metropolitana de 3.5 millones. Para 1980 ambas poblaciones crecieron hasta llegar a 8.8 y a 13 millones de habitantes respectivamente. Para el 2000, la ZMVM tenía una población total de 18.4 millones de habitantes y el Distrito Federal contaba sólo con 8.6 millones. De acuerdo con el conteo de 2005, la población de la ZMVM llegó a 19.2 millones y la del DF llegó a 8.7 millones (INEGI, 2000a y 2005a).

La tasa de crecimiento poblacional del Distrito Federal paso de 0.4% anual en el periodo 1990–2000 a 0.2% en el periodo 2000–2005. Mientras tanto el Estado de México paso de 2.9% a 1.2% para los mismos periodos.



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

En relación con la expansión de la mancha urbana, en 1950 la ciudad cubría un área de alrededor de 206 Km<sup>2</sup>, en 1970, creció a 708 Km<sup>2</sup> y aproximadamente 1,574 Km<sup>2</sup> en el 2000, es decir creció 6 veces en el lapso de 50 años. En las últimas décadas el ritmo de expansión urbana declino. En los municipios conurbados del Estado de México la mancha urbana creció entre 1950 y 1970 a una tasa de 17% promedio anual, pero entre 1990 y 2000 dicha tasa bajo a 2.9% (Sheinbaum, 2008) (figura 1.3).

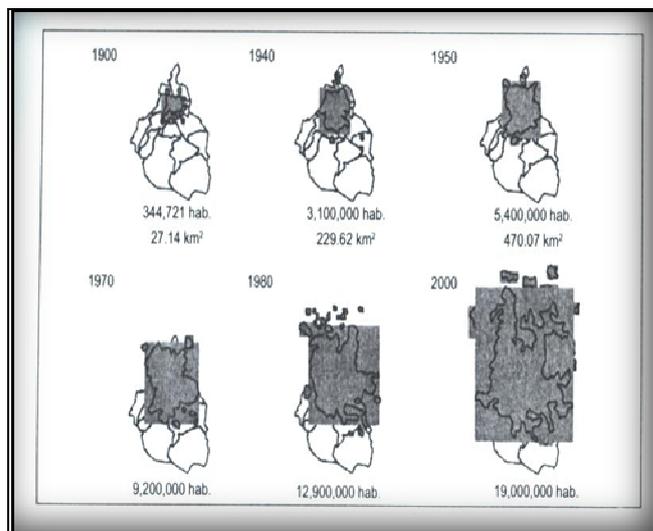


Fig. 1.3 Expansión de la mancha urbana. Fuente: SMA (2006a).

El aumento poblacional en las zonas urbanas representa problemas ambientales importantes, sobre todo si estos se dan en un patrón de crecimiento horizontal y de manera desordenada. Entre estos problemas destacan los derivados del aumento de la demanda de transporte y, en particular, el aumento en la distancia de los viajes; mayor crecimiento de la red de agua potable y alcantarillado y cambios de uso de suelo agrícola a urbano.

### LA CONTAMINACIÓN DE LAS FUENTES

Muchos de los principales lagos y cuencas de ríos desde América del Norte hasta América del Sur se encuentran bajo una gran presión debido al incremento en la población y décadas de desarrollo agrícola e industrial; entre los que se encuentran los Grandes Lagos en Estados Unidos y el Lago de Chapala en México.

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), realizó un estudio enfocado a desarrollar un mapa de la calidad del vital líquido a nivel nacional, el cual revela que la mayoría de los ríos, arroyos, lagos, lagunas y acuíferos reciben descargas de agua residuales sin tratamiento; ya sea de tipo doméstico, agrícola, industrial o pecuario; y que 15 de las 320 cuencas existentes padecen grados variables de contaminación, por lo que requieren atención prioritaria. Entre esas cuencas figuran: Pánuco, Lerma, Coatzacoalcos, la del Valle de México y Bajo Río Bravo.





## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

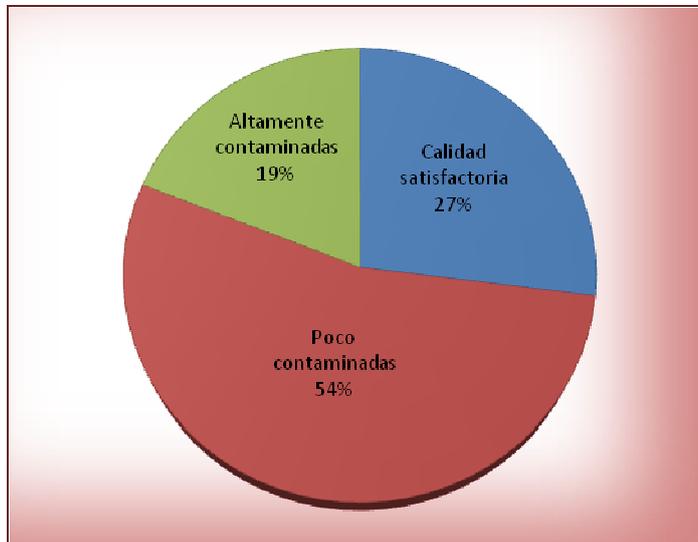


Fig. 1.4 Contaminación de aguas superficiales

La CONAGUA refiere que a partir de la información estudiada en 478 cuerpos receptores monitoreados, las aguas superficiales presentan calidad satisfactoria en 27 por ciento de los casos, lo que posibilita su uso en prácticamente cualquier actividad. A su vez, 54 por ciento están restringidas a determinadas actividades porque se encuentran poco contaminadas, y 19 por ciento de las aguas superficiales no pueden ser usadas ya que tienen alta contaminación (figura 1.4), (CONAGUA, 2006b).

En particular, el informe indica que 7 por ciento de los cuerpos de agua muestran excelente calidad y son aptos para cualquier uso; empero, advierte que para consumo humano siempre se requerirá su potabilización a fin de asegurar que esté libre de bacterias. Aunado a ello, es preocupante el rezago que se tiene en el país en materia de tratamiento de aguas residuales, pues de 200 m<sup>3</sup>/s, que descargan los municipios, sólo se trata un 25% (48.5 m<sup>3</sup>/s.), a pesar de contar con una capacidad instalada para 78 m<sup>3</sup>/s (CONAGUA, 2006b).

### ABASTECIMIENTO DE AGUA EN EL VALLE DE MÉXICO

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (2006b), la región del Valle de México comprende una superficie física de 9 674 Km<sup>2</sup> y esta delimitada por las 16 delegaciones del DF, 49 municipios del Estado de México, 15 de Hidalgo y 4 de Tlaxcala. Se estima que para toda la región se utilizan cada año 92.6 m<sup>3</sup>/s. Esta es la llamada región hidráulica XIII de la Comisión Nacional del Agua.

Al sistema de distribución de la ZMVM ingresan alrededor de 64 m<sup>3</sup>/s de agua, de los cuales aproximadamente 35 m<sup>3</sup>/s son para el DF y el resto, 29 m<sup>3</sup>/s, para los municipios conurbados del Estado de México. El 70% de este suministro proviene de fuentes subterráneas (62% de la propia cuenca y 8% restante de la cuenca de Lerma); 24% de fuentes superficiales y 6% restante de agua de reuso. La cuenca del Cutzamala suministra en promedio 14.4 m<sup>3</sup>/s de agua superficial y la cuenca de Lerma suministra en promedio 5.4 m<sup>3</sup>/s de agua subterránea (tabla 1.1).



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

**Tabla 1.1** Fuentes de abastecimiento de agua para la ZMVM

|                                      | m <sup>3</sup> /s |
|--------------------------------------|-------------------|
| Fuentes subterráneas (propia cuenca) | 41.7              |
| Fuentes subterráneas (Lerma)         | 5.4               |
| Manantiales y Ríos                   | 1.7               |
| Cutzamala                            | 14.5              |
| Aguas de reuso                       | 3.7               |
| TOTAL                                | 67.3              |

*Fuente: CONAGUA, 2006.*

Del total del suministro, 18.8 m<sup>3</sup>/s son para agricultura de riego, de los cuales 41% proviene de agua subterránea, 26% de fuentes superficiales y 33% de aguas de reuso, utilizadas principalmente en el distrito de riego del Estado de México. Las industrias del Valle de México emplean 5.6 m<sup>3</sup>/s, de los cuales 70% proviene de aguas subterráneas, 13% de fuentes superficiales y 17% restante de agua de reuso. El resto del consumo es para servicio domestico, comercial y publico (CONAGUA, 2006b).

El Distrito Federal tiene una disponibilidad de agua de 35 m<sup>3</sup>/s, de los cuales, el sistema Lerma suministra entre 4 y 5.4 m<sup>3</sup>/s, dependiendo de la época del año, ya que durante la época de secas cerca de 1m<sup>3</sup>/s se entrega a los agricultores de la zona. Del sistema Cutzamala se obtienen entre 9 y 10 m<sup>3</sup>/s. El metro cúbico adicional de Cutzamala se suministra, dependiendo del caudal de este sistema superficial en la época de secas, para sustituir la disminución del sistema Lerma. Alrededor de 0.8 m<sup>3</sup>/s provienen de ríos y manantiales superficiales y entre 18 y 19.8 m<sup>3</sup>/s proviene de la explotación de aguas subterráneas. La diferencia es producto de la disminución de algunos pozos que llegaron al final de su vida útil o que requieren mantenimiento (tabla 1.2).

**Tabla 1.2** Abastecimiento de agua en el DF

|                      | m <sup>3</sup> /s |
|----------------------|-------------------|
| Fuentes subterráneas | 18 a 19.8         |
| Manantiales y ríos   | 0.8               |
| Lerma                | 4 a 5.4           |
| Cutzamala            | 9 a 10            |
| TOTAL                | 33 a 35           |

*Fuente: SACM, 2005.*



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

### 1.1.3. EL AGUA EN CIUDAD UNIVERSITARIA

El Campus Universitario de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) se localiza en la parte suroeste de la Zona Metropolitana del Valle de México (zona del Pedregal en el D.F.) a una altura de 2278 m sobre el nivel del mar, cuenta con una extensión de 740 hectáreas y 270 hectáreas de construcción en 360 edificios, hasta el año 2007.

El abastecimiento de agua potable en el Campus Universitario depende, en su totalidad, de la extracción del acuífero del Valle de México, del cual se obtiene un gasto de 163 L/s. En el Campus se generan 112 L/s. de aguas residuales, de los cuales, aproximadamente el 36 % recibe tratamiento (Dirección General de Obras y Conservación del Campus Universitario, 2008).

#### SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE

El abastecimiento de agua potable a la Ciudad Universitaria depende básicamente de 3 pozos profundos:

**El pozo No. 1** se localiza en la Facultad de Química. Tiene una profundidad de 132 metros, la potencia de su bomba es de 85 HP y proporciona un gasto de 31 L/s. Su antigüedad data de 1952.

**El pozo No. 2** se localiza en el interior de la explanada de la ex planta incineradora de basura. Tiene una profundidad de 193 metros y la potencia de su bomba es de 200 HP, proporcionando un gasto de 91 L/s. Su antigüedad data de los años 60's.

**El pozo No. 3** está ubicado en el Vivero Alto. Tiene una profundidad de 157 metros y la potencia de su bomba es de 150 HP, proporcionando un gasto de 45 L/s. Su antigüedad también es de los años 60's. Pero, en 1983 se tuvo que reubicar (Dirección General de Obras y Conservación del Campus Universitario, 2008).

#### POTABILIZACIÓN

Cada pozo cuenta con un equipo para potabilizar el agua a base de cloro gas, excepto el pozo de la Facultad de Química, que es a base de hipoclorito de sodio.

#### CONSUMO DE AGUA

El requerimiento de agua por parte de la Ciudad Universitaria es variable. Dependiendo de la época del año, el gasto que se suministra va desde 80 L/s durante la temporada de lluvias, hasta 180 L/s durante la época de estiaje, mostrándose una tendencia de incremento, de acuerdo con el crecimiento de la población universitaria.



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

**Tabla 1.3** Aportación de los pozos, durante el tercer trimestre del año 2007

| POZO                 | JULIO                  | AGOSTO                 | SEPTIEMBRE             |
|----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| No. 1                | 44,769 m <sup>3</sup>  | 80,567 m <sup>3</sup>  | 64,455 m <sup>3</sup>  |
| No. 2                | 39,745 m <sup>3</sup>  | 132,990 m <sup>3</sup> | 50,501 m <sup>3</sup>  |
| No. 3                | 43,014 m <sup>3</sup>  | 132,575 m <sup>3</sup> | 51,499 m <sup>3</sup>  |
| <b>TOTAL MENSUAL</b> | 127,438 m <sup>3</sup> | 346,132 m <sup>3</sup> | 166,455 m <sup>3</sup> |

*Fuente: Dirección General de Obras y Conservación del Campus Universitario, 2008.*

### ALMACENAMIENTO

El almacenamiento del agua potable proveniente de la extracción de los pozos profundos se efectúa en los sitios siguientes:

**Tanque Bajo.-** Es la estación de bombeo localizada al sur del Estadio Olímpico Universitario, donde se almacena el agua extraída, principalmente, de los pozos Nos. 1 y 2. Cuenta con una capacidad de 2,000 m<sup>3</sup>.

**Tanque Alto.-** Se ubica al lado suroeste del Estadio Olímpico Universitario. Tiene una capacidad de almacenamiento de 4,000 m<sup>3</sup>. Este tanque tiene a su vez la función de regulación del sistema de distribución.

**Tanques del Vivero Alto.-** Se encuentran ubicados en el extremo suroeste de la Ciudad Universitaria, en la colindancia con el CCH Sur. Tienen una capacidad global de almacenamiento de 6,000 m<sup>3</sup> (Dirección General de Obras y Conservación del Campus Universitario, 2008).

### DISTRIBUCIÓN

La red general de distribución de agua potable tiene una longitud aproximada de 50 km, en diámetros que van de 12 a 4 pulgadas en los circuitos primarios. Tiene una antigüedad promedio de 52 años en las tuberías principales.

La tubería es de diferentes materiales, la mayor parte es de acero al carbón, teniéndose también de PVC, asbesto-cemento y extrupack.

### EL REUSO DEL AGUA EN CU

Ciudad Universitaria cuenta con 3 plantas, principales, de tratamiento de agua residual, y con 26 de tipo BRAIN. A continuación se hace mención de cada una de ellas incluida una pequeña descripción de las mismas y la cantidad de flujo que manejan.



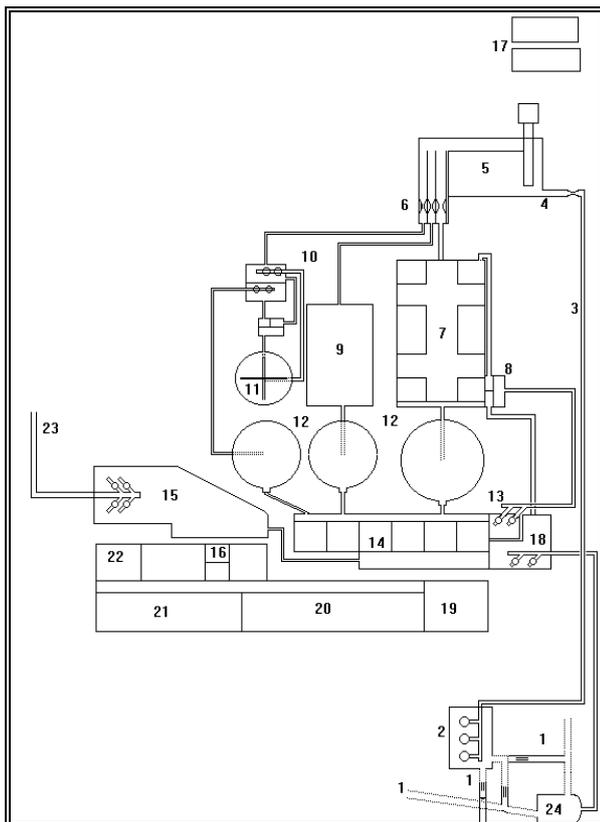
## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

### PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE CERRO DEL AGUA (PTARCA).

Esta Planta de Tratamiento está ubicada en la parte más baja de la Ciudad Universitaria, al noroeste del *campus*, en la esquina que forman la avenida Cerro del Agua y el Circuito Escolar, frente a la Facultad de Medicina y abastece de agua residual tratada a doce cisternas que están distribuidas en el *campus* universitario.

#### CAPACIDAD

La planta fue diseñada para tratar **40 L/s** ( $3,456 \text{ m}^3/\text{día}$ ) provenientes de diversas zonas del *campus* universitario, las cuales llegan a través de dos colectores, denominados como "Zona Antigua" y "Zona de Institutos", posteriormente se conectó un tercer colector proveniente de la colonia Copilco el Alto, denominado con el mismo nombre. Actualmente, del caudal original de éste último, solo se recibe el 10 % (Dirección General de Obras y Conservación del Campus Universitario, 2008) (figura 1.5).



1. Colectores (3)
2. Cárcamo de bombeo de agua cruda
3. Tubería de alimentación
4. Canal de entrada
5. Tanque desarenador
6. Medidores Parshall (3)
7. Tanque de aeración
8. Caja partidora
9. Discos biológicos rotatorios
10. Cárcamo de bombeo
11. Filtro biológico
12. Sedimentadores secundarios (3)
13. Cárcamo de lodos
14. Filtros de arena (6)
15. Tanque de contacto de Cl (2)
16. Dosificador de cloro
17. Tanque de gas cloro
18. Cárcamo de aguas de lavado y pluviales
19. Cuarto de control
20. Laboratorios
21. Oficinas
22. Subestación eléctrica
23. Tubería de alimentación a cisternas
24. Drenaje municipal

Fig. 1.5 Diagrama de la PTARCA





## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

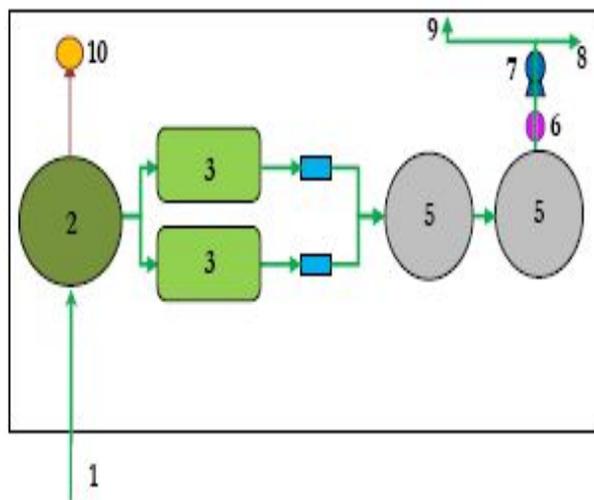
### PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL EDIFICIO 12 (PTARE12).

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Edificio 12 se ubica dentro de las instalaciones del Instituto de Ingeniería del campus universitario, entre el edificio 12 y el edificio 18 del mismo.

Esta planta opera al 50% de su capacidad de operación y la calidad de agua que produce ha sido evaluada para determinar su cumplimiento con la norma correspondiente. Actualmente no se ha implementado el reuso al agua residual tratada y ésta es enviada a la red del drenaje (García, 2009).

#### CAPACIDAD

Esta planta de tratamiento es de tipo paquete, fue construida en 2007 y se diseñó para tratar 0.05 L/s (3 m<sup>3</sup>/d), provenientes de los edificios 12 y 18 del Instituto de Ingeniería (Dirección General de Obras y Conservación del Campus Universitario, 2008) (figura 1.7).



1. Influyente
2. Fosa séptica
3. Tanque de lodos activados (2)
4. Cloradores (2)
5. Tanques de almacenamiento (2)
6. Filtro de arena
7. Bomba
8. A drenaje
9. A edificio 12
10. Tratamiento de olores

Fig. 1.7 Diagrama de la PTARE12



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

### PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL TIPO BIO-REACTOR ANAEROBIO INTEGRADO (PTARBRAIN).

Una planta BRAIN (Bio-Reactor Anaerobio Integrado) es una planta de tratamiento prefabricada (de tipo paquete) para saneamiento y reuso de aguas residuales.

Este tipo de planta es idónea para regenerar las aguas residuales de los núcleos habitacionales localizados en sectores urbanos y zonas rurales que carecen de la infraestructura de drenaje, como lo es el Campus Universitario debido al tipo de terreno, sus características geológicas (pedregal de roca basáltica), hacen muy difícil y costosa la introducción de redes de drenaje.

Su instalación es expedita, no emplea equipo y funciona con microorganismos que se desarrollan en forma natural dentro del reactor, de tal suerte que no requiere de insumos, lo cual simplifica su operación y reduce su mantenimiento a la extracción temporal de los lodos, mismos que se digieren plenamente y que son fácilmente acondicionables para su disposición final, acorde con lo que establecen las normas ecológicas (Tecno adecuación ambiental, 1996).

Estas plantas fueron instaladas y puestas en operación en el primer semestre de 1997, actualmente, de las 26 plantas BRAIN que se instalaron, solo se encuentran en operación 19 de ellas, las 7 plantas restantes se encuentran fuera de servicio debido a la ampliación de la red de drenaje de Ciudad Universitaria o a la modificación del terreno (tabla 1.4) (Dirección General de Obras y Conservación del Campus Universitario, 2008) (figura 1.8).

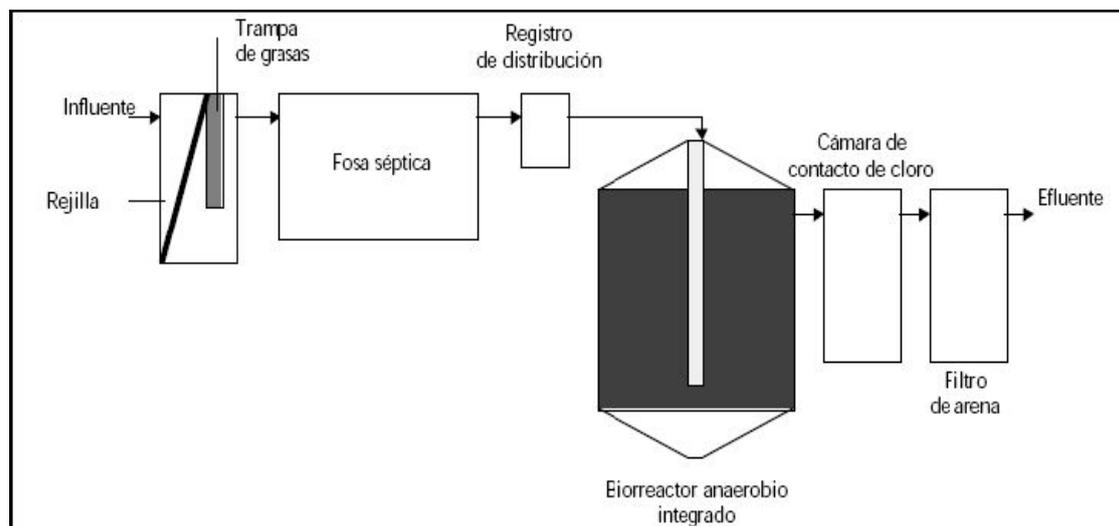


Fig. 1.8 Diagrama de la PTARBRAIN



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Tabla 1.4 Estado actual de las PTARBRAIN

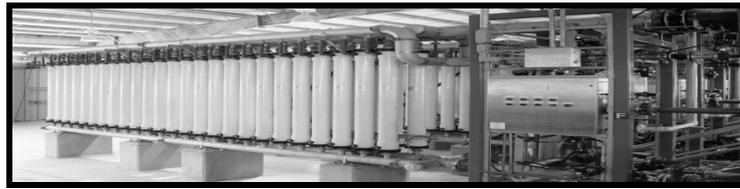
| No. | Ubicación de la planta                                | Capacidad (m <sup>3</sup> /d) | Estado actual     |
|-----|---|-------------------------------|-------------------|
| 1   | Registro aspirantes (oficinas)                        | 5                             | Funcionando       |
| 2   | Registro aspirantes (publico)                         | 5                             | Funcionando       |
| 3   | Caseta vigilancia av. Imán                            | 5                             | Fuera de servicio |
| 4   | Caseta de vigilancia av. Insurgentes (zona cultural)  | 5                             | Funcionando       |
| 5   | Dirección de teatro y danza                           | 10                            | Funcionando       |
| 6   | Sala Netzahualcóyotl                                  | 5                             | Funcionando       |
| 7   | Caseta de vigilancia Circ. Mario de la cueva          | 5                             | Funcionando       |
| 8   | Vivero alto (cabaña 1)                                | 5                             | Funcionando       |
| 9   | Vivero alto (invernadero)                             | 5                             | Fuera de servicio |
| 10  | Vivero alto (caseta de cloración)                     | 5                             | Funcionando       |
| 11  | Mesa vibradora  | 5                             | Funcionando       |
| 12  | Mesa vibradora (taller)                               | 5                             | Funcionando       |
| 13  | Jardín botánico (oficinas)                            | 5                             | Fuera de servicio |
| 14  | Jardín botánico (baños públicos)                      | 5                             | Fuera de servicio |
| 15  | Posgrado de odontología (ala norte)                   | 10                            | Funcionando       |
| 16  | Posgrado de odontología (ala sur)                     | 10                            | Funcionando       |
| 17  | Caseta de vigilancia metro universidad                | 5                             | Funcionando       |
| 18  | Comedor anexo ingeniería                              | 5                             | Funcionando       |
| 19  | Caseta de vigilancia av. Insurgentes (trabajo social) | 5                             | Fuera de servicio |
| 20  | Caseta de vigilancia (campo beisbol)                  | 5                             | Fuera de servicio |
| 21  | Planta incineradora                                   | 5                             | Fuera de servicio |
| 22  | Canchas futbol (Pumitas)                              | 5                             | Funcionando       |
| 23  | Gimnasio  | 15                            | Funcionando       |
| 24  | Subdirección de medicina deportiva                    | 5                             | Funcionando       |
| 25  | Unión de universidades de América Latina (UDUAL)      | 5                             | Funcionando       |
| 26  | Caseta de vigilancia (ala poniente estadio olímpico)  | 5                             | Funcionando       |

Fuente: Silva, 2009.



# **CAPITULO 2**

## **MARCO TEORICO**





## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

### 2.1 CONTAMINACIÓN DEL AGUA

La contaminación del agua se debe al crecimiento demográfico, desarrollo industrial y urbanización. Estos tres factores evolucionan rápidamente y se dan uno en función de otro.

El agua es uno de los recursos naturales fundamentales y es uno de los cuatro recursos básicos en que se apoya el desarrollo, junto con el aire, la tierra y la energía; es el compuesto químico más abundante del planeta y resulta indispensable para el desarrollo de la vida.

El agua pura es un recurso renovable, sin embargo puede llegar a estar tan contaminada por las actividades humanas, que ya no sea útil, sino nociva, puede originar efectos adversos a la salud de un número representativo de personas.

Se considera que el agua está contaminada, cuando ya no puede utilizarse para el uso que se le iba a dar, en su estado natural o cuando se ven alteradas sus propiedades químicas, físicas, biológicas y/o su composición. En líneas generales, el agua está contaminada cuando pierde su potabilidad para consumo diario o para su utilización en actividades domésticas, industriales o agrícolas.

En décadas recientes miles de lagos, ríos y mares, se han contaminado mas debido a las actividades humanas. Las fuentes de contaminación del agua pueden ser naturales o artificiales, la contaminación natural la genera el ambiente, y la artificial el ser humano. Los ríos y lagos se contaminan por que en ellos son vertidos los productos de desecho de las áreas urbanas y de las industrias.

Dada su importancia merece toda nuestra atención, para crear un cultura del cuidado del agua, pues aunque el agua nunca se acabará el agua potable si se puede acabar. Para evitar las consecuencias del uso del agua contaminada se han ideado mecanismos de control temprano de la contaminación. Existen normas que establecen los rangos permisibles de contaminación, que buscan asegurar que el agua que se utiliza no sea dañina. Cada país debe tener una institución que se encargue de dicho control.

En México, la autoridad y administración en materia de aguas nacionales corresponde al ejecutivo Federal, el cual la ejerce a través de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

Las disposiciones establecidas por la CONAGUA en materia de regulación, explotación, uso y aprovechamiento de las aguas nacionales, así como su distribución, control y preservación de su cantidad y calidad, se encuentran contenidas en la Ley de Aguas Nacionales y en su reglamento. Así mismo la CONAGUA por medio de la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua, establece los derechos y obligaciones de los habitantes y del estado en materia de aguas de la Nación (CONAGUA, Gaceta de administración del agua, 2007).

En la actualidad, las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) publicadas en el Diario Oficial de la Federación regulan legalmente todo lo que respecta a aguas nacionales, tanto potables, no potables, residuales y residuales tratadas.



## **EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

---

Se han hecho una serie de normatividades en materia de aguas residuales, con la finalidad de establecer uniformidad en los límites máximos permitidos en descargas de aguas residuales y límites máximos permitidos en aguas tratadas para distintos usos. Estas normatividades están establecidas en las Normas Mexicanas (NMX) y en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), las cuales se mencionan a continuación:

### **1. NOM-001-SEMARNAT-1996**

Esta norma establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

### **2. NOM-002-SEMARNAT-1996**

Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.

### **3. NOM-003-SEMARNAT-1997**

Establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público.



### **2.1.1 FUENTES DE CONTAMINACIÓN**

Hay un gran número de fuentes que contaminan el agua, una clasificación general se presenta a continuación:

#### **Microorganismos patógenos**

Son los diferentes tipos de bacterias, virus, protozoarios y otros organismos que transmiten enfermedades como el cólera, tifus, gastroenteritis diversas, hepatitis, etc.

Normalmente estos microbios llegan al agua en las heces y otros restos orgánicos que producen las personas infectadas. Por esto, un buen indicador para medir la salubridad de las aguas, en lo que se refiere a estos microorganismos, es el número de bacterias coliformes presentes en el agua. La OMS (Organización Mundial de la Salud) recomienda que en el agua para beber haya 0 colonias de coliformes por 100 ml de agua.

#### **Desechos orgánicos**

Son el conjunto de residuos orgánicos producidos por los seres humanos, ganado y por la propia naturaleza como hojas, vegetales entre otros. Incluyen heces y otros materiales que pueden ser descompuestos por bacterias aeróbicas, es decir en procesos con consumo de oxígeno. Cuando este tipo de desechos se encuentran en exceso, la proliferación de bacterias agota el oxígeno, y ya no pueden vivir en estas aguas peces y otros seres vivos que necesitan oxígeno.

#### **Sustancias químicas inorgánicas**

En este grupo están incluidos ácidos, sales y metales tóxicos como el mercurio y el plomo. Si están en cantidades altas pueden causar graves daños a los seres vivos, disminuir los rendimientos agrícolas y corroer los equipos que se usan para trabajar con el agua.

#### **Nutrientes vegetales inorgánicos**

Nitratos y fosfatos son sustancias solubles en agua que las plantas necesitan para su desarrollo, pero si se encuentran en cantidad excesiva inducen el crecimiento desmesurado de algas y otros organismos provocando la eutrofización de las aguas. Cuando estas algas y otros vegetales mueren, al ser descompuestos por los microorganismos, se agota el oxígeno y se hace imposible la vida de otros seres vivos. El resultado es un agua maloliente e inutilizable.



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

---

### **Compuestos orgánicos**

Muchas moléculas orgánicas como petróleo, gasolina, plásticos, plaguicidas, disolventes, detergentes, etc. acaban en el agua y permanecen, en algunos casos, largos períodos de tiempo, porque, al ser productos fabricados por el hombre, tienen estructuras moleculares complejas difíciles de degradar por los microorganismos.

### **Sedimentos y materiales suspendidos**

Muchas partículas arrancadas provenientes del suelo y arrastradas a las aguas, junto con otros materiales que hay en suspensión en las aguas, son, en términos de masa total, la mayor fuente de contaminación del agua. La turbidez que provocan en el agua dificulta la vida de algunos organismos, y los sedimentos que se van acumulando destruyen sitios de alimentación o desove de los peces, rellenan lagos o pantanos y obstruyen canales, ríos y puertos.

### **Sustancias radiactivas**

Isótopos radiactivos solubles pueden estar presentes en el agua y, a veces, se pueden ir acumulando a lo largo de las cadenas tróficas, alcanzando concentraciones considerablemente más altas en algunos tejidos vivos que las que tenían en el agua.

### **Contaminación térmica**

El agua caliente liberada por centrales de energía o procesos industriales eleva, en ocasiones, la temperatura de ríos o embalses con lo que disminuye su capacidad de contener oxígeno y afecta a la vida de los organismos.



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

**Tabla 2.1** Substancias tóxicas en productos de uso cotidiano que contaminan el agua

| PRODUCTO                               | INGREDIENTE  | EFEECTO                                |
|--|--|--|
| Limpiadores domésticos                 | Polvos y limpiadores abrasivos<br>Fosfato de sodio, amoníaco,<br>etanol              | Corrosivos, tóxicos e irritantes       |
| Limpiadores con amonia                 | Amoníaco, etanol   | Corrosivos, tóxicos e irritantes       |
| Blanqueadores                          | Hidróxido de sodio y potasio,<br>hipoclorito de sodio o calcio                       | Tóxicos y corrosivos                   |
| Desinfectantes                         | Etil y metil glicol, hipoclorito<br>de sodio   | Tóxicos y corrosivos                   |
| Destapacaños                           | Hidróxido de sodio y potasio,<br>ácido clorhídrico, destilados de<br>petróleo        | Extremadamente corrosivos y<br>tóxicos |
| Pulidores de pisos y muebles           | Amoníaco, dietilenglicol,<br>destilados de petróleo,<br>nitrobenceno, nafta, fenoles | Inflamables y tóxicos                  |
| Limpiadores y pulidores de<br>metales  | Tiourea y ácido sulfúrico  | Corrosivos y tóxicos                   |
| Limpiadores de hornos                  | Hidróxido de potasio,<br>hidróxido de sodio, amoníaco                                | Corrosivos y tóxicos                   |
| Limpiadores de inodoros                | Ácido oxálico, ácido muriático,<br>hipoclorito de sodio                              | Corrosivos, tóxicos e irritantes       |
| Limpiadores de alfombras               | Naftaleno, percloroetileno,<br>ácido oxálico y dietilenglicol                        | Corrosivos, tóxicos e irritantes       |
| Productos en aerosol                   | Hidrocarburos. Inflamables   | Tóxicos e irritantes                   |
| Pesticidas y repelentes de<br>insectos | Organofosfatos, carbamatos y<br>piretinas  | Tóxicos y venenosos                    |
| Adhesivos                              | Hidrocarburos  | Inflamables e irritantes               |
| Anticongelantes                        | Etilenglicol   | Tóxico                                 |
| Gasolina                               | Tetraetilo de plomo  | Tóxico e inflamable                    |
| Aceite para motor                      | Hidrocarburos, metales<br>pesados  | Tóxico e inflamable                    |
| Líquido de transmisión                 | Hidrocarburos, metales<br>pesados  | Tóxico e inflamable                    |
| Líquido limpiaparabrisas               | Detergentes, metanol   | Tóxico                                 |
| Baterías                               | Ácido sulfúrico, plomo   | Tóxico                                 |
| Líquido para frenos                    | Glicoles, éteres   | Inflamables                            |
| Cera para carrocerías                  | Naftas   | Inflamable e irritante                 |

*Fuente: adaptado de Degrémont, 1979.*



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

### 2.2 AGUAS RESIDUALES

En general, las **aguas residuales** contienen dos componentes: uno líquido y uno sólido.

A las aguas negras también se les llama aguas residuales, aguas fecales, o aguas cloacales. Son residuales, habiendo sido usada el agua, constituyen un residuo, algo que no sirve para el usuario directo; son negras por el color que habitualmente tienen, y cloacales porque son transportadas mediante cloacas (alcantarillas); están constituidas por todas aquellas aguas que son conducidas por el alcantarillado e incluyen, a veces, las aguas de lluvia y las infiltraciones de agua del terreno. Las aguas residuales son generadas por los hogares, instituciones y locales comerciales e industriales.

En la actualidad se han desarrollado diversos métodos tecnológicos para abatir el problema de escasez de agua. Estas tecnologías han sido basadas en procesos físicos, químicos y biológicos, los cuales pueden ser combinados en las distintas etapas del tratamiento de esta agua.

El tratamiento de aguas residuales es una serie de procesos consecutivos, de diferente índole, que se le dan al agua para obtenerla posteriormente libre de el mayor número de impurezas y que así pueda volver a ser utilizada por la población.

Dichos procesos y los dispositivos utilizados en los mismos son resumidos en la (tabla 2.2).

**Tabla 2.2** Procesos del tren de tratamiento al agua residual y dispositivos utilizados  
*Fuente: adaptado de García, 2009.*

| Etap<br>a      | Proceso                | Dispositivos   |
|----------------|------------------------|--|
| 1 <sup>a</sup> | Pretratamiento         | Rejas y cribas de barras, Cribas finas, desmenuzadores, medidores de gasto, desarenadores, tanques de homogeneización y regulación de caudales, tanques de preaireación, distribuidor de gasto.  |
| 2 <sup>a</sup> | Tratamiento Primario   | Fosa séptica, tanque de doble acción o tanque Imhoff, tanque de sedimentación primaria, flotación, tanque de precipitación química, tanque de floculación, mezcladores.  |
| 3 <sup>a</sup> | Tratamiento Secundario | Lodos activados, laguna aireada, estanque de estabilización, laguna de oxidación, reactor de lecho ascendente, digestor, filtro percolador, discos biológicos rotatorios (Biodiscos), filtro sumergido, lecho fluidificado, filtro de goteo, reactor anaerobio, aireador mecánico. |
| 4 <sup>a</sup> | Tratamiento Terciario  | Osmosis inversa, ultrafiltración, microfiltración, adsorción con carbón activado, coagulación-sedimentación, electrodiálisis, microtamizado, intercambio iónico, cloración al punto de quiebre.  |
| 5 <sup>a</sup> | Desinfección           | Desinfección con agentes químicos, desinfección con agentes físicos, desinfección por radiación.   |



## 2.3 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

### 2.3.1 GENERALIDADES

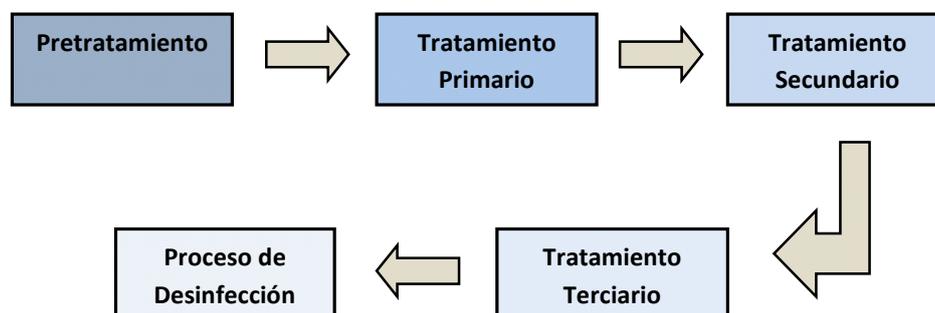
El tratamiento de aguas residuales es necesario para la prevención de la contaminación ambiental y del agua, al igual que para la protección de la salud pública.

El manejo efectivo de aguas residuales debe dar como resultado un efluente ya sea reciclado o reusable, o uno que pueda ser descargado de manera segura en el medio ambiente.

Muchas opciones de tratamiento pueden ayudar a reducir los efectos de contaminación ambiental. La eficacia del tratamiento debe ser balanceada con el costo, la aplicación práctica y el cumplimiento con los métodos que han sido escogidos para la implementación.

La figura 2.1 muestra el tren de tratamiento al que se somete un agua residual.

Fig. 2.1 Tren de tratamiento que recibe un agua residual. SARAIT VARGAS, 2010.



### PRETRATAMIENTO

De una manera u otra, casi todas las cosas terminan por llegar a la alcantarilla, y de esta a las plantas de tratamiento de aguas residuales (latas, botellas, plásticos, trapos, ladrillos, piedras). Todos estos materiales, si no son eliminados eficazmente, pueden producir serias averías en los equipos. Producen un gran desgaste de las tuberías y de las conducciones así como de las bombas.

La finalidad del pretratamiento es acondicionar el agua residual para facilitar los tratamientos posteriores.



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

---

### TRATAMIENTO PRIMARIO

Consiste principalmente en medios mecánicos para la remoción de partículas grandes y no disueltas en el agua. Remueve cerca del 60% de los sólidos suspendidos y hasta el 35% de la DBO.

Tiene como objetivo eliminar los sólidos en suspensión por medio de un proceso de sedimentación simple por gravedad o asistida por coagulantes y floculantes. Así, para completar este proceso se pueden agregar compuestos químicos (sales de hierro, aluminio y polielectrólitos floculantes) con el objeto de precipitar el fósforo, los sólidos en suspensión muy finos o aquellos en estado de coloide.

En esta etapa se elimina por precipitación alrededor del 60 al 70% de los sólidos en suspensión. En la mayoría de las plantas existen varios sedimentadores primarios y su forma puede ser circular, cuadrada a rectangular.

### TRATAMIENTO SECUNDARIO

Involucra medios mecánicos para la remoción de partículas grandes y procesos biológicos tanto aerobios como anaerobios. Remueve sólidos suspendidos, nitratos, fosfatos, metales pesados, bacterias patógenas y hasta el 85% de la DBO.

Tiene como objetivo eliminar la materia orgánica en disolución y en estado coloidal mediante un proceso de oxidación de naturaleza biológica seguido de sedimentación. Este proceso biológico es un *proceso natural controlado* en el cual participan los microorganismos presentes en el agua residual, y que se desarrollan en un reactor o cuba de aireación, más los que se desarrollan, en menor medida en el decantador secundario.

Estos microorganismos, principalmente bacterias, se alimentan de los sólidos en suspensión y estado coloidal produciendo en su degradación en anhídrido carbónico y agua, originándose una biomasa bacteriana que precipita en el *decantador secundario*. Así, el agua queda limpia a cambio de producirse unos fangos para los que hay que buscar un medio de eliminarlos.

En el decantador secundario, hay un flujo laminar de agua, de forma que la biomasa, es decir, los flóculos bacterianos producidos en el reactor, sedimentan. El sedimento que se produce y que, está formado fundamentalmente por bacterias, se denomina lodos activados.



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

---

### TRATAMIENTO TERCIARIO

Con el tratamiento terciario se busca reducir al máximo los contaminantes orgánicos, los nutrientes como los iones fosfato y nitrato o cualquier exceso de sales minerales, empleándose métodos de precipitación (coagulación y/o floculación), sedimentación y filtración para eliminar los nutrientes aún presentes en el agua, así como reducir la cantidad de microorganismos patógenos y la cuenta bacteriana total.

Al final de este tratamiento se pretende que el agua sea lo más pura posible antes de ser descargada al medio ambiente o de darle otro uso más adecuado.

### PROCESO DE DESINFECCIÓN

En esta etapa, que es complementaria al tratamiento terciario, se lleva a cabo la desinfección que es la destrucción de microorganismos patógenos y tiene como finalidad proteger los cuerpos receptores de aguas residuales tratadas para evitar la propagación de enfermedades. La desinfección se puede realizar mediante agentes químicos, físicos o radiación. Los agentes químicos que se han utilizado son cloro y sus compuestos, yodo, bromo y ozono. Como desinfección física se tiene la filtración, el calor, la luz y ozono. Sin embargo se ha observado que algunos microorganismos como la *Giardia* o patógenos que producen huevos como el *Cryptosporidium* sobreviven al tratamiento de químicos (ozono o UV).

### TRATAMIENTO DE LODOS

Involucra la producción de una masa activa de microorganismos capaces de remover la materia orgánica presente en el agua. La función del lodo activado es absorber y flocular; contiene una población activa de microorganismos, por lo que es un proceso de contacto aeróbico y requiere un abastecimiento constante de oxígeno. La eficiencia para la remoción de DBO se encuentra en el rango de los 85 al 90%.

El lodo es un producto derivado del tratamiento de aguas residuales y del cual uno no puede deshacerse tan fácilmente. Los rellenos sanitarios, las desembocaduras a corta distancia de la costa y lagunas han servido de depósitos para deshacerse del lodo. El lodo puede ser tratado y utilizado para una variedad de propósitos. La digestión del lodo de alcantarillado puede producir gas metano, el cual es útil para la producción de calor y energía.

El lodo también ha sido utilizado en los cultivos agrícolas y en terrenos forestales, añadiendo sustancias nutritivas a los suelos deficientes. La presencia de contaminantes dañinos, incluyendo patógenos y metales pesados, es algo de qué preocuparse al deshacerse del lodo y deben tomarse los pasos apropiados para minimizar su presencia. El lodo también puede ser utilizado como abono para producir fertilizantes o puede ser horneado para fabricar ladrillos para construcción.



### 2.3.2 PRINCIPALES PROCESOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

En la mayoría de los casos, con un análisis y control adecuados del entorno, es posible tratar por vía biológica la totalidad de las aguas residuales. Los objetivos del tratamiento biológico del agua residual son la coagulación y eliminación de los sólidos coloidales no sedimentables y la estabilización de la materia orgánica. En el caso de aguas residuales industriales, el principal objetivo es la reducción de la concentración de compuestos tanto orgánicos como inorgánicos.

A continuación se definen algunos conceptos básicos muy importantes para la comprensión del tratamiento biológico.

**Procesos aerobios.** Son los procesos de tratamiento biológico que se dan en presencia de oxígeno.

**Procesos anaerobios.** Son los procesos de tratamiento biológico que se dan en ausencia de oxígeno.

**Desnitrificación anóxica.** Es el proceso por el cual el nitrógeno de los nitratos se transforma, biológicamente, en nitrógeno gas en ausencia de oxígeno. Este proceso también se conoce con el nombre de Desnitrificación anaerobia.

**Eliminación biológica de nutrientes.** Término que se aplica a la eliminación de nitrógeno y fósforo mediante procesos de tratamiento biológico.

**Procesos facultativos.** Son los procesos de tratamiento biológico en los que los organismos responsables pueden funcionar en presencia o ausencia de oxígeno molecular. Estos organismos se conocen con el nombre de organismos facultativos.

**Eliminación de la DBO carbonosa.** Es la conversión biológica de la materia carbonosa del agua residual en tejido celular y en diversos productos gaseosos. En la conversión, se supone que el nitrógeno presente en los diferentes compuestos se convierte en amoníaco.

**Desnitrificación.** Proceso biológico mediante el cual el nitrato se convierte en nitrógeno gas y en otros productos gaseosos.

**Substrato.** Es el término empleado para representar la materia orgánica o los nutrientes que sufren una conversión o que pueden constituir un factor limitante en el tratamiento biológico.

**Proceso de cultivo en suspensión.** Son los procesos de tratamiento biológico en los que los microorganismos responsables de la conversión de la materia orgánica u otros constituyentes del agua residual en gases y tejidos celular, se mantienen en suspensión dentro del líquido.

**Proceso de cultivo fijo.** Son los procesos de tratamiento biológico en los que los microorganismos responsables de la conversión de la materia orgánica u otros constituyentes de agua residual en gases y tejido celular están fijados a un medio inerte, tal como piedras, escorias, o materiales cerámicos y plásticos especialmente diseñados para cumplir con esta función. Los procesos de cultivo fijo también se conocen con el nombre de procesos de película fija.



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

**Tabla 2.3** Principales procesos biológicos aplicados al tratamiento de las aguas residuales.

*Fuente: adaptado de Metcalf & Eddy, 1996*

| Tipo  | Nombre común   | Aplicación   |
|---|--|--|
| <b>Procesos aerobios:</b>                                   |  |  |
| <u>Cultivo en suspensión</u>                                | <i>Proceso de fangos activados</i><br>Convencional (flujo en pistón)<br>Mezcla completa<br>Aireación graduada<br>Oxígeno puro<br>Reactor intermitente secuencial<br>Contacto y estabilización<br>Aireación prolongada<br>Canales de oxidación<br>Tanques profundos (30m)<br>Deep Shaft | Eliminación de la DBO carbonosa, nitrificación   |
|   | <i>Nitrificación de cultivos en suspensión</i>   | Nitrificación  |
|   | <i>Lagunas aireadas</i>  | Eliminación de la DBO carbonosa, nitrificación   |
|   | <i>Digestión aerobia</i><br>Aire convencional<br>Oxígeno puro  | Estabilización, eliminación de la DBO carbonosa  |
| <u>Cultivo fijo</u>   | <i>Filtros percoladores</i><br>Baja carga<br>Alta carga  | Eliminación de la DBO carbonosa, nitrificación   |
|   | <i>Filtros de desbaste</i>   | Eliminación de la DBO carbonosa  |
|   | <i>Sistemas biológicos rotativos de contacto</i>   | Eliminación de la DBO carbonosa, nitrificación   |
| <u>Procesos combinados</u>                                  | <i>Reactores de lecho compacto</i><br><i>Biofiltros activados</i>  | Eliminación de la DBO carbonosa, nitrificación<br>Eliminación de la DBO carbonosa, nitrificación   |
| <b>Procesos anaerobios:</b>                                 |  |  |
| <u>Cultivo en suspensión</u>                                | <i>Digestión anaerobia</i><br>Baja carga, una etapa<br>Alta carga, una etapa<br>Doble etapa  | Estabilización, eliminación de la DBO carbonosa<br>Estabilización, eliminación de la DBO carbonosa<br>Estabilización, eliminación de la DBO carbonosa  |
|   | <i>Proceso anaerobio de contacto</i>   | Eliminación de la DBO carbonosa  |
|   | <i>Manto de fango anaerobio de flujo ascendente</i>  | Eliminación de la DBO carbonosa  |
| <u>Cultivo fijo</u>   | <i>Filtro anaerobio</i><br><i>Lecho expandido</i>  | Eliminación de la DBO carbonosa, estabilización de residuos, desnitrificación<br>Eliminación de la DBO carbonosa, estabilización de residuos   |
| <b>Procesos anóxicos:</b>                                   |  |  |
| <u>Cultivo en suspensión</u>                                | <i>Desnitrificación con cultivo en suspensión</i>  | Desnitrificación   |
| <u>Cultivo fijo</u>   | <i>Desnitrificación de película fina</i>   | Desnitrificación   |
| <b>Procesos anaerobios, anóxicos o aerobios combinados:</b> |  |  |
| <u>Cultivo en suspensión</u>                                | <i>Procesos de una o varias etapas, múltiples procesos patentados</i>  | Eliminación de la DBO carbonosa, nitrificación, desnitrificación y eliminación de fósforo  |
| <u>Procesos combinados</u>                                  | <i>Procesos de una o varias etapas</i>   | Eliminación de la DBO carbonosa, nitrificación, desnitrificación y eliminación de fósforo  |
| <u>Cultivo fijo y en suspensión</u>                         |  |  |
| <u>Procesos en estanques</u>                                | <i>Lagunas aerobias</i><br><i>Estanques de maduración</i><br><i>Estanques facultativos</i><br><i>Estanques anaerobios</i>  | Eliminación de la DBO carbonosa, nitrificación<br>Eliminación de la DBO carbonosa, nitrificación<br>Eliminación de la DBO carbonosa, nitrificación<br>Eliminación de la DBO carbonosa, nitrificación |



## **2.4 TECNOLOGÍAS DE FILTRACIÓN**

### **2.4.1 GENERALIDADES DE FILTRACIÓN**

Los primeros filtros fueron de carácter doméstico, eran piedras porosas colocadas en tinajeros. En Francia, en los siglos XVIII y XIX se difundieron los filtros de esponja, paño, lana y otros materiales. Cuando se hicieron los primeros filtros no domésticos el agua filtrada no se distribuía por tuberías, sino que se vendía por galones al consumidor.

En Inglaterra, en 1804, fue donde hizo por primera vez una instalación de filtros para una población. Más tarde, en 1829, en Londres se construyó la primera planta de filtros lentos de arena. A medida que la demanda de agua filtrada aumentó, se estudió más a fondo el funcionamiento de los filtros, encontraron que aparte del proceso de cribado, también transformaban la materia orgánica (Salazar, 2006).

Se formaron dos grupos: Uno creía en la filtración de arriba hacia abajo (descendente) y el otro en la filtración de abajo hacia arriba (ascendente). El primero sostenía que al filtrar hacia abajo, la mayor parte de la materia suspendida quedaba retenida en las primeras capas del lecho, lo que facilitaba la limpieza del filtro, pues solo era necesario raspar esas capas. El segundo grupo afirmaba que al filtrar hacia arriba, a través de material cada vez más fino, la gravedad producía el asentamiento de la mayoría de partículas en el fondo del filtro y las que alcanzaran a subir, podrían lavarse invirtiendo el sentido del flujo.

Poco a poco se impuso la filtración descendente y el uso de los filtros lentos de arena se popularizó tanto en Europa como en América. Con el desarrollo de la microbiología, nacida a mediados del siglo XIX, se le fue dando cada vez mayor importancia al aspecto bacteriológico de la filtración, y a fines de dicho siglo muchas ciudades tanto del viejo como del nuevo mundo habían construido plantas de filtración. Es así como, a partir de los filtros como proceso único de tratamiento, se fueron creando las plantas de potabilización, en las que todos los tratamientos son preparatorios o complementarios de la filtración.

En los últimos años, se ha venido desarrollando tanto la teoría como la práctica de la filtración, para lograr mayor eficiencia, con base en el mejoramiento de los mantos y la optimización de los procesos de operación, sin realizar modificaciones sustanciales al proceso inicial. Se han ido produciendo ajustes, con el objeto de aumentar la tasa de flujo, mejorar la turbidez del efluente, facilitar el control de los filtros y la limpieza del medio filtrante (Salazar, 2006).



### 2.4.1.1 MECANISMOS DE LA FILTRACIÓN

Como las fuerzas que mantienen a las partículas removidas de la suspensión adheridas a las superficies de los granos del medio filtrante son activas para distancias relativamente pequeñas (algunos angstroms), la filtración usualmente es considerada como el resultado de dos mecanismos distintos pero complementarios: **transporte y adherencia**. Inicialmente, las partículas por remover son transportadas de la suspensión a la superficie de los granos del medio filtrante. Ellas permanecen adheridas a los granos, siempre que resistan la acción de las fuerzas de cizallamiento debidas a las condiciones hidrodinámicas del escurrimiento (Maldonado, 2004).

El transporte de partículas es un fenómeno físico e hidráulico, afectado principalmente por los parámetros que gobiernan la transferencia de masas. La adherencia entre partículas y granos es básicamente un fenómeno de acción superficial, que es influenciado por parámetros físicos y químicos.

Los mecanismos que pueden realizar **transporte** son los siguientes:

- a) Cernido
- b) Sedimentación
- c) Intercepción
- d) Difusión
- e) Impacto inercial
- f) Acción hidrodinámica,
- g) Mecanismos de transporte combinados

Los mecanismos que pueden realizar **adherencia** son los siguientes:

- a) Fuerzas de Van der Waals;
- b) Fuerzas electroquímicas;
- c) Puente químico

Cuál de estos mecanismos es el que controla el proceso de filtración ha sido asunto de largos debates. Es indudable que no todos necesariamente tienen que actuar al mismo tiempo y que, en algunos casos, la contribución de uno o varios de ellos para retener el material suspendido es mínimo.

Pero hay que tener en cuenta que dada la complejidad del fenómeno, más de un mecanismo deberá entrar en acción para transportar los diferentes tamaños de partículas hasta la superficie de los granos del medio filtrante y adherirlas.

### MECANISMOS DE TRANSPORTE

Existen diferentes mecanismos o causas de transporte de las partículas dentro de los poros del medio filtrante. Estas pueden, actuar simultáneamente para aproximar el material suspendido hasta los granos del medio filtrante y variar dependiendo de si la filtración se produce en las capas superficiales o en profundidad. En el primer caso la acción física de cernido es el factor dominante, mientras que en el segundo es el de menor importancia (Maldonado, 2004).



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

### **Cernido**

Resulta evidente que cuando la partícula es de tamaño mayor que los poros del lecho filtrante, puede quedar atrapada en los intersticios.

El cernido, en general, actúa solo en las capas más superficiales del lecho y con partículas relativamente consistentes, capaces de resistir los esfuerzos cortantes producidos por el flujo, cuya velocidad aumenta en las constricciones.

A partir de las consideraciones geométricas, Hall considera que la probabilidad de remoción de una partícula por cernido ( $P_r$ ) está dada por la siguiente fórmula:

$$P_r = \left[ \frac{d}{D_c} \right]^{3/2}$$

**Donde,**

$d$  = diámetro de la partícula

$D_c$  = diámetro del medio filtrante

### **Sedimentación**

El efecto de la gravedad sobre las partículas suspendidas durante la filtración fue sugerido hace más de 70 años, cuando Hazen consideró los poros de los filtros lentos de arena como pequeñas unidades de sedimentación. Sin embargo, durante mucho tiempo la contribución de este mecanismo no se consideró significativa, pues la velocidad de sedimentación de las partículas suspendidas y, especialmente, la de los pequeños flocúlos, es mucho más pequeña en comparación con la velocidad intersticial (Maldonado, 2004).

La sedimentación solo puede producirse con material suspendido relativamente grande y denso, cuya velocidad de asentamiento sea alta y en zonas del lecho donde la carga hidráulica sea baja.

Ives (1965) sugiere que algunas partículas más pequeñas y floculantes pueden quedar retenidas en regiones donde la velocidad de escurrimiento sea pequeña debido a la distribución parabólica de velocidad en el régimen laminar.

### **Intercepción**

Normalmente, el régimen de escurrimiento durante la filtración es laminar y, por lo tanto, las partículas se mueven a lo largo de las líneas de corriente. Debido a que las partículas suspendidas tienen una densidad aproximadamente igual a la del agua, ellas serán removidas de la suspensión cuando, en relación con la superficie de los granos del medio filtrante, las líneas de corriente están a una distancia menor que la mitad del diámetro de las partículas suspendidas.



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

### ***Difusión***

Se ha observado que las partículas relativamente pequeñas presentan un movimiento errático cuando se encuentran suspendidas en un medio líquido. Este fenómeno, resultado de un bombardeo intenso a las partículas suspendidas por las moléculas de agua, es conocido como *movimiento browniano*, y se debe al aumento de la energía termodinámica y a la disminución de la viscosidad del agua.

La eficiencia del filtro debida a la difusión es directamente proporcional a la temperatura e inversamente proporcional al diámetro de la partícula del grano (Maldonado, 2004).

### ***Impacto inercial***

Durante el escurrimiento, las líneas de corriente divergen al estar cerca de los granos del medio filtrante, de modo que las partículas suspendidas, con cantidad de movimiento suficiente para mantener su trayectoria, colisionan con los granos.

### ***Acción hidrodinámica***

La remoción de partículas floculantes de tamaño relativamente grande ( $\sim 10 \mu\text{m}$ ) es atribuida a la acción hidrodinámica.

La comprensión de este mecanismo se facilita cuando se considera un escurrimiento en el que el gradiente de velocidad es constante. Una partícula suspendida en un fluido que escurre en estas condiciones estará sometida a velocidades tangenciales variables en dirección perpendicular a la del escurrimiento.

La diferencia entre estas tiende a hacer que la partícula gire y produzca una diferencia de presión en dirección perpendicular al escurrimiento, lo que hará que la partícula sea conducida a una región de velocidad más baja. A pesar de no tener exactamente las condiciones descritas anteriormente, en la práctica de la filtración, el fenómeno es análogo y es válido para explicar la remoción de partículas de un tamaño del orden de  $10 \mu\text{m}$ .

### ***Mecanismos de transporte combinados***

Es probable que todos los mecanismos actúen simultáneamente durante la filtración; sin embargo, el grado de importancia de cada uno de ellos depende de las **características de la suspensión y del medio filtrante**. Normalmente se ha dado poca importancia a los efectos de la acción física de cernido y de impacto inercial durante la filtración.

La eficiencia del medio filtrante para remover partículas de la suspensión por acción de los mecanismos de transporte puede expresarse adecuadamente como una función de la intercepción, difusión, sedimentación y acción hidrodinámica.



## **MECANISMOS DE ADHERENCIA**

La adherencia entre las partículas transportadas y los granos está gobernada, principalmente, por las características de las superficies de las partículas suspendidas y de los granos. Las partículas se pueden adherir directamente tanto a la superficie de los granos como a partículas previamente retenidas. La importancia de las características de las superficies es evidente cuando se considera la filtración de una suspensión de arcilla en un lecho de arena con una velocidad de aproximación del orden de 1,5 mm/s. La eficiencia de remoción es inferior a 20% cuando no se emplea coagulante; por lo tanto, la filtración de la misma suspensión coagulada con una sal de  $Al^{+++}$  o  $Fe^{+++}$  puede producir una eficiencia de remoción superior a 95%. En el primer caso, se tiene una cantidad elevada de partículas estables, en tanto que, en el segundo caso, la mayor parte de las partículas fueron desestabilizadas.

La adherencia se atribuye a dos tipos de fenómenos: interacción entre las fuerzas eléctricas y las de Van der Waals, y al enlace químico entre las partículas y la superficie de los granos de un material intermediario. Se ha sugerido, inclusive, que la filtración no es más que un caso especial de la floculación, donde algunas partículas son fijas (aquellas adheridas inicialmente a los granos) y otras suspendidas (Salazar, 2006).

### ***Interacción combinada de las fuerzas electrostáticas y las de Van der Waals***

Las fuerzas de Van der Waals son fuerzas de estabilización molecular; forman un enlace químico (unión entre dos átomos para formar una molécula o una estructura cristalina) en el que participan dos tipos de fuerzas o interacciones, dispersión y repulsión.

Con las fuerzas de dispersión todos los átomos forman pequeños dipolos, por el giro de los electrones en torno al núcleo. El dipolo hace que los átomos contiguos se polaricen, con lo cual se producen pequeñas fuerzas de atracción electrostática entre los dipolos que forman todos los átomos. A las fuerzas de dispersión se opone la dispersión electrostática entre las capas electrónicas de dos átomos contiguos. La resultante de estas fuerzas opuestas es una distancia mínima permitida entre los núcleos de dos átomos contiguos; esta distancia se conoce como radio de Van der Waals.

Arboleda, J. cita que, las fuerzas de Van der Waals son las primeras responsables de la adhesión de las partículas a los granos del filtro, afirman que “Dentro de la distancia  $\Delta r$  desde la superficie de cada grano sobre la cual las fuerzas de adhesión son operativas, hay un volumen alrededor de cada grano que puede designarse como espacio de adhesión y las partículas suspendidas que entran en este espacio serían removidas del flujo, a medida que sean atraídas para adherirse a la superficie de los granos”.

La constante de Van der Waals incrementa con la densidad de las partículas, de manera que, el floculo más denso se adhiere con más fuerza al medio filtrante.



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

### ***Fuerzas electrostáticas***

La adsorción entre partículas, se determina no solo por las fuerzas de Van der Waals, sino por la combinación de estas, con las fuerzas electrostáticas.

Considerando el mecanismo de las fuerzas electrostáticas como el responsable de la adhesión del material suspendido al medio filtrante, existen tres casos:

- Si los granos del medio filtrante son negativos y los coágulos o floculo son positivos, existe una fuerza atractiva entre el medio y las partículas, lo que hace que la sola aproximación de éstas a los granos del lecho, pueda producir atracción y adhesión.

- Si los granos del medio filtrante son negativos mientras que los coágulos o partículas son neutros, la barrera de energía desaparece y todo contacto puede terminar en adhesión.

- Si los granos del medio filtrante son negativos y los coágulos también son negativos, existe repulsión entre unos y otros, pero las fuerzas hidrodinámicas pueden ocasionalmente vencer la barrera de energía y aproximar lo suficiente los coágulos a los granos como para que las fuerzas atractivas de Van der Waals puedan actuar. La probabilidad de adhesión de las partículas en este caso es menor que en los anteriores (Maldonado, 2004).

### ***Puente químico***

La desestabilización de los coloides se realiza por productos de la hidrólisis (desdoblamiento de la molécula por acción del agua) que a determinado pH se polimerizan. Las cadenas poliméricas adheridas a las partículas dejan sus segmentos extendidos en el agua, y estos pueden ser adsorbidos por otras partículas o por sitios vacantes en los granos del filtro. Este fenómeno es independiente de las fuerzas de Van der Waals y las cargas electrostáticas (Maldonado, 2004).

El uso de ayudantes de filtración ó polielectrólitos inyectados en el efluente que va al filtro son útiles para aumentar la adhesión de la materia suspendida al medio filtrante.

Las partículas con sus segmentos poliméricos adheridos, al atravesar los poros del medio filtrante, se enlazan con segmentos sueltos adsorbidos por los granos, o por los de partículas ya adheridas al lecho filtrante y quedan en esta forma retenidas.



### 2.4.1.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA FILTRACIÓN

Entre los factores que de una forma u otra influyen en el proceso de filtración están, medio filtrante, velocidad de filtración, suspensión, temperatura y dureza del floculo.

#### MEDIO FILTRANTE

El medio filtrante usado en plantas de tratamiento de agua, está constituido por arena silícea, antracita, granate o una combinación de dichos materiales. La forma tiene importancia no sólo por el aspecto hidráulico (pérdida de carga inicial) sino por la relación superficie-volumen, ya que el proceso de filtración está relacionado directamente con el área total de los granos. Por esta misma razón la eficiencia es proporcional al diámetro de las partículas.

#### VELOCIDAD DE FILTRACIÓN

La velocidad de filtración se define como la relación del caudal instantáneo y la unidad de superficie, es directamente proporcional a la pérdida de carga. Según la siguiente ecuación, (Dégremont, 1979).

$$V = \frac{P}{nR} = kP$$

Donde,

**V** = velocidad de filtración

**$\eta$**  = viscosidad dinámica

**P** = pérdida de carga

**R** = resistencia del medio

**k** = coeficiente de proporcionalidad

La velocidad de filtración influye en la determinación del área del filtro, Metcalf & Eddy, 1996. Depende de la consistencia de los flóculos y del tamaño medio del grano del lecho filtrante. Si los flóculos son de consistencia débil, con velocidades elevadas tienden a romperse y a arrastrar parte de ellos mismos a través del filtro. La velocidad de filtración es inversamente proporcional a la eficiencia.



## **SUSPENSIÓN**

Las características físicas y químicas de la suspensión afectan el comportamiento de los filtros. En muchos casos son más importantes para obtener una determinada calidad del efluente, que el tamaño y clase del medio filtrante usado, ya que un filtro trabajando a una velocidad determinada puede producir agua con mayor o menor turbidez, según la suspensión que reciba.

### ***Características físicas***

El volumen, densidad y tamaño del floculo, se relacionan en varias formas con la rapidez con que aumenta la pérdida de carga en el filtro y otros parámetros. Si el volumen del floculo es grande, los poros del medio filtrante se llenarán más rápido y el gradiente hidráulico aumenta más en menos tiempo.

Por otra parte, las fuerzas de Van der Waals se incrementan con la densidad de las partículas, de manera que puede influir en la adhesividad del floculo, la profundidad de su penetración en el lecho y su resistencia al desprendimiento por esfuerzos cortantes (Salazar, 2006).

El tamaño de las partículas influye, a su vez, en el mecanismo que predomina para la eliminación del material suspendido, lo que se relaciona con la proporción de partículas de un diámetro determinado que resultan eliminadas en el proceso.

### ***Características químicas***

Arboleda Valencia, 2003, cita que autores como Jorden, Smith, Eduard y Monke; y Gregory han estudiado la interrelación entre pH, potencial zeta (PZ) y eficiencia del filtro.

El potencial Z de los granos del medio filtrante es diferente al de la suspensión. Los compuestos de sílice (arenas) en el agua, son electronegativos y su PZ varía entre -36 y -177 mv. Las arcillas en suspensión acuosa también son electronegativas, cuando se les agrega un coagulante metálico, el PZ disminuye de -25 ó -15 mv hasta -5 ó 0 mv y en ocasiones adquieren cargas positivas, cuando se aplica una sobredosis, que hace que entre los granos del medio filtrante y las partículas de la suspensión pueden establecerse fuerzas repulsivas.

Eduard y Monke (Arboleda, 2003), encontraron que las capas superficiales de un filtro de 3/16" de espesor son fuertemente electropositivas, aunque el resto del lecho sea electronegativo y que durante el proceso de filtrado las cargas positivas y negativas del lecho disminuyen aproximándose al punto isoeléctrico.

La pequeña capa superficial que se forma en el filtro, constituida por material orgánico (bacterias, algas, etc.) que es de carga positiva, puede crear fuerzas atractivas entre estas y las partículas electronegativas de la suspensión. Esto explica la mayor eliminación de partículas en los primeros 2,5 cm del medio filtrante y la mejora, con el tiempo, en la calidad del efluente, cuando aumenta el espesor de la película biológica.



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

---

Según los autores citados, son los granos del medio filtrante los que cambian de PZ durante el filtrado. Las partículas de arcilla que contiene el agua no modifican su PZ independiente del pH que tengan al pasar a través del filtro. Concluyeron que a medida que el PZ se hace más electronegativo y el pH del agua aumenta, la turbidez del efluente va disminuyendo hasta alcanzar un valor óptimo, a partir del cual la turbidez del filtrado se va incrementando a medida que el pH se hace mayor. Por lo tanto, existe un valor óptimo de pH para filtrar el agua, que no necesariamente es igual al que se establece para desestabilizarla y sedimentarla.

Se debe tener en cuenta que al aumentar el pH, las fuerzas entre los granos y las partículas de la suspensión, aunque siguen siendo atractivas en las capas superiores, se hacen más repulsivas en las inferiores, y por ello se puede producir el incremento en la turbidez del efluente.

### TEMPERATURA

La temperatura del agua afecta los mecanismos físicos y químicos que intervienen en la filtración. Dostal y Robeck, estudiaron el comportamiento de un filtro a 3°C en invierno y a 20°C en verano, operando con una tasa normal de 120 m<sup>3</sup> /m<sup>2</sup> /d, en un medio filtrante de arena. La turbidez del afluente fue de 4 NTU y el efluente de 0,1 NTU. Con pérdidas de carga a 15, 45, 52 y 60 cm contados desde la superficie del lecho filtrante. Observaron que para el mismo tiempo de filtración, la pérdida de carga fue menor a 3°C que a 20°C, debido a una eliminación del floculo más lenta a menor temperatura, y que a una temperatura de 3°C el floculo se deposita menos en la superficie que a 20°C.

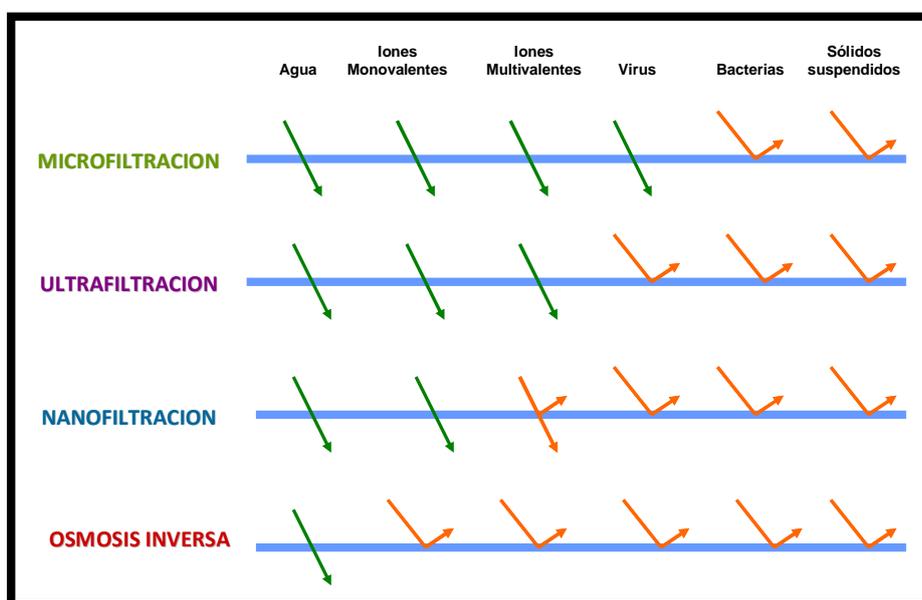


## 2.4.2 FILTRACIÓN POR MEMBRANAS

Los procesos de separación de materia disuelta, por medio de membranas, bajo el efecto de una presión, se conocen desde hace más de cien años, sin embargo, la aplicación de estas técnicas se empezó a incrementar a partir de 1960, con el desarrollo de las membranas sintéticas.

En estas operaciones se utilizan las propiedades de semipermeabilidad de ciertas membranas, que son permeables al agua y a ciertos solutos, e impermeables a otros y a las partículas (figura 2.2).

Fig. 2.2 Potencial de retención en los diferentes procesos de filtración de membranas



Fuente: adaptado de [www.kochmembrane.com](http://www.kochmembrane.com)

Se aplican como continuación de los procesos clásicos de filtración. Es decir que después de la filtración simple, como la filtración en profundidad, en la que quedan retenidas las partículas de mayor diámetro, se aplican operaciones como **microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración u ósmosis inversa**.

En la operación de membrana una corriente de alimentación se divide en dos; por un lado, el permeado que contiene el material pasado a través de la membrana y por otro, el retenido o concentrado que contiene las especies que no atraviesan la membrana.



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

---

Las ventajas de la operación de membranas son:

- Pueden trabajar en continuo.
- Ahorran energía.
- Son fácilmente escalables y combinables con otros procesos.
- La separación se puede realizar a temperatura ambiente sin cambio de fase.
- La filtración se da sin acumulación de productos dentro de la membrana.
- No requiere la adición de productos químicos, con lo cual se disminuyen los residuos contaminantes.

Aunque las técnicas convencionales mecánicas dominan las separaciones líquido-sólido, la filtración por membranas está ganando aceptación en un gran número de aplicaciones. Por ejemplo ha encontrado su uso más amplio en las aplicaciones más demandantes: tratamientos de aguas residuales, biotecnología y electrónica, procesos como desalinización, que requiere el poro de membrana más pequeño y la mayor diferencial de presión. Aún así en los 20 años pasados se ha visto un aumento lento pero constante en el uso de membranas.



### 2.4.2.1 GENERALIDADES DE MEMBRANAS

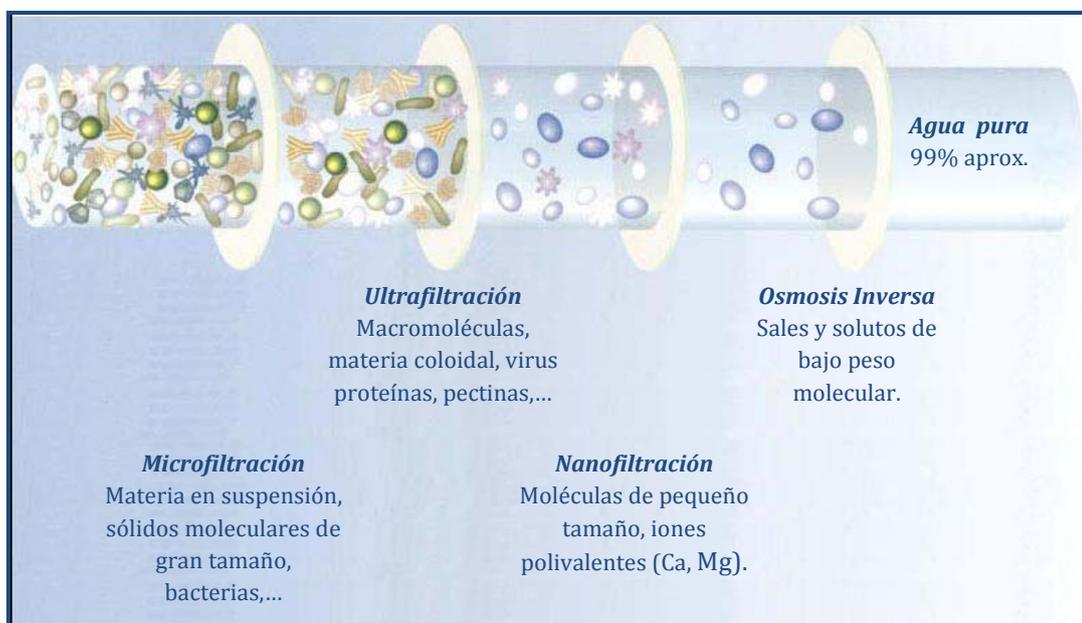
Las membranas son capas de hojas muy delgadas microporosas sujetas a una estructura de soporte más gruesa y porosa, generalmente hecha de polipropileno, poliéster o hasta de politetrafluoretileno. A diferencia del papel o la tela, el material de las membranas que varía desde acetato de celulosa o cerámicos y otros polímeros como polisulfonatos, polivinildieno, funcionan como filtros asimétricos. En general, la resistencia al flujo y la caída de presión depende del lado de la membrana que interactuó con el flujo (Brett, 1998).

En la filtración por membrana, las capas superiores son las que tienen contacto directo con el agua o fluido a tratar, y la estructura de soporte tiene poros que generalmente se hacen más grandes al irse alejando de la superficie.

Al aplicar diferencias de presión moderadas se provoca que la membrana actúe como una malla. El tamaño físico de las moléculas de soluto o partículas determina si se permean o se quedan en el lado de la superficie como concentrado.

Dependiendo de la composición de la membrana y el tamaño de poro de su capa delgada, los procesos pueden diseñarse para separar moléculas o partículas de tamaños cada vez más pequeños, a un punto donde en esencia todos los sólidos disueltos y suspendidos sean rechazados (figura 2.3).

Fig. 2.3 Separación por tecnología de membranas



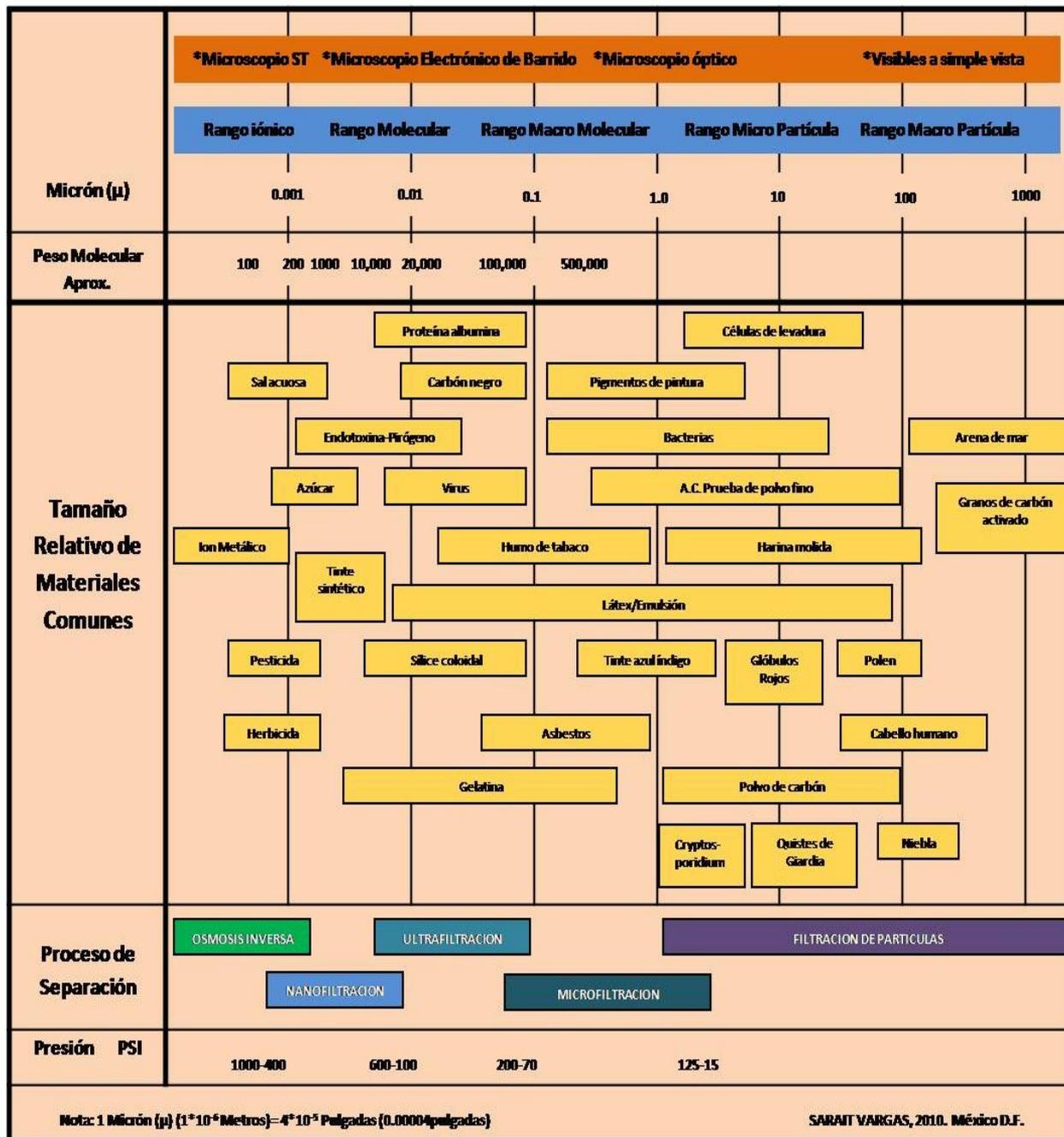
Fuente: adaptado de [www.idagua.com](http://www.idagua.com)



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Otro modo de entender cómo funciona una separación por membranas es relacionar los rangos de separación con el tipo de material retenido como se muestra en la (figura 2.4).

Fig. 2.4 Espectro de la Filtración por Membranas



Fuente: basado de [www.osmonics.com](http://www.osmonics.com)



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

### APLICACIONES DE LOS PROCESOS DE MEMBRANAS

Las aplicaciones de las operaciones de membrana se pueden clasificar en tres grupos, mediante **presión, de permeado y de diálisis**.

Las operaciones de membrana mediante presión son aquellas en las cuales la fuerza actuante es una diferencia de presión a través de la membrana. Dentro de este grupo se encuentran, ósmosis inversa, nanofiltración, ultrafiltración y **microfiltración**, siendo esta ultima el tema principal de esta tesis.

En las operaciones de permeado, que son aquellas en las cuales la fuerza impulsora es la diferencia de actividad a través de la membrana, cuando se aplican a soluciones el solvente es el que se transfiere a través de la membrana, se encuentran: el permeado gaseoso (PG), la pervaporación (PV), stripping de membrana (SM) y destilación de membrana (DM). Las operaciones de diálisis, se aplican a soluciones en las que el soluto es el que se transfiere a través de la membrana, la fuerza motriz es una diferencia de potencial eléctrico. En este grupo se encuentran, la diálisis (DA) y la electrodiálisis (ED) (AWWARF, 1998).

**Tabla 2.4** Operaciones de membranas técnicamente relevantes en el tratamiento de aguas

| Operación de membrana    | Fuerza directora            | Mecanismo de separación                | Estructura de membrana       |
|--------------------------|-----------------------------|--|------------------------------|
| Microfiltración          | Presión                     | Cribado                                | Macroporos                   |
| Ultrafiltración          | Presión                     | Cribado                                | Mesoporos                    |
| Nanofiltración           | Presión                     | Cribado+(solución-difusión+ exclusión) | Microporos                   |
| Ósmosis inversa          | Presión                     | Solución-difusión + exclusión          | Densa                        |
| Pervaporación            | Actividad (presión parcial) | Solución-difusión                      | Densa                        |
| Arrastre de membranas    | Actividad (presión parcial) | Evaporación                            | Macroporos (membrana de gas) |
| Destilación de membranas | Actividad (temperatura)     | Evaporación                            | Macroporos (membrana de gas) |
| Diálisis                 | Actividad (concentración)   | Difusión                               | Mesoporos                    |
| Electrodiálisis          | Potencial eléctrico         | Intercambio iónico                     | Intercambio iónico           |

*Fuente: adaptado de AWWARF, 1998*



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

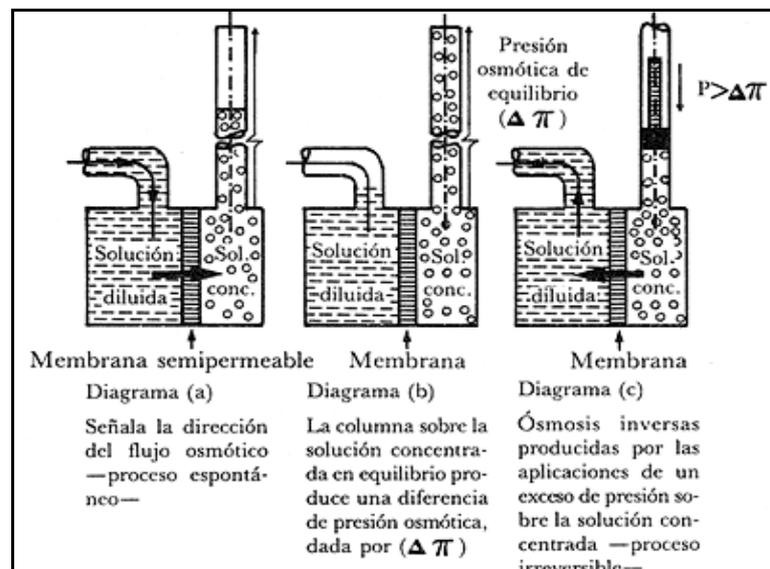
### Ósmosis inversa (OI)

Es una operación de membrana donde el solvente pasa espontáneamente de una solución menos concentrada a otra más concentrada, a través de una membrana semi-permeable, especialmente fabricada para retener sales y solutos de bajo peso molecular. Entre ambas soluciones existe una diferencia de energía, originada en la diferencia de concentraciones. El solvente pasará en el sentido indicado hasta alcanzar el equilibrio. Si se agrega a la solución más concentrada, energía en forma de presión, el flujo de solvente se detendrá cuando la presión aplicada sea igual a la presión Osmótica Aparente entre las 2 soluciones. Esta presión Osmótica Aparente es una medida de la diferencia de energía potencial entre ambas soluciones. Si se aplica una presión mayor a la solución más concentrada, el solvente comenzará a fluir en el sentido inverso. Se trata de la **Ósmosis Inversa**. En el equilibrio, la diferencia de presiones entre los dos compartimentos es la presión osmótica de la solución salina.

La osmosis inversa permite la eliminación de hasta el 99,8% de las sales disueltas y el 99,99% de las bacterias y virus, se consigue así la desalación y potabilización de las aguas marinas ([www.everglades.es](http://www.everglades.es)).

Para producir agua pura de una solución salina es necesario aplicar una presión superior a la presión osmótica de la solución. Así mismo, para obtener flujos o caudales adecuados debe aplicarse por lo menos el doble de la presión osmótica, así por ejemplo para aguas marinas se aplican presiones de 5 a 8 bar.

Fig. 2.5 Principio básico de la OI





## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

### Nanofiltración (NF)

La Nanofiltración es una tecnología de membrana desarrollada para enfrentar varias necesidades del tratamiento de agua residuales y purificación de agua. Se considera que tiene características funcionales únicas en cuanto al ablandamiento y remoción de compuestos orgánicos solubles. Su efectividad depende de las características del agua de alimentación, especialmente de la fuerza iónica, concentraciones y tipos de cationes divalentes y del contenido de materia orgánica natural (Wang & Chung, 2005).

Las membranas de Nanofiltración se utilizan en la potabilización de agua, tratamiento de aguas residuales, se usa ampliamente para la remoción de contaminantes orgánicos, naturales y sintéticos; sales y color (Agenon et al., 2003).

La NF, ha tenido éxito en el tratamiento de agua superficial porque ofrece numerosas ventajas con respecto a las técnicas convencionales, por ejemplo: elimina la desinfección química, remueve contaminantes biológicos y requiere de presiones de operación bajas, con respecto de las presiones aplicadas en la osmosis inversa, ya que las membranas de NF presentan una presión osmótica pequeña (Shalan, 2002).

#### Propiedades de las membranas de NF:

- Tienen un alto rechazo para los iones divalentes (Ca, Mg, etc.), y multivalentes.
- Reducen notablemente la dureza del agua, acompañada de una reducción parcial y simultánea del sodio.
- Reducen parcialmente los sólidos disueltos totales.
- Rechazan las especies orgánicas, (peso molecular mayor de 200-300).
- Eliminan los precursores de trihalometanos (THM), así como bacterias, virus y parásitos.
- Tienen menor tendencia, que la O.I. al ensuciamiento.
- Operan a baja presión, usualmente en el rango de 3.5-20 bar, con altas conversiones. [www.everglades.es](http://www.everglades.es)

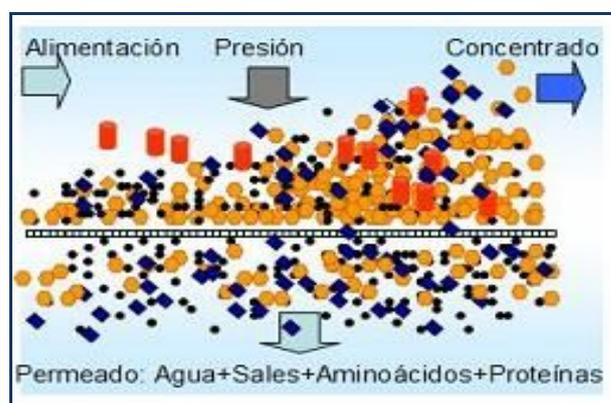


Fig. 2.6 El proceso de la NF



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

### Ultrafiltración (UF)

En el tratamiento de aguas la ultrafiltración se considera como una operación de clarificación y desinfección por membranas. Las membranas utilizadas son porosas y permiten sólo el rechazo de solutos gruesos (macromoléculas), todos los microorganismos como virus o bacterias y otras clases de partículas. Los poros de las membranas de ultrafiltración pueden retirar de los fluidos partículas de 0.001 – 0.1  $\mu$ m. Como en la ultrafiltración no se retienen los solutos de bajo peso molecular no se considera la contrapresión osmótica y la presión de trabajo se mantiene baja, 0.05 a 0.5 bar.

Las configuraciones de los módulos habituales para esta tecnología son la **capilar** (fibra hueca), **tubular** y de **arrollamiento en espiral**.

Dentro de las aplicaciones donde interviene fundamentalmente la UF se encuentran:

- Eliminación de sólidos en suspensión, turbidez, microorganismos y COT.
- Tratamiento de aguas superficiales ó de pozos.
- Pretratamiento para Osmosis Inversa y Nanofiltración.
- Tratamiento de aguas residuales (Municipales y Urbanas).

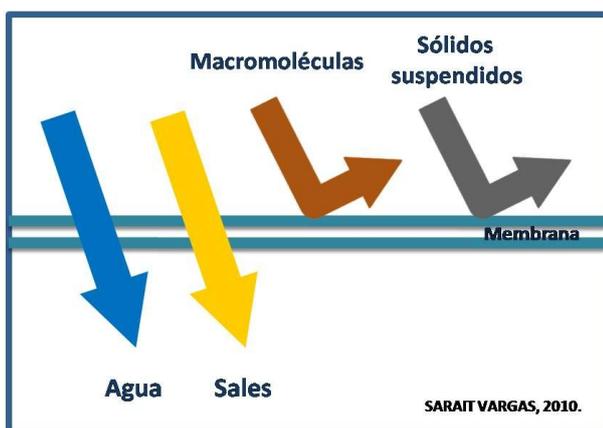


Fig. 2.7 Retención de la UF

Las características que presenta un permeado después de pasar por una membrana de ultrafiltración se muestran a continuación:

| <u>Constituyente</u> | <u>Remoción</u>     |
|----------------------|---------------------|
| Partículas           | > 1 $\mu$ m > 6 log |
| SDI filtrado         | < 2                 |
| Virus                | > 5 log             |
| Giardia/Cryptosp.    | > 6 log             |
| Turbidez             | < 0.06 UTN          |
| COT (reducción)      | 25 – 50%            |

Fuente: [www.everglades.es](http://www.everglades.es)



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

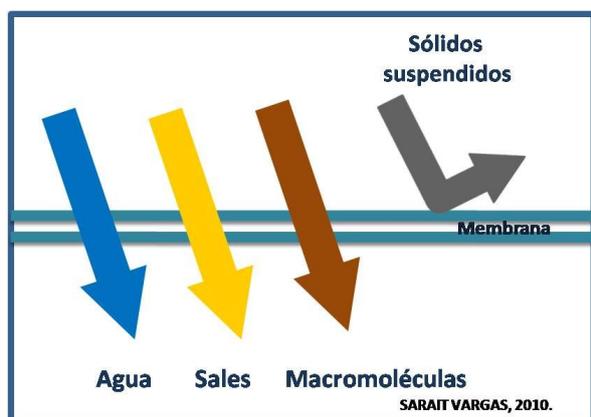
### Microfiltración (MF)

La Microfiltración es la más antigua de las tecnologías de membranas actuadas por presión. Las membranas de microfiltración presentan los poros más amplios en la categoría de las membranas, como consecuencia de su gran tamaño de poro, se utiliza principalmente para la eliminación de partículas y microbios. Su diferencia principal respecto a la UF es el tamaño del poro de la membrana, los de MF son  $\geq 0.1 \mu\text{m}$ . Los métodos para crear estos poros son irradiación, elongación, inversión térmica y otras técnicas sobre un soporte de polímeros porosos como el polisulfonato o materiales cerámicos.

Los módulos de microfiltración que se utilizan habitualmente son de fibra hueca y tubular. Ambas configuraciones permiten el retrolavado de los módulos.

El uso de una membrana de microfiltración en una planta de filtración de agua potable permite abordar en un solo paso algunos de los problemas más discutidos con respecto a las tecnologías actuales (Fane, 1994; Jacangelo, 1995). Estos problemas se mencionan a continuación:

- Remoción de quistes de *Giardia*, de *Cryptosporidium*, Coliformes y otros parásitos, así como sólidos suspendidos.
- Reducción de virus
- Reducción del uso de desinfectantes químicos.
- Reducción de productos químicos de sedimentación y
- Reducción de lodos que necesitan disposición.



A continuación se presentan resultados típicos obtenidos en el tratamiento de aguas superficiales a través de la microfiltración (Mourato, 1997).

|   |                     |
|---|---------------------|
| <i>Giardia</i> y <i>Cryptosporidium</i> | No detectables      |
| Coliformes                              | > 6 log de remoción |
| Sólidos suspendidos                     | < 10 UFC/100 ml     |
| Conteo de partículas                    | No detectables      |
| Turbiedad                               | < 3 partículas/ml   |
|   | < 0,1 UTN           |



### 2.4.2.2 CONFIGURACIÓN DE MEMBRANAS

Una membrana es un film delgado que separa dos fases, con diferencia de potencial químico entre ellas y actúa como una barrera selectiva al transporte de materia. Es un material funcional no pasivo, es decir que, aunque las membranas se caractericen por su estructura o rendimiento (caudales y selectividades), dependen de la naturaleza de los elementos contenidos en las dos fases y de la fuerza directora que se les aplica. Por eso las membranas se clasifican de acuerdo a su estructura.

#### CLASES DE MEMBRANAS

Las membranas selectivas, semipermeables pueden clasificarse según el **mecanismo de separación, la morfología física y la naturaleza química.**

#### SEGÚN EL MECANISMO DE SEPARACIÓN

Dependen de las propiedades específicas de los componentes que se van a eliminar o retener selectivamente por la membrana, pueden ser:

- Basadas en las diferencias de tamaño. Operación: Microfiltración, Ultrafiltración y Diálisis.
- Basadas en las diferencias de solubilidad y difusividad de los materiales en la membrana (mecanismo solución-difusión). Operación: Osmosis Inversa.
- Separación con base en diferencias en las cargas de las especies a separar. Operación: Electroquímica, Electrodiálisis.

La clasificación de las membranas según los mecanismos de separación pueden ser de tres clases, **porosas, no porosas o densas y de intercambio iónico.**

#### ***Membranas porosas (efecto criba)***

Estas membranas son de poros finos, AWWARF 1998, menciona que la clasificación según el tamaño de los poros, adoptada por la Unión Internacional de química pura y aplicada (IUPAC) es:

- Macroporos, mayores de 50 nm.
- Mesoporos, de 2 a 50 nm.
- Microporos, menores de 2 nm.



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Las membranas de microfiltración, ultrafiltración y nanofiltración están clasificadas como porosas. Las de MF contienen macroporos y las de NF contienen microporos. Las membranas de NF se consideran una clase intermedia entre membranas porosas y no porosas, pues como se observó en la Tabla 2.3, en la transferencia de masas de esta operación además se consideran los efectos de solución-difusión y exclusión.

### **Membranas no porosas o densas (mecanismo solución-difusión)**

Se consideran medios densos, la difusión de especies se realiza en el volumen libre presente entre las cadenas macromoleculares del material de la membrana. Las membranas de ósmosis inversa corresponden a esta categoría.

### **Membranas de intercambio iónico**

Son una clase especial de membranas no porosas, están compuestas por geles hinchados que portan cargas positivas, membranas de intercambio aniónico, o negativas, membranas de intercambio catiónico.

### **DE ACUERDO A LA MORFOLOGÍA**

En las operaciones de membrana por presión y permeado, el flujo del permeado es inversamente proporcional al espesor de la membrana, estas membranas se llaman anisotrópicas y están compuestas por una capa muy fina, llamada película, la cual se soporta sobre una capa subyacente que es más espesa y porosa. La capa pelicular es la responsable de las funciones más importantes de la membrana, pues de ella dependen el flujo y la selectividad. El espesor de esta película es de 0.1 a 0.5  $\mu\text{m}$ , aproximadamente, que equivale al 1% del espesor de la capa porosa subyacente. La capa subyacente únicamente actúa como soporte mecánico. Las membranas anisotrópicas se producen sobre un substrato poroso (por ejemplo, un poliéster filamentoso trabado) y pueden ser de dos clases, asimétricas o mixtas:

- Las membranas asimétricas están preparadas con base en un mismo material.
- En las membranas mixtas, la capa superior y la subcapa son de materiales diferentes, generalmente la capa porosa es una membrana asimétrica.



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

### SEGÚN SU GEOMETRÍA

Las membranas pueden ser planas o cilíndricas, según su geometría. Las membranas cilíndricas pueden ser:

- Tubulares con diámetro interno mayor de 3mm
- Tubulares de fibra hueca con diámetro interno menor de 3mm

Las fibras huecas son geoméricamente las membranas tubulares más pequeñas disponibles, con diámetros exteriores entre 80 y 500 m. Se utilizan en ósmosis inversa, permeado gaseoso y hemodiálisis. En ultrafiltración y microfiltración se usan diámetros mayores y se llaman también membranas capilares (AWWARF, 1998).

### DE ACUERDO A LA NATURALEZA QUÍMICA

Las membranas sintéticas se pueden realizar a partir de materiales orgánicos (polímeros) o inorgánicos (metal, cerámica, vidrio, entre otros).

#### *Membranas orgánicas*

Generalmente se basan en polímeros hidrófilos, teniendo en cuenta las necesidades del proceso y la vida de la membrana, los más usados son la celulosa y sus derivados, estos polímeros presentan poca tendencia a la absorción y se utilizan en todos los procesos de presión (MF,UF,NF,OI), hemodiálisis y permeado gaseoso. Para la desinfección y clarificación de aguas se utilizan las membranas de ésteres de la celulosa (di y triacetato), por su resistencia al cloro. Este material también se utiliza para desalación, desendurecimiento, desinfección y clarificación, a pesar de su sensibilidad a los ácidos, la hidrólisis alcalina, la temperatura y la degradación biológica.

Otras membranas poliméricas hidrófilas son las que están hechas con poliamidas, utilizadas principalmente en desalación, por su propiedad de selectividad al permeado y su buena estabilidad térmica, química e hidrofílica. Sin embargo estas membranas son muy sensibles a la degradación oxidativa y no toleran su exposición al cloro.

Las membranas de ultrafiltración y hemodiálisis también se fabrican en poliacrilonitrilo (PAN), que es menos hidrófilo que otros polímeros como la celulosa y sus derivados o las poliamidas, pero no tiene la propiedad de permeabilidad selectiva y por lo tanto no se utiliza en OI (AWWARF, 1998).



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

---

Otra clase de polímeros son las polisulfonas (PSf) y las polietersulfonas (PES), estos polímeros no son hidrófilos y tienen una tendencia alta a la adsorción, y una buena estabilidad química, mecánica y térmica. Estos polímeros se usan en membranas de ultrafiltración, como soporte de membranas mixtas, o en hemodiálisis. Las membranas PES y PSf se modifican mezclándolas con polímeros hidrófilos para mejorar las propiedades anti ensuciamiento.

Los polímeros hidrófobos más utilizados como membranas macroporosas, por su alta estabilidad química y térmica son, el politetrafluoretileno (PTFE), poli fluoruro de vinilideno (PVDF), polietileno (PE), policarbonato (PC) o isopolipropileno (PP). El PP se usa como membrana de microfiltración en el tratamiento de aguas, aunque es sensible al cloro.

### ***Membranas inorgánicas***

Los materiales inorgánicos poseen mayor estabilidad química, mecánica y térmica que los polímeros orgánicos, la desventaja es que son más frágiles y más costosos que los orgánicos. De allí que su uso se limite a la industria química, en el tratamiento de fluidos agresivos o de alta temperatura y a las industrias farmacéutica y láctea. Las membranas de cerámica son las más representativas de esta categoría, los materiales cerámicos son óxidos, nitruros o carburos de metales como aluminio, zirconio o titanio.



### **2.4.2.3 CONFIGURACIÓN DE MÓDULOS**

Las membranas operadas por presión deben estar soportadas estructuralmente para resistir las presiones a las que se trabaja. La unidad operacional en la que se colocan las membranas se llama módulo. Esta unidad está compuesta por membranas, estructuras de soporte de la presión, puertas o puertos de entrada de la alimentación, distribuidores de caudal y puntos de salida y drenaje del permeado y concentrado. Una entidad de membrana se llama elemento y estos son los que se emplean para construir el módulo (Salazar, 2006).

Al diseñar un módulo se debe por un lado, asegurar a nivel de la membrana una circulación suficiente del fluido que va a ser tratado, para limitar los fenómenos de concentración, polarización y depósito de partículas; y por otro, producir un módulo compacto, que proporcione una máxima superficie de intercambio por unidad de volumen; esto con el fin de reducir los costos del módulo para un volumen determinado de fluido tratado, aunque se aumente el costo energético de la separación, teniendo en cuenta que, a una velocidad de circulación alta y secciones de paso pequeñas se produce una gran cantidad de pérdida de carga. Además, se deben evitar fugas entre los compartimentos de alimentación y permeado, haciendo un cuidadoso montaje del módulo para evitar pérdidas.

#### **CLASES DE MÓDULOS**

El módulo debe ser de volumen pequeño, fácil de limpiar, de ensamblar y montar. Los módulos pueden ser de cuatro clases, placa y bastidor, arrollamiento espiral, tubular y de fibra hueca.

#### **PLACA Y BASTIDOR**

Están hechos de membranas de hoja plana y placas de soporte. La alimentación circula entre las membranas de dos placas adyacentes, atravesando los conjuntos de membranas que se ensamblan a partir de membranas intercambiables, ya sea individuales o por paquetes. El espesor de la lámina líquida es de 0,5 a 3 mm. La densidad de compactación de las unidades de placa y bastidor es de 100 a 400 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>.

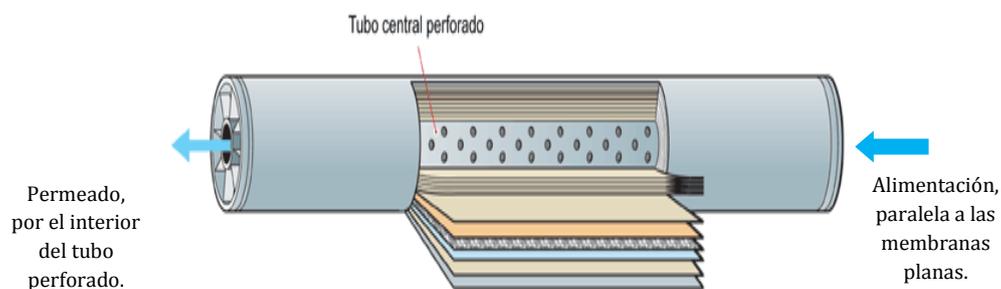
Las placas aseguran el soporte mecánico de la membrana y el drenaje del permeado y deben ser corrugadas en el lado de la alimentación para aumentar la transferencia de masa. La circulación se puede disponer en paralelo o en serie. Las unidades pueden desmontarse fácilmente para realizar la limpieza o el cambio manual de las membranas.



## ARROLLAMIENTO ESPIRAL

Está compuesto por envolventes de membranas planas que van enrolladas por pares encerrando una hoja flexible porosa. Cada par de membranas va sellado por tres de sus bordes y el borde abierto está conectado y enrollado sobre un tubo perforado que transporta el permeado. Cada envolvente va separada en el lado de la alimentación por un espaciador, que mantiene abierto un canal de flujo para la alimentación y permite inducir turbulencias para reducir la concentración de polarización y aumentar la transferencia de masa con baja energía de entrada. El espaciador puede ser una malla o un separador corrugado, que incrementa las características de manejo de sólidos en los módulos tipo espiral. La alimentación fluye paralela al eje del tubo del permeado (AWWARF, 1998).

El diámetro de un elemento es máximo de 300 mm y la longitud hasta 1,5 m. En una sola vasija cilíndrica de presión pueden insertarse de dos a seis elementos. Estas son más compactas ( $700$  a  $1.000$   $m^2/m^3$ ) y producen una pérdida de carga menor que los módulos de placa y bastidor.



**Fig. 2.9** Configuración en Espiral  
Adaptado: [www.dracemedioambiente.com](http://www.dracemedioambiente.com)

Estos módulos son más sensibles a la obstrucción que los sistemas de lámina plana y canal abierto, debido al espaciador, además no pueden utilizarse directamente con agua turbia sin pretratamiento. Se desarrollaron inicialmente para ósmosis inversa, pero sus ventajas se han aplicado también en operaciones de ultrafiltración.

## TUBULAR

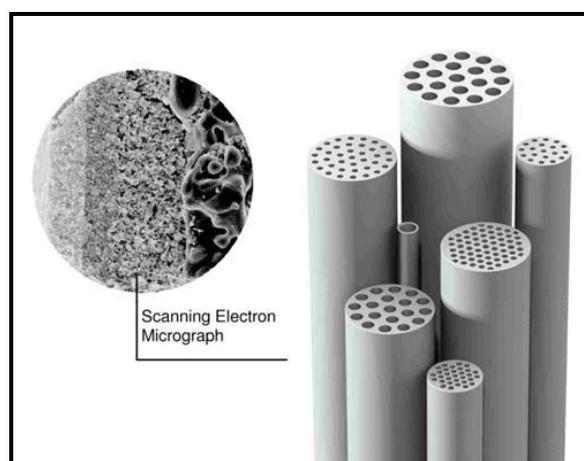
Es la configuración más simple, la membrana se moldea sobre la pared interior de un tubo poroso que sirve de soporte, estos tubos tienen diámetros interiores de 6 a 40 mm, el más usado en el tratamiento de aguas residuales es el de 13 mm. Los tubos individuales se colocan en el interior de mangas de acero inoxidable o de PVC en plantas a pequeña escala, o agrupadas en haces de 3 a 151 tubos en un alojamiento cilíndrico con placas finales adecuadas.



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Las membranas tubulares de diámetros mayores son autoportantes sólo a presiones de trabajo bajas, y los elementos de membrana están conectados en paralelo o en serie, en una disposición de cubierta en tubo. Cuando se requiere alta velocidad de circulación (3 m/s), las membranas se disponen en paralelo dentro de la vasija para reducir la pérdida de carga a lo largo de las membranas individuales. Y cuando se requieren velocidades bajas (1 m/s) las membranas se conectan en serie. Las membranas inorgánicas pueden disponerse sobre soportes cerámicos multicanales, hasta con 19 canales de flujo paralelo. Cada elemento de membrana multicanal está alojado individualmente o en haces paralelos, hasta de 99 elementos, formando módulos con un área superficial de 0,2 a 7,4 m<sup>2</sup> (Salazar, 2006).

Estos módulos no necesitan una prefiltración fina de alimentación, las membranas son menos propensas al ensuciamiento, debido a que proporcionan al flujo un camino hidrodinámico simple, además se limpian mecánicamente de una forma más sencilla. Se adaptan bien para el tratamiento de fluidos muy viscosos.



**Fig. 2.10** Configuración Tubular  
www.pall.com

La desventaja del diseño tubular es que como tienen una baja densidad de compactación se incrementa el costo de la inversión. Y la ventaja es que las membranas tubulares pueden tolerar cargas de materia en suspensión mucho más grandes que otras configuraciones.

### FIBRA HUECA

La fibra hueca se asimila a un cilindro poroso de pared gruesa. Las fibras están reunidas en un haz de millones. El flujo de alimentación va por dentro de las fibras (configuración interior-exterior) o por fuera de las fibras (configuración exterior-interior). En el primer caso la hermeticidad de agua entre flujos de alimentación y permeado se asegura por una resina que forma un plato plano en cada final de haz. Después del endurecimiento de la resina el haz se corta de tal manera que los extremos de las fibras aparecen abiertas. En la configuración interior-exterior, el haz tubular se dispone en forma de U; las fibras se sellan sólo por un lado o final.



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES



**Fig. 2.11** Configuración Fibra Hueca  
[www.geafiltration.com](http://www.geafiltration.com)

La densidad del empaquetado es inversamente proporcional al diámetro, y por ello, estas unidades son muy compactas, desde  $1.000 \text{ m}^2/\text{m}^3$  en módulos de UF, hasta  $10.000 \text{ m}^2/\text{m}^3$  en módulos de OI. Varios haces pueden disponerse en un solo alojamiento obteniendo unidades con áreas superficiales grandes, capaces de producir hasta  $220 \text{ m}^3/\text{día}$  en UF y  $140 \text{ m}^3/\text{día}$  en OI. Las velocidades de trabajo en módulos de fibra hueca son bajas y los módulos pueden operar incluso sin circulación (modo final ciego). Luego las fibras huecas trabajan en zona de flujo laminar, aunque los empujes pueden ser altos, debido al flujo pequeño en los canales (Salazar, 2006).

La ventaja que ha llevado al empleo de fibras huecas en MF y UF en el tratamiento de agua, es la capacidad de barrido debido a que las fibras son autosoportantes. En UF el barrido se hace sometiendo el permeado a una presión mayor que la de alimentación. El cambio de dirección del flujo a través de la pared de la fibra hace desprender la capa de partículas depositadas en la superficie. La torta se transporta fuera del módulo por el flujo circulante que la atraviesa. En MF como el diámetro de los poros es mayor también se utiliza el barrido por aire.



## **2.5 MICROFILTRACIÓN**

### **2.5.1 GENERALIDADES DE LA MICROFILTRACIÓN**

Las membranas de microfiltración (MF) se están usando cada vez más en el campo del tratamiento de agua potable y agua residual. En el caso de algunas aplicaciones, las membranas MF ya constituyen una tecnología comprobada. Esto incluye la remoción de quistes de *Giardia* y *Cryptosporidium*, así como la remoción de la turbiedad mediante la microfiltración.

La filtración mediante membranas sigue el principio de la separación de partículas basada en el tamaño de los poros y en su distribución. Las membranas de microfiltración tienen tamaños de poro que varían de 0.075 micrones a 5 micrones. Según la membrana seleccionada, se podrán separar sólidos suspendidos de más de 0.45 micrones, bacterias, quistes y muchos otros parásitos cuyo diámetro sea mayor que el del poro más grande de la membrana (Mourato, 1997).

Los procesos de membranas de MF utilizan la presión como fuerza motriz para hacer pasar el agua a través de la membrana, reteniendo contaminantes con tamaño de partícula superior al tamaño nominal de poro de la membrana.

### **APLICACIONES DE LA MICROFILTRACIÓN**

Hay varias aplicaciones de la MF en la industria del agua. Un uso de la MF se basa en los requerimientos en cuanto a la mejor eliminación de partículas y microorganismos de los suministros del agua; teniendo en cuenta el aumento de las restricciones en cuanto a las concentraciones y número de productos químicos que se emplean en el tratamiento del agua.

En algunas aplicaciones de MF para eliminación de partículas y microorganismos no se añaden productos químicos. En otras se usan procesos de coagulación o adsorción como pretratamiento a la MF, como la MF ofrece muchas ventajas respecto al tratamiento convencional del agua se han probado varias aplicaciones a escala real. Un ejemplo de esta aplicación de MF comprende, cribado, MF y desinfección.

Otra aplicación de esta tecnología es la eliminación de materia orgánica natural o sintética. En la operación normal la eliminación de materia orgánica por parte de la MF es mínima, sin embargo, cuando se realiza después de un pretratamiento se incrementan estas eliminaciones y se retarda el ensuciamiento de la membrana. Un ejemplo comprende precibado, pretratamiento, MF y desinfección.

Otras aplicaciones implican el uso de MF como pretratamiento para OI y NF. Las dos se han empleado sobre aguas subterráneas para desalación o eliminación de dureza. Sin embargo, con la necesidad creciente de la recuperación del agua, la OI está siendo empleada en instalaciones para tratamiento de aguas residuales, con miras a su reutilización.



## VENTAJAS

Las ventajas relacionadas con el uso de membranas de Microfiltración en el tratamiento de agua residual son:

- ✓ Efecto de barrera absoluta para microorganismos.
- ✓ Menor requerimiento de cloro u ozono para la desinfección.
- ✓ Uso reducido de productos químicos.
- ✓ Poco requerimiento de energía.
- ✓ Menor tamaño de la planta.

### 2.5.2 PARAMETROS DE DISEÑO

Para comprender mejor el proceso de operación de la membrana de Microfiltración, es necesario definir algunos de los parámetros de diseño más importantes como son: presión transmembranal, caudal de permeado, taponamiento o ensuciamiento, flujo cruzado, peso molecular de corte.

#### PRESIÓN TRASMENBRANAL

La presión transmembranal es la relación entre la diferencia de presiones de entrada y salida, y la presión del permeado, como lo indica la siguiente ecuación.

$$P_{t_m} = \frac{P_{ent} - P_{sal}}{P_p}$$

Donde,

$P_{ent}$  = presión de entrada al módulo

$P_{sal}$  = presión a la salida

$P_p$  = presión del permeado

#### CAUDAL DE PERMEADO

El caudal de permeado se define por la ley de Darcy, cuando el agua es limpia y se pasa a través de una membrana sin materiales depositados en su superficie o en el interior de los poros (AWWARF, 1998), ésta ley se representa por la ecuación:

$$J = \frac{\Delta p}{\mu R_m}$$

Donde,

$J$  = caudal de permeado

$\Delta p$  = caída de presión a través de la membrana  
= viscosidad absoluta del agua

$R_m$  = resistencia hidráulica de la membrana  
limpia



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Sin embargo, cuando la mayor parte del permeado pasa por arrastre a través de una red de poros capilares de la membrana, en operaciones de microfiltración y ultrafiltración, para determinar el caudal de permeado es necesario considerar otras variables (AWWARF, 1998), con lo cual, la ecuación anterior se expresa de la siguiente manera:

$$J = \frac{f r_{\text{poro}}^2 \Delta p}{8 \mu \theta \delta_m}$$

**Donde,**

$J$  = caudal de permeado

$f$  = fracción del área del poro abierta sobre la superficie de la membrana

$r_{\text{poro}}$  = radio efectivo del poro

$\Delta p$  = caída de presión a través de la membrana

$\mu$  = viscosidad absoluta del agua

$\theta$  = factor de tortuosidad del poro

$\delta_m$  = espesor efectivo de la membrana

### TAPONAMIENTO DE LA MEMBRANA

Las partículas o materiales que se encuentran en el agua, son acumuladas cerca, sobre o en el interior de las membranas, con lo cual, pueden bloquearla, constreñir los poros y formar una capa de resistencia adicional al flujo a través de la membrana; con una consecuente reducción de su permeabilidad. Las características y situación de los materiales depositados, son relevantes en la determinación de la magnitud y reversibilidad de la disminución del caudal permeado.

El taponamiento de la membrana se define como una reducción en el caudal de permeado que no puede recuperarse con la aplicación de un lavado químico o hidráulico. Las reducciones en el caudal de permeado pueden ser reversibles o irreversibles. El ensuciamiento irreversible refleja condiciones extremas a las que ha sido expuesta la membrana durante la operación, como elevadas presiones transmembranal o mala calidad del agua de alimentación, que con el tiempo hacen disminuir la posibilidad de recuperar el caudal de permeado, independiente de los procedimientos que se realicen con este fin. El ensuciamiento reversible se refiere al retiro de materiales y la recuperación del caudal de permeado después de la limpieza (AWWARF, 1998).

### FLUJO TANGENCIAL

Es la tasa de recirculación del agua de alimentación a través de la membrana. Es un parámetro crítico para controlar el ensuciamiento. La velocidad del flujo tangencial debe mantener los materiales sólidos y orgánicos en suspensión dentro del agua, para evitar que se depositen en las membranas, y de esta manera controlar el ensuciamiento. La figura 2.21 muestra la acumulación de materiales en presencia de flujo tangencial.



En módulos de fibra hueca la velocidad de flujo tangencial se define con la ecuación,

$$VFC = \frac{\Delta p \times d^2 \times 10^6}{32 \times m \times l}$$

Donde,

$VFC$  = velocidad de flujo tangencial, cm/s

$d$  = diámetro interno de la fibra, cm

$\Delta p$  = pérdida de presión (pérdida de carga, presión de entrada menos presión de salida), bars.

$l$  = longitud de fibra de la membrana, cm

$m$  = viscosidad del agua, g/cms

$32$  = factor de conversión de unidades.

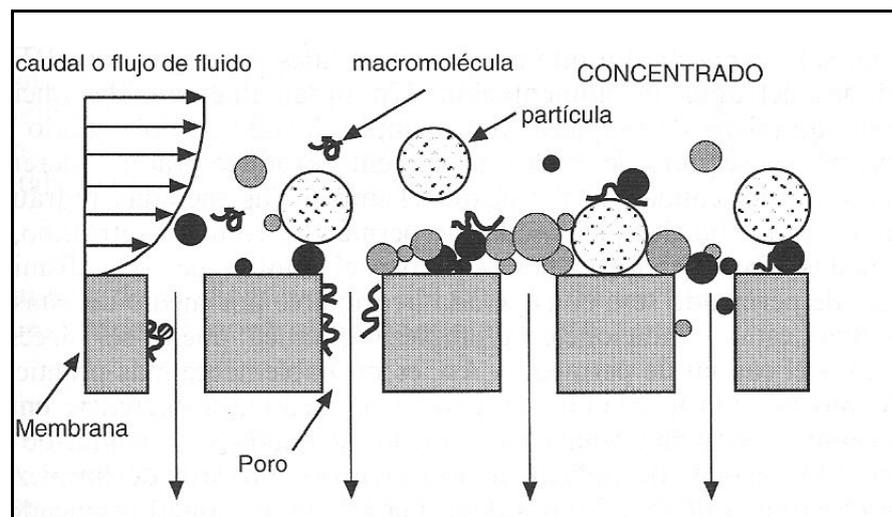


Fig. 2.12 Acumulación de materiales de una membrana en presencia de flujo tangencial  
Fuente: AWWARF, 1998

## PESO MOLECULAR DE CORTE

El peso molecular de corte es una especificación de las membranas, que describe la capacidad de retención y se refiere a la masa molecular de un soluto para el que la membrana tiene una capacidad de retención mayor del 90%. El peso molecular de corte indica la medida de dimensión del poro de la membrana, se mide en daltons. Los solutos más utilizados para la determinación del peso molecular de corte son cloruro sódico, sulfato magnésico, dextrosa y algunos colorantes.



### **2.5.3 CONFIGURACIONES DE MEMBRANAS Y MÓDULOS**

Las configuraciones más utilizadas por las membranas de Microfiltración, debido a que facilita su limpieza, son las de fibra hueca y la tubular ya que permiten el retrolavado de las membranas, con lo cual se controla el ensuciamiento producido por las partículas y materiales orgánicos.

#### **TUBULAR**

Las membranas tubulares de MF tienen diámetros que van de 1 a 2,5 cm. Las membranas de materiales cerámicos o de polímeros se colocan dentro de tubos plásticos reforzados por acero inoxidable o fibra de vidrio, sellados por medio de una empaquetadura y anillos de pinza. Pueden ser de uno o más canales de flujo. El agua de alimentación fluye a través de la luz del tubo y el permeado se recoge en la capa exterior del módulo.

Otro sistema de membranas utiliza tubos flexibles de poliéster tejido, dispuestos en posición vertical, llamados cortinas. En este sistema la pared no es la barrera principal de filtración. El rechazo principal de contaminantes se realiza en la capa de torta que se forma cerca de la entrada del ciclo de filtración, ésta recibe el nombre de filtración dinámica. La consistencia compacta de la torta facilita la retención de partículas menores que los poros de la pared del tubo (Salazar, 2006).

En los sitios donde es insuficiente la cantidad de partículas que producen el ensuciamiento para formar una barrera de filtrado, la torta se forma agregando un material como caolín o caliza antes de introducir el agua de alimentación. Esto se denomina precapa o prevestimiento de la membrana. Cuando se disminuye el caudal los tubos flexibles se lavan mecánicamente o se elimina la capa ensuciadora para restaurar la permeabilidad.

#### **MEMBRANAS CAPILARES DE FIBRA HUECA**

Las membranas de MF de fibra hueca están compuestas por miles de fibras encajadas en un módulo, encoladas en cada final con una resina epoxy o de uretano. El diámetro interno de las fibras, que es pequeño para evitar el colapso cuando se someten a presión, está entre 0.4 y 1.5 mm. La tensión física de las fibras de las membranas les permite ser retrolavadas.



**Fig. 2.13** Corte transversal del módulo con membranas de fibra hueca.

Fuente: [www.pall.com](http://www.pall.com)



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Los regímenes de la MF por fibra hueca pueden ser, interior-exterior o exterior-interior. Como el agua fluye a través de un canal concéntrico o luz, el interior-exterior de la membrana permite un buen control sobre la hidrodinámica del módulo. Por otra parte, es más difícil controlar el flujo de un módulo exterior-interior, por la dificultad de evitar la canalización del flujo y las zonas finales, así como el retrolavado cuando se compara con la membrana interior-exterior. Sin embargo, la ventaja de este régimen es que la pérdida de carga a través del módulo es menor.

AWWARF, 1998; señala las ventajas y desventajas de las configuraciones de fibra hueca y tubular, en aplicaciones de MF, se muestran a continuación de manera resumida.

**Tabla 2.5** Tabla comparativa de configuraciones: Tubular y Fibra Hueca.

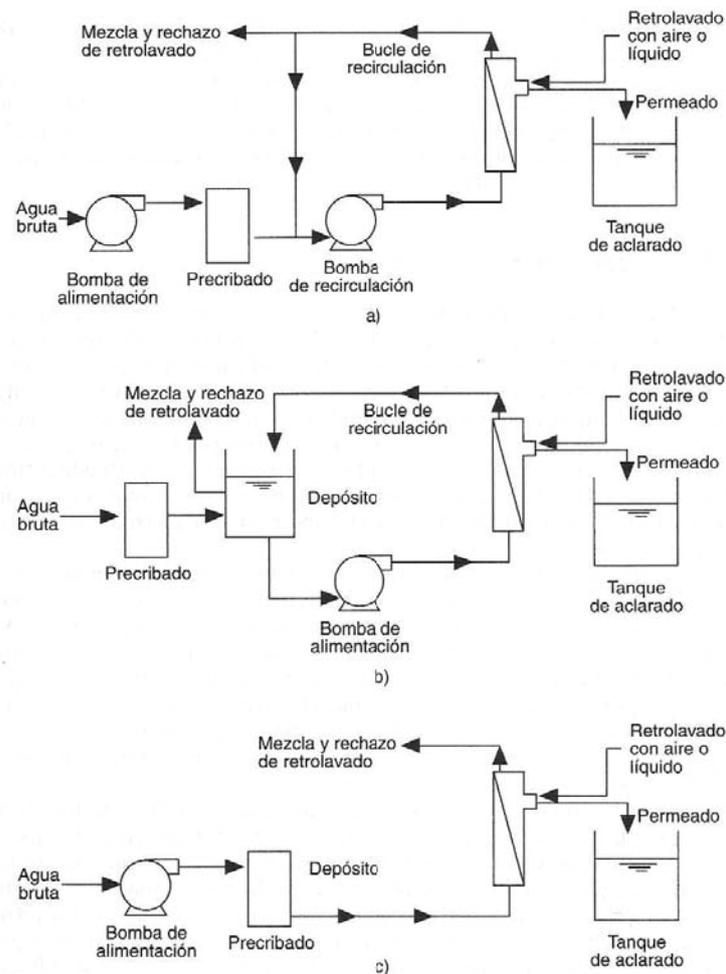
| TUBULAR  | FIBRA HUECA  |
|--|--|
| <b>Ventajas</b>  | <b>Ventajas</b>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Permiten el tratamiento de agua con alto contenido de sólidos y grandes partículas, debido a los diámetros grandes de los canales (1 a 2.5cm).</li> <li>✓ Es posible la aplicación de velocidades de flujo transversal alta (hasta 5m/s), con lo cual se controla el ensuciamiento.</li> <li>✓ Lo diámetros de los canales facilitan la limpieza, en algunos casos se puede hacer la limpieza mecánica.</li> <li>✓ Las membranas cerámicas tubulares presentan buena resistencia mecánica.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Bajas velocidades de flujo tangencial, rango de 0 a 2.5 m/s.</li> <li>✓ En los modelos de flujo interior-exterior las tasas de restricción son altas debido a las pequeñas luces del interior de la fibra.</li> <li>✓ Elevada relación área superficial/volumen o densidad de compactación de las membranas.</li> <li>✓ Las fibras pueden ser retrolavadas.</li> <li>✓ Bajas presiones transmembrana de 0.2 a 1 bar.</li> <li>✓ Baja caída de presión a través del módulo.</li> </ul> |
| <b>Desventajas</b>   | <b>Desventajas</b>   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>✗ Baja relación área superficial/volumen o densidad de compactación de las membranas.</li> <li>✗ Las membranas cerámicas son mas costosas comparadas con otras configuraciones de membrana.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>✗ Las membranas de pequeño diámetro de tubo son susceptibles a cegarse, si antes no se realiza un precibado.</li> <li>✗ El gran número de fibras en el módulo dificulta la detección de fugas de la membrana.</li> </ul>  |



## 2.5.4 DISEÑO Y OPERACIÓN DEL PROCESO DE MICROFILTRACIÓN

El diseño más sencillo comprende precibado del agua bruta y bombeo a presión sobre las membranas en forma directa o en flujo tangencial. El caudal de la membrana es función de la calidad del agua de alimentación y de los parámetros del sistema. Para la mayor parte de los sistemas de MF los caudales a través de la membrana son del orden de 80 a 200 l/h/m<sup>2</sup>. El área superficial total efectiva de la membrana se calcula con base en el área efectiva por módulo y el número de módulos. El área de un módulo normalmente es de 1 a 50 m<sup>2</sup>.

Generalmente la MF se opera de acuerdo a tres diseños de proceso, tal como se explica a continuación y se observa en la siguiente figura.



**Figura 2.14** Modos de operación de microfiltración:  
a) flujo tangencial; b) flujo tangencial con depósito; c) alimentación directa.  
Fuente: AWWARF, 1998



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

---

*En la primera*, la alimentación es bombeada con un flujo tangencial (tangencial transversal a la membrana). El agua que no pasa la membrana se recircula como concentrado delante del prefiltro y se mezcla con el agua de alimentación adicional. En este modo, la presión en el lado del concentrado de la membrana se conserva.

*En la segunda*, también se trabaja con flujo tangencial, sin embargo, el agua se recircula y se envía a un depósito abierto donde se mezcla con agua de alimentación adicional. Este sistema se utiliza cuando la presión del agua de alimentación de la planta es variable. El agua que va al depósito se regula con un dispositivo de control de nivel.

*En la tercera*, la MF se opera en una configuración de filtración directa, durante la cual no se aplica flujo tangencial. Esta se conoce como MF de final ciego. El agua prefiltrada se aplica directamente al interior de la membrana. En este modo hay ahorros de energía considerables, ya que no se realiza recirculación del concentrado, y los costos de instalación son más bajos porque no se requieren bombas o tuberías adicionales.



## **2.5.5 CALIDAD DEL AGUA MICROFILTRADA**

### **ELIMINACIÓN DE MICROORGANISMOS**

Una de las aplicaciones principales de la MF es la eliminación de microorganismos. En el tratamiento del agua los organismos patógenos principales son los virus, bacterias y protozoos. Los virus son los organismos más pequeños y su intervalo va de 0,02 a 0,08  $\mu$ m, seguidos por las bacterias (0,5 a 10  $\mu$ m) y quistes protozoarios y ovoquistes (3 a 15  $\mu$ m). El tamaño de los poros de MF está en el rango de 0,075 a 5  $\mu$ m. Luego, la eliminación de estos organismos (sin pretratamiento o agregación de partículas) es específica de cada membrana en particular y de la distribución del tamaño de los poros, cuando se considera la membrana solo como una barrera física.

### **ELIMINACIÓN DE PARTÍCULAS**

Varios estudios han evaluado la eliminación de partículas y turbidez por MF. Un sistema de MF de fibra hueca de polipropileno puede reducir la turbidez de un agua superficial (con turbidez entre 0,5 y 2,5 NTU) a niveles por debajo de 0,2 NTU.

En pruebas con membranas tubulares cerámicas la turbidez del permeado varió con el tamaño del poro, la turbidez del agua bruta fue de 25 NTU, las membranas de MF empleadas fueron de 0,05, 0,2 y 0,8  $\mu$ m y redujeron la turbidez a 0,4, 0,9 y 1,8 NTU, respectivamente. El pretratamiento con coagulantes aumentó la reducción de turbidez sobre la MF en las membranas de 0,05 y 0,2  $\mu$ m y no para la de 0,8  $\mu$ m, porque se incrementó la turbidez del permeado debido al paso de partículas de hidróxido metálico. En general la eliminación de partículas también varió con el tamaño del poro, disminuyendo la eliminación a medida que se incrementó el tamaño del poro. Con el uso del coagulante la membrana tubular de 0,05  $\mu$ m redujo la concentración de partículas en un 99%.

### **ELIMINACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA NATURAL**

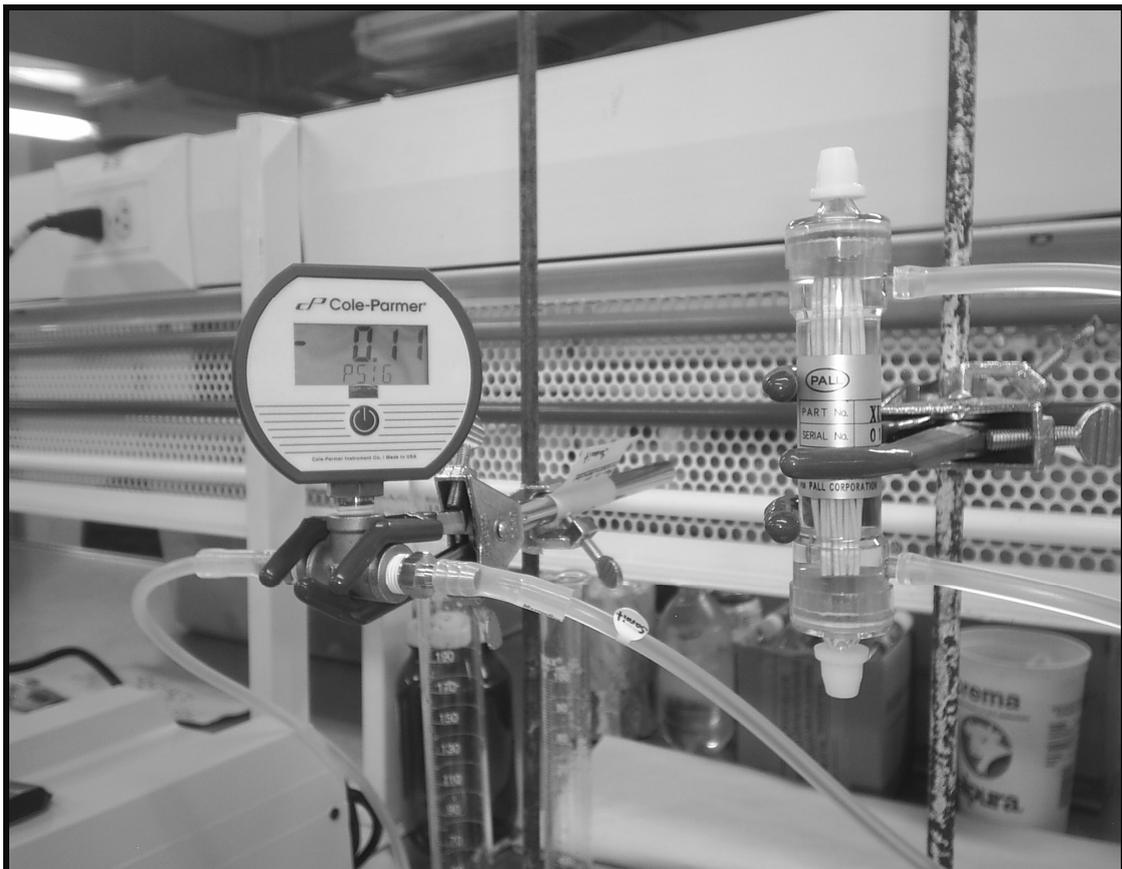
La eliminación de materia orgánica depende tanto de la variación del tamaño de los poros y de los materiales de las membranas de MF, como del agua. La adición de coagulantes como pretratamiento para MF aumenta la eficiencia en la eliminación de materia orgánica natural.

La presencia de formadores potenciales de trihalometanos del agua superficial puede reducirse en un rango del 15 al 60% por adición de 10 a 15 mg/l de cloruro férrico, como pretratamiento para la MF. En membranas tubulares de cerámica la coagulación produce reducciones de COT entre el 30 y 60%, y de formadores potenciales de trihalometanos cercanas al 30% (Salazar, 2006).



## CAPITULO 3

# DESARROLLO DE LA FASE EXPERIMENTAL





En este capítulo se expone la información que tiene que ver con la planificación y el desarrollo de este trabajo. Con respecto a la fase experimental se describe, la selección de la muestra, el punto de muestreo, la frecuencia del muestreo, las técnicas a realizar y los equipos utilizados para los análisis de laboratorio.

### 3.1 PROCEDENCIA DEL AGUA RESIDUAL

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Cerro del Agua (PTARCA), mejor conocida como "la planta de CU" está ubicada en la parte más baja de la Ciudad Universitaria, al noroeste del *campus*, en la esquina que forman la avenida Cerro del Agua y el Circuito Escolar y abastece de agua residual tratada a doce cisternas que están distribuidas en el *campus* universitario.

La planta fue diseñada para tratar **40 L/s** (3,456 m<sup>3</sup>/día) provenientes de diversas zonas del campus universitario, las cuales llegan a través de dos colectores, denominados como "Zona Antigua" y "Zona de Institutos", posteriormente se conectó un tercer colector proveniente de la colonia Copilco el Alto, denominado con el mismo nombre.

El tren de tratamiento de la planta es:

#### **Captación de aguas**

#### **Pretratamiento**

#### **Tratamiento secundario:**

- Sistema de Lodos Activados
- Sistema de Discos Biológicos Rotatorios
- Filtro Rociador

#### **Tratamiento terciario:**

- Filtros de Arena

#### **Desinfección**

La muestra simple, usada durante las pruebas del desarrollo experimental fue el efluente biológico secundario. El muestreo se realizó a la salida del filtro de arena ubicado después del sedimentador secundario (ver Fig. 1.5), tomando volúmenes de acuerdo a las pruebas a realizar: para SST, DBO<sub>5</sub> y T (1L, en frasco de plástico), Grasas y Aceites (1L, en frasco de vidrio), Coliformes Fecales (200ml, en bolsa estéril), Huevos de Helminto (5L, en garrafón de plástico).



### 3.2 PROGRAMA DE MUESTREO

#### PUNTO DE MUESTREO

El punto de muestreo, como ya se mencionó anteriormente, fue a la salida del filtro de arena ubicado después del sedimentador secundario; se eligió este punto ya que es el último lugar por donde pasa el agua tratada antes de pasar a la siguiente etapa que es la desinfección. Como se pretende integrar la Microfiltración al tren de tratamiento justo después del sedimentador secundario, esta fue la razón principal por la cual se eligió dicho punto.

#### FRECUENCIA DE MUESTREO

El muestreo se planificó de tal manera que se pudiese tomar el mayor número de muestras por semana y, que a la vez, se dispusiera del tiempo para realizar las pruebas de laboratorio respectivos. Se establecieron 5 días para toma de muestras, de lunes a viernes, solamente por la mañana; y las tardes para análisis de laboratorio, esto se realizó por dos semanas.

### 3.3 DESCRIPCIÓN DE LAS TÉCNICAS UTILIZADAS

#### SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES

Las aguas naturales o residuales con altos contenidos de sólidos suspendidos o sales disueltas no pueden ser utilizadas en forma directa por las industrias o por las plantas potabilizadoras. De ello se deriva el interés por determinar en forma cuantitativa estos parámetros (NMX-AA-034-SCFI-2001).

**Definición:** Sólidos suspendidos totales (SST), sólidos constituidos por sólidos sedimentables, sólidos y materia orgánica en suspensión y/o coloidal, que son retenidas en el elemento filtrante.

**Principio:** El principio de este método se basa en la medición cuantitativa de los sólidos y sales disueltas así como la cantidad de materia orgánica contenidos en aguas naturales y residuales, mediante la evaporación y calcinación de la muestra filtrada o no, en su caso, a temperaturas específicas, en donde los residuos son pesados y sirven de base para el cálculo del contenido de estos.



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

### Cálculos

Para conocer el contenido de sólidos suspendidos totales se utiliza la siguiente ecuación:

$$SST \left( \frac{mg}{L} \right) = \frac{(A - B) * 1000}{V} * 1000$$

Donde,

A= el peso del crisol con el filtro y el residuo seco (g)

B= el peso del crisol con el disco a peso constante (g)

V= el volumen de muestra (mL)

1000= para ajustar a mg

### Material y Equipo



Fig. 3.1 Kit básico para SST



Fig. 3.2 Estufa



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

### TURBIEDAD

**Definición:** la turbidez, es la propiedad óptica que tiene una determinada muestra para diseminar y absorber la luz. Por lo tanto es una medida de resistencia que ofrece el agua al paso de la luz, como consecuencia de la materia en suspensión y coloidal que contiene, cuanto más sólidos se encuentren en suspensión más sucia parecerá esta y más alta será su turbidez. La medición se realizó en un turbidímetro marca HACH, que mide la intensidad de la luz dispersa a 90 grados cuando un rayo pasa a través de una muestra de agua y se reporta en Unidades Nefelométricas de Turbidez (UNT).

#### Material y Equipo



Fig. 3.3 Turbidímetro

### DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO

**Definición:** Se basa en medir el oxígeno consumido por una población microbiana en condiciones en las que se ha inhibido los procesos fotosintéticos de producción de oxígeno en condiciones que favorecen el desarrollo de los microorganismos (NMX-AA-028-SCFI-2001).

El método se basa en medir la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para efectuar la oxidación de la materia orgánica presente en aguas naturales y residuales.

La medición se realizó en un espectrofotómetro marca SECOMAN, modelo PASTEL-UV, cuyo rayo de luz pasa a través de una muestra de agua y reporta los resultados en mg/L.



## Material y Equipo



Fig. 3.4 PASTEL U-V

## GRASAS Y ACEITES

Este método permite una estimación del contenido de grasas y aceites en aguas naturales, residuales y residuales tratadas al determinar gravimétricamente las sustancias que son extraídas con hexano de una muestra acuosa acidificada. La determinación de grasas y aceites es indicativa del grado de contaminación del agua por usos industriales y humanos.

En la determinación de grasas y aceites no se mide una sustancia específica sino un grupo de sustancias con unas mismas características fisicoquímicas (solubilidad). Entonces la determinación de grasas y aceites incluye ácidos grasos, jabones, grasas, ceras, hidrocarburos, aceites y cualquier otra sustancia susceptible de ser extraída con hexano (MNX-AA-005-SCFI-2000).

**Definición:** Las grasas y aceites (G y A), son los compuestos orgánicos constituidos principalmente por ácidos grasos de origen animal y vegetal, así como de hidrocarburos del petróleo que son extraídos de la muestra utilizando hexano como disolvente.

**Principio:** Este método se basa en la adsorción de grasas y aceites en tierra de diatomeas, los cuales son extraídos en un Soxhlet empleando hexano como disolvente. Una vez terminada la extracción se evapora el hexano y se pesa el residuo que ha quedado en el recipiente; siendo este valor el contenido de grasas y aceites.



### Cálculos

Las grasas y aceites recuperables en la muestra, se calculan usando la siguiente ecuación:

$$G y A \left( \frac{mg}{L} \right) = \frac{(A - B) * 1000}{V} * 1000$$

Donde,

A= el peso final del matraz de extracción (g)

B= el peso inicial del matraz de extracción (g)

V= el volumen de la muestra (L)

1000= para ajustar a mg

### Material y Equipo

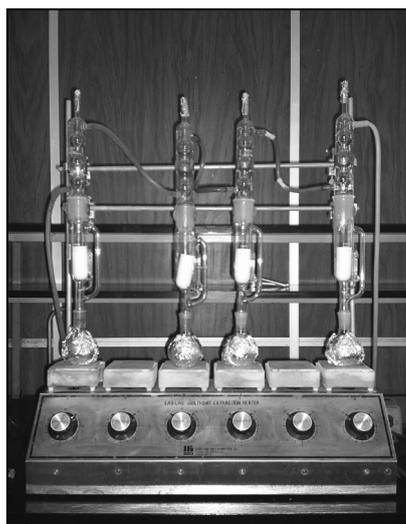


Fig. 3.5 Equipo de extracción Soxhlet



Fig. 3.6 Rotavapor durante la recuperación de Hexano



## COLIFORMES FECALES

La presencia y extensión de la contaminación fecal es un factor importante en la determinación de la calidad de un cuerpo de agua. El análisis de muestras de agua para determinar la presencia de miembros del grupo coliforme, que habitan normalmente en el intestino del hombre y otros animales de sangre caliente, da una indicación sensible de dicho tipo de contaminación. Dado que la capacidad de algunos miembros del grupo coliforme para sobrevivir en agua es limitada, sus números pueden emplearse también para estimar el grado de contaminación fecal (NMX-AA-102-SCFI-2006).

**Definición:** Coliformes fecales, comprende todos los bacilos aerobios o anaerobios facultativos, Gram negativos, no esporulados que fermentan la lactosa con producción de ácido y gas a  $44^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  en un plazo de 24 h.

**Principio:** El método se basa en la filtración de una muestra directa o una alícuota de la muestra a través de una membrana de celulosa que retiene los organismos, colocando la membrana ya sea en un medio de cultivo selectivo de agar lactosado o en un cojinete absorbente saturado con un medio líquido lactosado.

La membrana se incuba durante 24 h ya sea a  $35\text{-}37^{\circ}\text{C}$  para la detección de organismos coliformes, o alternativamente a  $44^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  para la presencia de organismos coliformes fecales.

Se lleva a cabo la cuenta directa de las colonias características desarrolladas sobre la membrana, y algunas de estas colonias se resiembran para pruebas confirmativas.

Finalmente se hace el cálculo del número de organismos coliformes, organismos coliformes fecales y *Escherichia coli* presuntiva que pueden estar presentes en 100 mL de la muestra.

### Cálculos

Las UFC, se calculan a partir de la siguiente expresión:

**Donde,**

**UFC<sub>c</sub>**= número contado de unidades formadoras de colonias en el volumen filtrado de la muestra

**V<sub>r</sub>**= es el volumen de referencia seleccionado para expresar la concentración de los microorganismos en la muestra

**V<sub>f</sub>**= volumen filtrado de muestra

$$\frac{\text{Colonias Coliformes Fecales}}{V_r} = \frac{(UFC_c)(V_r)}{V_f}$$



### Material y Equipo



Fig. 3.7 Kit básico para CF



Fig. 3.8 Baño maría

### HUEVOS DE HELMINTO

Ante la escasez de recursos hídricos, la explosión demográfica y el desarrollo industrial, la utilización de aguas residuales es una importante alternativa como fuente adicional de suministro, particularmente para riego agrícola. Sin embargo, dicha actividad tiene implicaciones negativas desde el punto de vista sanitario, ya que representa un riesgo a la salud de los trabajadores agrícolas y de los consumidores de los productos, en especial cuando se trata de aquéllos que se consumen crudos como las hortalizas (NMX-AA-113-SCFI-1999).

Los helmintos representan un elevado riesgo a la salud humana debido a que sus diversos estadios infecciosos (huevos embrionados o larvas) son altamente persistentes en el agua contaminada. Así, el agua constituye un vehículo directo o indirecto de diseminación de helmintos, aun cuando se encuentren en bajas concentraciones, dando lugar a enfermedades gastrointestinales, sobre todo cuando ésta se emplea para el riego de cultivos.

**Definición:** Helmintos, término designado a un amplio grupo de organismos que incluye a todos los gusanos parásitos (de humanos, animales y vegetales) y de vida libre, con forma y tamaños variados. Poseen órganos diferenciados, y sus ciclos de vida comprenden la producción de huevos o larvas, infecciosas o no y la alternancia compleja de generaciones que incluye hasta tres huéspedes diferentes.



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

**Principio:** Este método de análisis se basa en la diferencia de densidades entre los huevos de helminto, las demás sustancias presentes en las aguas residuales, y las que se agregan para permitir la separación. El método comprende los procesos de coagulación, sedimentación, flotación, decantación y la técnica bifásica para recuperar los huevos de helminto y efectuar el conteo (NMX-AA-113-SCFI-1999).

### Cálculos

Para expresar el número de huevecillos por litro, se acude a la siguiente ecuación:

Donde,

HL= es el número de huevos por litro

H= es el número de huevos leídos en la muestra

5= es el volumen de la muestra

$$HL = \frac{H}{5}$$

### Material y Equipo



Fig. 3.9 Kit básico para HH



Fig. 3.10 Etapa de centrifugación



Fig. 3.11 Conteo, a nivel microscópico, de los HH



### **3.4 METODOLOGÍA**

La metodología para el desarrollo de la etapa experimental de este trabajo de tesis quedará estructurada de la siguiente manera:

- I. CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE BIOLÓGICO SECUNDARIO MEDIANTE PARÁMETROS FISIQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS.**
- II. EVALUACIÓN DEL PROCESO DE MICROFILTRACIÓN CON MEMBRANAS, A ESCALA LABORATORIO, UTILIZANDO UN EFLUENTE BIOLÓGICO SECUNDARIO; MEDIANTE LA CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA.**

#### **PRIMERA ETAPA: CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE.**

Para el desarrollo de esta etapa experimental se eligieron los parámetros que regula la NOM-003-SEMARNAT-1997 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público. Los cuales se mencionan a continuación.

##### **1. *Propiedades Fisicoquímicas.***

- a. Sólidos Suspendidos Totales (SST)** (APHA-AWWA-WPCF, 1992, Técnica 2540D).
- b. Turbidez (T)** (Con turbidímetro, marca HACH).

##### **2. *Determinación de Componentes Orgánicos.***

- c. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>)** (Con espectrofotómetro, modelo PASTEL -UV).
- d. Grasas y Aceites. Extracción de Soxhlet (G y A)** (APHA-AWWA-WPCF, 1992, Técnica 5520D).

##### **3. *Examen Microbiológico.***

- e. Coliformes Fecales (CF)** (Técnica de la NMX-AA-102-SCFI-2006).
- f. Huevos de Helminto (HH)** (Técnica de la NMX-AA-113-SCFI-1999).



**SEGUNDA ETAPA: FILTRACIÓN DEL EFLUENTE SECUNDARIO CON EL MÓDULO DE MICROFILTRACIÓN.**

Para esta segunda etapa es necesario conocer y realizar varias actividades que son fundamentales para obtener resultados confiables al término de este trabajo; estas subetapas están relacionadas con el manejo y mantenimiento del módulo de Microfiltración ya que por ser nuevo requiere de procedimientos pre operación y la determinación de la TMP.

**Determinación de la TMP para la membrana de Microfiltración.**

La Presión Transmembranal (TMP por sus siglas en inglés), es un parámetro sumamente importante ya que nos permite conocer el comportamiento de la membrana a un determinado flujo y a diferentes tiempos. Se requiere conocer la TMP inicial (de la membrana nueva) porque posteriormente servirá como referencia para determinar si se recupera la TMP inicial, después de limpiar la membrana usada. Se debe determinar la TMP antes de realizar cualquier prueba con alguna muestra. La TMP observada después de la limpieza de la membrana no debe ser mayor al 10% del valor de la TMP inicial para considerar que se ha recuperado la membrana

La determinación de la TMP se hará de la siguiente manera: filtrar 180 ml de agua desionizada filtrada a 0.45 m a través de la membrana a un flujo de 30 ml/min. ( $\pm 1$ ml), registrar la TMP obtenida a intervalos de tiempo de 1 minuto. Los resultados obtenidos serán representados por medio de una gráfica TMP vs t.



**Fig. 3.12** Determinación de la TMP



A continuación se presentan las actividades a realizar en esta etapa de la parte experimental de la tesis.

### A. Filtrado de la muestra por membrana de Microfiltración

Características del módulo de MF: membrana de fibra hueca marca PALL, modelo XUNP-003, con un área de filtración de 0.05 ft<sup>2</sup>. La membrana esta construida de Polivinildieno fluoretieno (PVDF por sus siglas en inglés) con un tamaño de poro de 0.1  $\mu$ m.

La muestra será filtrada a través del módulo de Microfiltración siguiendo el diagrama que se muestra a continuación (fig. 3.13).

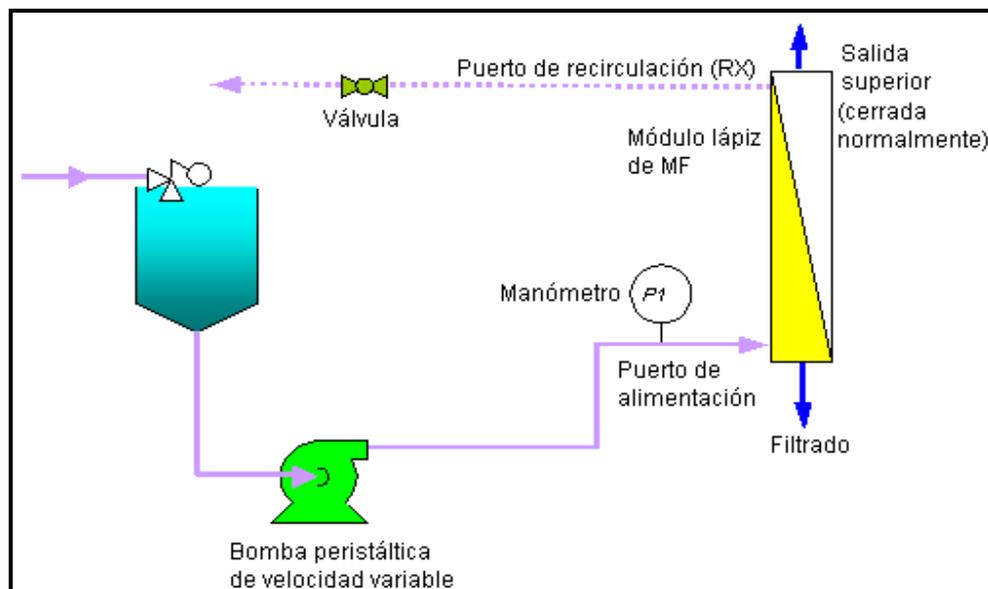


Fig. 3.13 Diagrama de flujo del módulo de Microfiltración

La filtración se realizara a un flujo determinado, manteniendo un flujo constante con la ayuda de una bomba peristáltica digital. El filtrado será recolectado en un recipiente especial, limpio, para no contaminar la muestra y permitir la caracterización de esta mediante los parámetros antes mencionados (SST, T, DBO<sub>5</sub>, G y A, CF, HH).

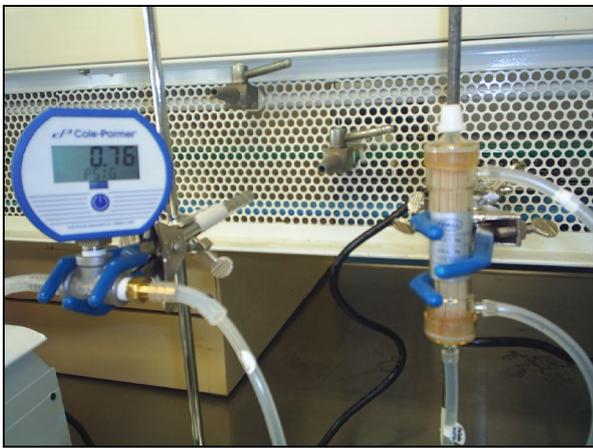
Se realizaran mediciones del filtrado en ciertos intervalos de tiempo, para verificar que el flujo se está manteniendo constante. Esto con la ayuda de una probeta graduada y un cronómetro.



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Durante la etapa de filtración de la muestra, se debe registrar la TMP del módulo de Microfiltración, lo cual se hará de la siguiente manera: Se filtran 100 ml de muestra, y a continuación a los próximos 120 ml que se filtren, se registrará la presión que se observe en el manómetro en intervalos de tiempo de 1min. Los resultados obtenidos serán representados por medio de una grafica TMP vs t.

La filtración se prolongará el tiempo que sea necesario, siempre y cuando la TMP observada no rebase los 25 psi.



**Fig. 3.14** Módulo de MF, modelo PALL XUNP-003



**Fig. 3.15** Proceso de Microfiltración



## CAPITULO 4

# RESULTADOS Y DISCUSION





## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos en las diferentes etapas experimentales, las cuales se resumen a continuación.

La sección 4.1 y 4.2 contienen los resultados de la caracterización, antes y después respectivamente, de tratar el efluente biológico secundario con el módulo de MF marca PALL, modelo XUNP-003. Se presentan dos tablas para cada uno de los seis parámetros determinados: Sólidos Suspendidos Totales (SST), Turbidez (T), Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $DBO_5$ ), Grasas y Aceites (G y A), Coliformes Fecales (CF) y Huevos de Helminto (HH). También se encontrará, aunado a cada tabla, un análisis estadístico en el cual se resalta la **media**; la cual se utilizó para calcular el porcentaje de remoción, mostrado en la Tab.4.23, que tuvo la membrana para cada uno de los parámetros antes mencionados.

Posteriormente en la sección 4.3 se encuentra la evaluación comparativa de la calidad del agua residual, antes y después de ser tratada con el modulo de Microfiltración, mostrada en gráficos que permiten ver de una forma muy clara el impacto que tiene dicho proceso en el tratamiento del agua residual.

Por último se muestra un par de gráficos (TMP vs t) donde se muestra la presión trans membranal inicial (TMP, por sus siglas en ingles), por ser una membrana nueva, y las diferentes TMP que fueron tomadas a lo largo del proceso de Microfiltración y una tabla donde se indica el porciento de recuperación que tubo la membrana después de una limpieza con químicos así como el promedio del tiempo de operación de la misma.

Por otra parte para este capítulo es necesario tener clara la definición de algunos términos que se usaran en la estadística descriptiva tales como Media, Mediana, Moda, Desviación Estándar, Varianza y Rango; los cuales se definen brevemente a continuación: (Wackerly, 2002).

### Medidas de Tendencia Central

**Media:** Es la relación entre la sumatoria de todos los valores de una variable y el número de datos.

**Mediana:** Es el valor central de la variable, si la muestra se ordena en forma ascendente o descendente la media divide en dos partes la muestra. Cuando el número de datos es impar el termino  $X_{n/2+1}$  es la mediana, si el número de datos es par la mediana será la media entre los dos valores centrales, es decir  $X_{n/2}$  y  $X_{n/2+1}$ .

**Moda:** Es el valor de la variable que tenga mayor frecuencia absoluta, es decir el que mas se repite.

### Medidas de Dispersión

**D. Estándar:** Indica cuanto tienden a alejarse los valores puntuales del promedio de una distribución. Matemáticamente se define como la raíz cuadrada de la varianza.

**Varianza:** Corresponde a la media de los cuadrados de las desviaciones.

**Rango:** Es la diferencia existente entre el valor mayor y el menor de la distribución.



#### 4.1 CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE SECUNDARIO ANTES DE LA MF

Con el fin de conocer la calidad del agua de la muestra, se realizó la caracterización en base a los parámetros establecidos en el capítulo anterior.

Los resultados obtenidos de los diferentes análisis realizados a lo largo de la etapa experimental, se resumen a continuación de la tabla 4.1 a la 4.12.

##### 4.1.1 PARAMETRO FISICOQUÍMICO

Tabla 4.1 Sólidos Suspendedos Totales

| FECHA    | SSTp* |
|----------|-------|
| 7/12/09  | 26    |
| 8/12/09  | 28    |
| 9/12/09  | 18    |
| 10/12/09 | 11.5  |
| 11/12/09 | 24.5  |
| 14/12/09 | 26    |
| 15/12/09 | 17    |
| 16/12/09 | 28.5  |
| 17/12/09 | 31    |
| 18/12/09 | 33    |

\*SSTp: Promedio de dos determinaciones

Tabla 4.2 Estadística Descriptiva de SST

| Parámetro           | SST   |
|---------------------|-------|
| Media               | 24.35 |
| Mediana             | 26    |
| Moda                | 26    |
| Desviación Estándar | 6.79  |
| Varianza            | 46    |
| Rango               | 21.5  |



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

**Tabla 4.3** Turbidez

| FECHA    | TURBIDEZ (NTU) |
|----------|----------------|
| 7/12/09  | 13.5           |
| 8/12/09  | 18             |
| 9/12/09  | 11             |
| 10/12/09 | 19.5           |
| 11/12/09 | 17.5           |
| 14/12/09 | 19             |
| 15/12/09 | 13             |
| 16/12/09 | 12             |
| 17/12/09 | 16.5           |
| 18/12/09 | 21             |

**Tabla 4.4** Estadística Descriptiva de T

| Parámetro                  | T           |
|----------------------------|-------------|
| <b>Media</b>               | <b>16.1</b> |
| <b>Mediana</b>             | 17          |
| <b>Moda</b>                | NE*         |
| <b>Desviación Estándar</b> | 3.48        |
| <b>Varianza</b>            | 12.1        |
| <b>Rango</b>               | 10          |

\*No existe

### 4.1.2 DETERMINACIÓN DE COMPONENTES ORGÁNICOS

**Tabla 4.5** Demanda Bioquímica de Oxígeno

| Parámetros (mg/L)                   | 7/12/09                     |                             | 8/12/09        |                | 9/12/09        |                | 10/12/09       |                | 11/12/09       |                |
|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                                     | L <sub>1</sub> <sup>b</sup> | L <sub>2</sub> <sup>c</sup> | L <sub>1</sub> | L <sub>2</sub> |
| <b>DQO</b>                          | 83                          | 91                          | 120            | 116            | 115            | 122            | 115            | 114            | 126            | 132            |
| <b>TOC</b>                          | 22                          | 21                          | 28             | 26             | 30             | 32             | 29             | 30             | 30             | 30             |
| <b>NNO<sub>3</sub></b>              | ≤1.0                        | ≤1.0                        | ≤1.0           | ≤1.0           | ≤1.0           | ≤1.0           | ≤1.0           | ≤1.0           | ≤1.0           | ≤1.0           |
| <b>SUR</b>                          | 4.7                         | 4.6                         | 2.8            | 2.8            | 1.6            | 1.6            | 1.7            | 1.9            | 2.8            | 2.7            |
| <b>DBO<sub>5p</sub><sup>a</sup></b> | 17.5                        |                             | 22.5           |                | 28.3           |                | 27.0           |                | 39.6           |                |



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Continuación...

| Parámetros (mg/L)       | 14/12/09       |                | 15/12/09       |                | 16/12/09       |                | 17/12/09       |                | 18/12/09       |                |
|-------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                         | L <sub>1</sub> | L <sub>2</sub> |
| <b>DQO</b>              | 117            | 124            | 81             | 90             | 118            | 116            | 105            | 115            | 118            | 121            |
| <b>TOC</b>              | 32             | 34             | 20             | 26             | 26             | 24             | 30             | 28             | 26             | 30             |
| <b>NNO<sub>3</sub></b>  | ≤1.0           | ≤1.0           | ≤1.0           | ≤1.0           | ≤1.0           | ≤1.0           | ≤1.0           | ≤1.0           | ≤1.0           | ≤1.0           |
| <b>SUR</b>              | 1.8            | 1.8            | 4.5            | 4.3            | 2.6            | 2.4            | 2.0            | 1.9            | 1.9            | 1.7            |
| <b>DBO<sub>5p</sub></b> | 30             |                | 17.5           |                | 20.8           |                | 24.2           |                | 29.2           |                |

- a. DBO<sub>5p</sub>: Resultados obtenidos con el equipo PASTEL-UV.
- b. L<sub>1</sub>: Lectura 1
- c. L<sub>2</sub>: Lectura 2

Tabla 4.6 Estadística Descriptiva de DBO<sub>5</sub>

| Parámetro                  | DBO <sub>5</sub> |
|----------------------------|------------------|
| <b>Media</b>               | <b>25.67</b>     |
| <b>Mediana</b>             | 25.64            |
| <b>Moda</b>                | 17.5             |
| <b>Desviación Estándar</b> | 6.70             |
| <b>Varianza</b>            | 44.84            |
| <b>Rango</b>               | 22.1             |



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

**Tabla 4.7** Grasas y Aceites

| FECHA    | G y A (mg/L) |
|----------|--------------|
| 7/12/09  | 14.9         |
| 8/12/09  | 1.98         |
| 9/12/09  | 1.23         |
| 10/12/09 | 17.0         |
| 11/12/09 | 20.2         |
| 14/12/09 | 15.5         |
| 15/12/09 | 14.1         |
| 16/12/09 | 1.54         |
| 17/12/09 | 16.3         |
| 18/12/09 | 19.6         |

**Tabla 4.8** Estadística Descriptiva de G y A

| Parámetro                  | G y A        |
|----------------------------|--------------|
| <b>Media</b>               | <b>12.24</b> |
| <b>Mediana</b>             | 16.3         |
| <b>Moda</b>                | NE*          |
| <b>Desviación Estándar</b> | 2.32         |
| <b>Varianza</b>            | 4.75         |
| <b>Rango</b>               | 6.1          |

\* No existe

### 4.1.3 EXAMEN MICROBIOLÓGICO

**Tabla 4.9** Coliformes Fecales

| FECHA    | 10 <sup>-1</sup> | 10 <sup>-2</sup> | 10 <sup>-3</sup> | 10 <sup>-4</sup> | 10 <sup>-5</sup> | 10 <sup>-6</sup> | UFC/100mL |
|----------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------|
| 7/12/09  | NC               | NC               | 16               | ND               | ND               | ND               | 1.6E+06   |
| 8/12/09  | NC               | NC               | 35               | 3                | ND               | ND               | 3.5E+06   |
| 9/12/09  | NC               | NC               | 50               | 4                | ND               | ND               | 4.0E+06   |
| 10/12/09 | NC               | NC               | 26               | 2                | ND               | ND               | 2.6E+06   |
| 11/12/09 | NC               | NC               | 65               | 7                | ND               | ND               | 6.5E+06   |
| 14/12/09 | NC               | NC               | 42               | 3                | ND               | ND               | 4.2E+06   |
| 15/12/09 | NC               | NC               | 28               | 2                | ND               | ND               | 2.8E+06   |
| 16/12/09 | NC               | NC               | 36               | 4                | ND               | ND               | 3.6E+06   |
| 17/12/09 | NC               | NC               | 22               | 3                | ND               | ND               | 2.2E+06   |
| 18/12/09 | NC               | NC               | 34               | 3                | ND               | ND               | 3.4E+06   |

NC: No contables

ND: No detectables



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

**Tabla 4.10** Estadística Descriptiva de CF

| Parámetro                  | CF              |
|----------------------------|-----------------|
| <b>Media</b>               | <b>3.44E+06</b> |
| <b>Mediana</b>             | 3.4E+06         |
| <b>Moda</b>                | NE*             |
| <b>Desviación Estándar</b> | 1.3E+06         |
| <b>Varianza</b>            | 1.8E+12         |
| <b>Rango</b>               | 4.9E+06         |

\*No existe

**Tabla 4.11** Huevos de Helminto

| FECHA    | HH (H/L) |
|----------|----------|
| 7/12/09  | 36       |
| 8/12/09  | 39       |
| 9/12/09  | 42       |
| 10/12/09 | 35       |
| 11/12/09 | 52       |
| 14/12/09 | 48       |
| 15/12/09 | 38       |
| 16/12/09 | 50       |
| 17/12/09 | 35       |
| 18/12/09 | 45       |

**Tabla 4.12** Estadística Descriptiva de HH

| Parámetro                  | HH          |
|----------------------------|-------------|
| <b>Media</b>               | <b>42.0</b> |
| <b>Mediana</b>             | 40.5        |
| <b>Moda</b>                | 35          |
| <b>Desviación Estándar</b> | 6.40        |
| <b>Varianza</b>            | 41          |
| <b>Rango</b>               | 17          |



## 4.2 CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE SECUNDARIO *DESPUÉS* DE LA MF

Para conocer la calidad del agua que fue tratada con el módulo de MF se realizaron las mismas determinaciones que en el apartado anterior (4.1).

Los resultados obtenidos de los diferentes análisis realizados a lo largo de la etapa experimental, se resumen a continuación de la tabla 4.13 a la 4.22.

### 4.2.1 PARAMETRO FISICOQUÍMICO

**Tabla 4.13** Sólidos Suspendidos Totales

| FECHA    | SSTp* |
|----------|-------|
| 7/12/09  | 2.5   |
| 8/12/09  | 1     |
| 9/12/09  | 2.5   |
| 10/12/09 | 1     |
| 11/12/09 | 2     |
| 14/12/09 | 1     |
| 15/12/09 | 4     |
| 16/12/09 | 2.5   |
| 17/12/09 | 3     |
| 18/12/09 | 1     |

\*SSTp: Promedio de dos determinaciones

**Tabla 4.14** Estadística Descriptiva de SST

| Parámetro           | SST  |
|---------------------|------|
| Media               | 2.05 |
| Mediana             | 2.25 |
| Moda                | 1    |
| Desviación Estándar | 1.04 |
| Varianza            | 1.08 |
| Rango               | 3    |



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

**Tabla 4.15** Turbidez

| FECHA    | TURBIDEZ (NTU) |
|----------|----------------|
| 7/12/09  | 0.34           |
| 8/12/09  | 0.39           |
| 9/12/09  | 0.30           |
| 10/12/09 | 0.35           |
| 11/12/09 | 0.40           |
| 14/12/09 | 0.34           |
| 15/12/09 | 0.34           |
| 16/12/09 | 0.32           |
| 17/12/09 | 0.39           |
| 18/12/09 | 0.33           |

**Tabla 4.16** Estadística Descriptiva de T

| Parámetro                  | T           |
|----------------------------|-------------|
| <b>Media</b>               | <b>0.35</b> |
| <b>Mediana</b>             | 0.34        |
| <b>Moda</b>                | 0.34        |
| <b>Desviación Estándar</b> | 0.033       |
| <b>Varianza</b>            | 0.001       |
| <b>Rango</b>               | 0.1         |

### 4.2.2 DETERMINACIÓN DE COMPONENTES ORGÁNICOS

**Tabla 4.17** Demanda Bioquímica de Oxígeno

| Parámetros (mg/L)                   | 7/12/09                     |                             | 8/12/09        |                | 9/12/09        |                | 10/12/09       |                | 11/12/09       |                |
|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                                     | L <sub>1</sub> <sup>b</sup> | L <sub>2</sub> <sup>c</sup> | L <sub>1</sub> | L <sub>2</sub> |
| <b>DQO</b>                          | 47                          | 43                          | 45             | 49             | 39             | 45             | 44             | 40             | 61             | 58             |
| <b>TOC</b>                          | 10                          | 10                          | 11             | 11             | 10             | 11             | 11             | 11             | 13             | 13             |
| <b>NNO<sub>3</sub></b>              | ≤1.0                        | ≤1.0                        | ≤1.0           | ≤1.0           | ≤1.0           | ≤1.0           | ≤1.0           | ≤1.0           | ≤1.0           | ≤1.0           |
| <b>SUR</b>                          | ≤1.0                        | ≤1.0                        | 1.3            | 1.3            | 2.6            | 2.4            | 3.4            | 3.0            | 1.7            | 1.8            |
| <b>DBO<sub>5p</sub><sup>a</sup></b> | 9.2                         |                             | 10             |                | 11.7           |                | 8.3            |                | 11.2           |                |



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Continuación...

| Parámetros<br>(mg/L)    | 14/12/09       |                | 15/12/09       |                | 16/12/09       |                | 17/12/09       |                | 18/12/09       |                |
|-------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                         | L <sub>1</sub> | L <sub>2</sub> |
| <b>DQO</b>              | 62             | 61             | 47             | 45             | 44             | 47             | 39             | 45             | 61             | 57             |
| <b>TOC</b>              | 13             | 13             | 11             | 11             | 10             | 12             | 10             | 10             | 12             | 11             |
| <b>NNO<sub>3</sub></b>  | ≤1.0           | ≤1.0           | ≤1.0           | ≤1.0           | ≤1.0           | ≤1.0           | ≤1.0           | ≤1.0           | ≤1.0           | ≤1.0           |
| <b>SUR</b>              | ≤1.0           | ≤1.0           | ≤1.0           | ≤1.0           | 2.3            | 2.2            | 2.5            | 2.6            | 1.9            | 1.8            |
| <b>DBO<sub>5p</sub></b> | 11.7           |                | 10             |                | 9.2            |                | 11.7           |                | 10.8           |                |

- a. DBO<sub>5p</sub>: Resultados obtenidos con el equipo PASTEL-UV.
- b. L<sub>1</sub>: Lectura 1
- c. L<sub>2</sub>: Lectura 2

**Tabla 4.18** Estadística Descriptiva de DBO<sub>5</sub>

| Parámetro                  | DBO <sub>5</sub> |
|----------------------------|------------------|
| <b>Media</b>               | <b>10.38</b>     |
| <b>Mediana</b>             | 10.4             |
| <b>Moda</b>                | 11.7             |
| <b>Desviación Estándar</b> | 1.22             |
| <b>Varianza</b>            | 1.50             |
| <b>Rango</b>               | 3.4              |



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

**Tabla 4.19** Grasas y Aceites

| FECHA    | G y A (mg/L) |
|----------|--------------|
| 7/12/09  | 3.44         |
| 8/12/09  | ND           |
| 9/12/09  | ND           |
| 10/12/09 | 4.68         |
| 11/12/09 | 6.48         |
| 14/12/09 | 4.06         |
| 15/12/09 | 3.75         |
| 16/12/09 | ND           |
| 17/12/09 | 4.52         |
| 18/12/09 | 4.79         |

**Tabla 4.20** Estadística Descriptiva de G y A

| Parámetro           | G y A |
|---------------------|-------|
| Media               | 3.37  |
| Mediana             | 4.52  |
| Moda                | NE*   |
| Desviación Estándar | 0.99  |
| Varianza            | 0.98  |
| Rango               | 3.04  |

\*No existe

### 4.2.3 EXAMEN MICROBIOLÓGICO

**Tabla 4.21** Coliformes Fecales

| FECHA    | UFC/100mL |
|----------|-----------|
| 7/12/09  | ND        |
| 8/12/09  | ND        |
| 9/12/09  | ND        |
| 10/12/09 | ND        |
| 11/12/09 | ND        |
| 14/12/09 | ND        |
| 15/12/09 | ND        |
| 16/12/09 | ND        |
| 17/12/09 | ND        |
| 18/12/09 | ND        |

ND: No detectado

**Tabla 4.22** Huevos de Helminto

| FECHA    | HH (H/L) |
|----------|----------|
| 7/12/09  | 0        |
| 8/12/09  | 0        |
| 9/12/09  | 0        |
| 10/12/09 | 0        |
| 11/12/09 | 0        |
| 14/12/09 | 0        |
| 15/12/09 | 0        |
| 16/12/09 | 0        |
| 17/12/09 | 0        |
| 18/12/09 | 0        |



### 4.3 EVALUACIÓN DEL PROCESO DE MF

Con la finalidad de evaluar el proceso de MF, a continuación se muestran las gráficas comparativas de la calidad del agua antes y después de ser procesada con el módulo de MF, figuras de la 4.1 a la 4.6. Estos resultados se comparan con el valor máximo permisible que establece la NOM-003-SEMARNAT-1997. La grafica muestra claramente que los resultados obtenidos de la membrana están, en la mayoría de los casos, muy por debajo de lo requerido por la norma.

Fig. 4.1 Comparación del proceso de MF para SST



De acuerdo con la literatura (González, 1996) los sistemas de crecimiento en suspensión (lodos activados) presentan concentraciones de sólidos suspendidos promedio de 30 mg/L. Por otro lado los sistemas de crecimiento en biopelícula (discos bilógicos rotatorios y filtros rociadores) presentaron las concentraciones mas bajas de sólidos suspendidos, de 9 y 12 mg/L respectivamente; por lo que los resultados obtenidos mostrados en la tabla 4.1 se pueden considerar representativos de este tipo de efluentes.

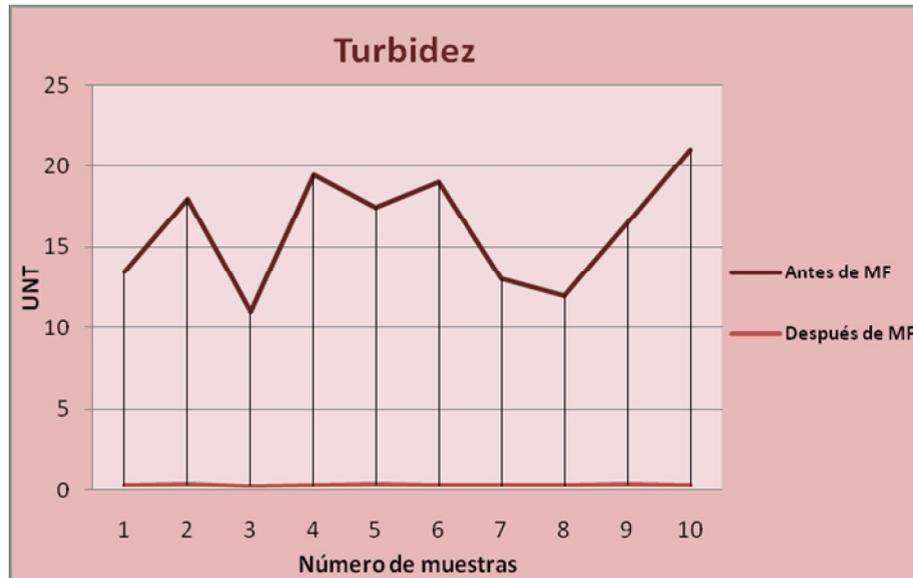
Los análisis de sólidos son importantes en el control de procesos de tratamiento biológico y físico de aguas residuales, y para evaluar el cumplimiento de las limitaciones que regulan su vertido. Estos sólidos pueden dar lugar al desarrollo de depósitos de fango y de condiciones anaerobias cuando se vierte agua residual sin tratar al entorno acuático (Metcalf & Eddy, 1996).

De lo anterior surge la importancia de remover la mayor cantidad de sólidos posible. La membrana de Microfiltración demuestra ser una buena alternativa ya que con ella se logra obtener una remoción del 92%.



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Fig. 4.2 Comparación del proceso de MF para Turbidez



La turbiedad, como medida de las propiedades de transmisión de la luz de un agua, es otro parámetro que se emplea para indicar la calidad de las aguas vertidas o de las aguas naturales en relación con la materia coloidal y residual en suspensión. La materia coloidal dispersa o absorbe la luz, impidiendo su transmisión. Aun así, no es posible afirmar que exista una relación entre la turbiedad y la concentración de sólidos en suspensión de un agua no tratada. No obstante, sí están razonablemente ligados la turbiedad y los sólidos en suspensión en el caso de efluentes procedentes de la decantación secundaria en el proceso de fangos activados (Metcalf & Eddy, 1996).

La turbiedad puede ser causada por una amplia variedad de materiales suspendidos, con un ámbito de tamaño desde coloidal hasta partículas macroscópicas, dependiendo del grado de turbulencia.

La turbiedad es de importante consideración en las aguas residuales por tres razones:

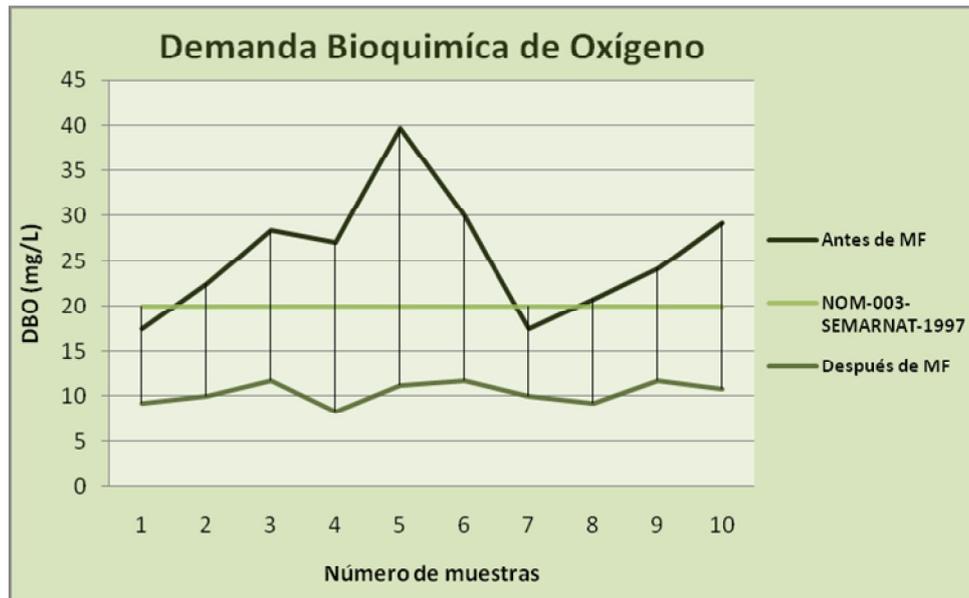
- Antiestético. Cualquier turbiedad en el agua residual da la apariencia de un agua muy contaminada, aunque no lo este en realidad.
- Filtrabilidad. La filtración del agua se vuelve más difícil y aumenta su costo al aumentar su turbiedad.
- Las aguas cargadas de materias en suspensión ocasionan siempre dificultades por sedimentación en tuberías y depósitos.

En la caracterización del agua antes de ser tratada con la membrana se obtuvieron valores en el rango de 11 a 19.5 y posteriormente la turbiedad del permeado fue de 0.30 a 0.40, lo cual se traduce en una eficiencia de remoción por parte de la membrana del 98%.



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Fig. 4.3 Comparación del proceso de MF para DBO<sub>5</sub>



La materia orgánica biodegradable compuesta principalmente por proteínas (40-60%), carbohidratos (25-50%) y grasas y aceites (10%), se mide en la mayoría de las ocasiones en función de la DBO y de la DQO. Si se descargan al entorno sin tratar su estabilización biológica puede llevar al agotamiento de los recursos naturales de oxígeno y al desarrollo de condiciones sépticas (Metcalf & Eddy, 1996).

Los resultados de la DBO<sub>5</sub> se emplean para:

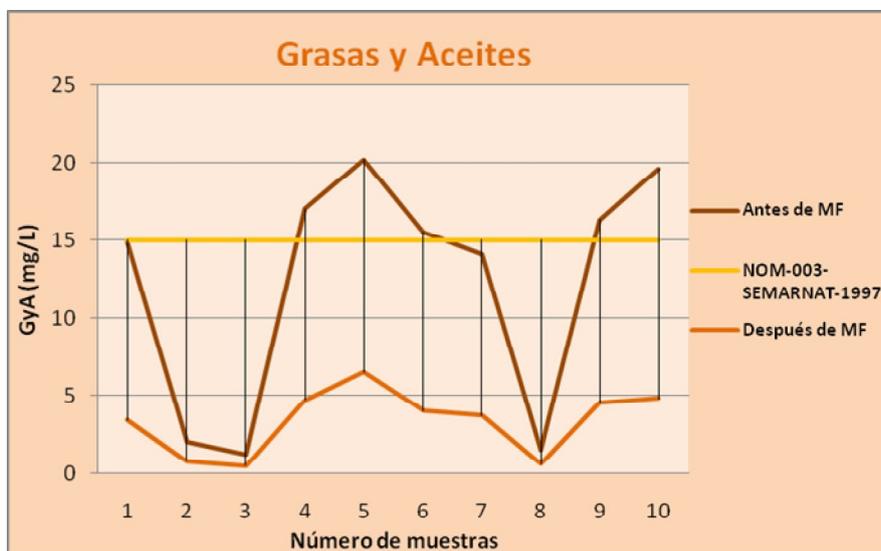
- Determinar la cantidad aproximada de oxígeno que se requerirá para estabilizar biológicamente la materia orgánica presente.
- Dimensionar las instalaciones de tratamiento de aguas residuales.
- Medir la eficacia de algunos procesos de tratamiento.
- Controlar el cumplimiento de las limitaciones a que están sujetos los vertidos.

Para este caso se obtuvo antes de la MF una media de 25.67mg/L y posterior a la MF una media de 10.38 mg/L lo que representa una remoción del 60% en la DBO<sub>5</sub> teniendo este resultado un impacto importante en el proceso del tren de tratamiento de la planta tal como se indica en los puntos antes mencionados. Ya que el objetivo general de este estudio es evaluar la calidad del efluente del proceso de MF podemos concluir con los resultados anteriores que la MF es una alternativa que hay que tomar en cuenta para el tratamiento de aguas residuales.



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Fig. 4.4 Comparación del proceso de MF para G y A



El término grasa engloba grasas animales, aceites, ceras y otros constituyentes presentes en las aguas residuales. Estas G y A alcanzan las aguas residuales en forma de mantequilla, manteca de cerdo, margarina, aceites y grasas vegetales (Metcalf & Eddy, 1996).

La presencia de grasas y aceites en el agua residual puede provocar problemas tanto en la red de alcantarillado como en las plantas de tratamiento. Si no se elimina el contenido en grasa antes del vertido del agua residual, puede interferir con la vida biológica en aguas superficiales y crear películas y acumulaciones de materia flotante desagradables.

En el proceso de la depuración de aguas residuales los problemas más relevantes a causa de las G y A son los siguientes:

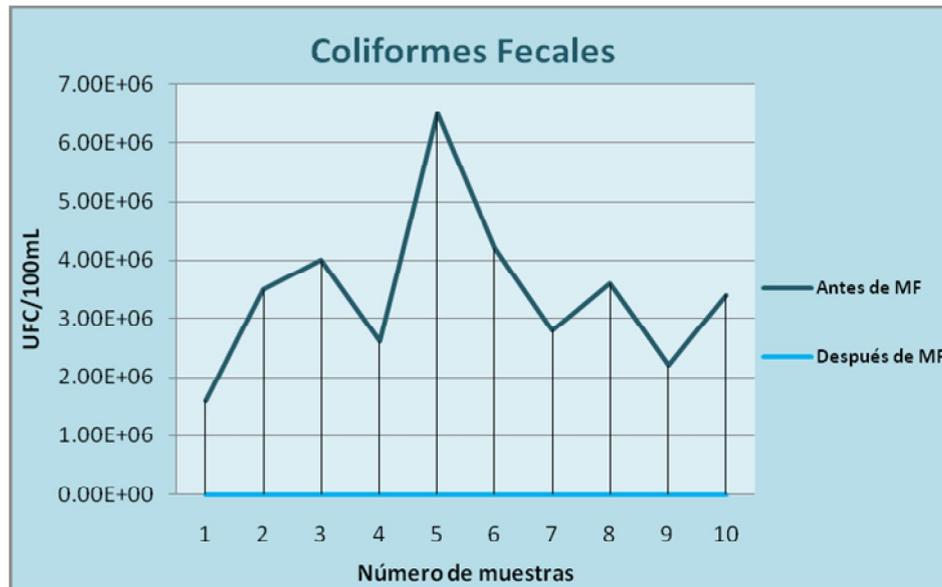
- En rejillas finas causan obstrucciones que aumentan los gastos de conservación.
- En los decantadores forman una capa superficial que dificulta la sedimentación al atraer hacia la superficie pequeñas partículas de materia orgánica.
- En la depuración por el sistema de fangos activados dificultan la correcta aireación disminuyendo el coeficiente de transferencia al subir las grasas de 0 a 70 mg/L (Hernández, 1990).
- Perturban el proceso de digestión de lodos.
- La DQO se incrementa en un 20-30% por las grasas contenidas en los vertidos (Hernández, 1990).

Con respecto a los resultados obtenidos en este parámetro hubo tres días (2, 3 y 8) en los cuales se obtuvieron cantidades bajas de G y A pese a esto se incluyeron en el análisis estadístico del cual se sabe que la media de la alimentación fue de 12.24 mg/L mientras que la media del permeado fue 3.37 mg/L que resulta en un 72% de eficiencia de remoción.



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Fig. 4.5 Comparación del proceso de MF para CF



El estudio de la calidad de un agua residual debe ser complementado con un análisis bacteriológico. La bacteriología del agua se basa en la investigación de organismos del grupo coliforme, entre ellos, especialmente, la E. Coli, y de otros organismos esporulados, que nos son peligrosos por si mismos, pero que indican una contaminación por materias fecales. Un agua que contenga estos gérmenes es peligrosa en caso de epidemia.

Desde el punto de vista de salud pública, los contaminantes de mayor preocupación cuando se trata del reuso en riego son los microorganismos patógenos. Se estima que solo el 10% de las enfermedades de origen hídrico se relacionan con agentes químicos, mientras que el 90% restante se debe a agentes microbianos (Lee y Jones-Lee, 1993). Los principales agentes que se encuentran en agua residual se pueden clasificar en: bacterias, virus y parásitos (protozoarios y helmintos).

En relación a las bacterias Coliformes Fecales; se encontraron en concentraciones del orden de  $10^6$  UFC/100 mL en el punto de muestreo, sedimentador secundario, mientras que en el efluente del modulo de Microfiltración no se detecto presencia de CF.

Para este parámetro la remoción de la membrana fue de un 100%, es decir retuvo en su totalidad a dichos microorganismos patógenos.

En este caso no se hizo un comparativo con el valor máximo permisible de la Norma ya que esta solo reporta el valor de 240 número mas probable (NMP)/100ml y el estudio se realizó en relación a las unidades formadoras de colonias (UFC)/100ml.



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Fig. 4.6 Comparación del proceso de MF para HH



A pesar de que los huevos de helminto son unos de los principales causantes de enfermedades gastrointestinales, especialmente en países en desarrollo donde las condiciones sanitarias son mínimas o escasas, no representan un problema si el agua residual es convenientemente tratada. Estas estructuras, con un tamaño aproximado de 20 a 100  $\mu\text{m}$ , son resistentes a condiciones ambientales adversas y a los métodos tradicionales de desinfección, con excepción del ozono (Rojas-Valencia et al., 2004).

En estos países en desarrollo, donde habita cerca del 75% de la población global, entre la tercera parte y la mitad de los residentes son portadores de uno o más parásitos intestinales (Genta, 1996). Los helmintos intestinales son diseminados por la contaminación del medio ambiente con excretas de los huéspedes infectados, éstas presentan las etapas infectivas o resistentes de los parásitos, ya sea en forma de huevos o larvas, que necesitan estar en contacto con el agua o suelo húmedo para su desarrollo posterior, pudiendo llegar a infectar a un nuevo huésped por diferentes vías.

En la tabla 4.11 se observa que la cantidad de huevos de helminto por litro (HH/L) de aguas residuales fluctúa entre 35 y 52, con un promedio de 42 (ver tabla 4.12). Fue agradable encontrar que a la salida del módulo de Microfiltración no se determinaron huevos de helminto, no sólo se obtuvo como promedio el 100% de eficiencia, sino que en todos los casos, la cuantificación de huevos de helminto resultó cero.



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

En la siguiente tabla se presenta un resumen de la evaluación realizada al módulo de Microfiltración modelo XUNP-003 N/S 01220306. En donde se puede observar la media de los resultados obtenidos para los diferentes parámetros, antes y después de la MF, también se muestra la eficiencia de remoción para cada uno de ellos y por último se incluye el límite que permite la NOM-003-SEMARNAT-1997 para cada parámetro.

**Tabla 4.23** Porcentaje de remoción que se obtuvo en el permeado de la membrana de MF

| Parámetro               | Alimentación | Permeado | Eficiencia de Remoción % | Límites máximos permisibles NOM-003-SEMARNAT-1997 |
|-------------------------|--------------|----------|--------------------------|---|
| SST (mg/L)              | 24.35        | 2.05     | 92                       | 20  |
| Turbidez (UNT)          | 16.1         | 0.35     | 98                       | NE  |
| DBO <sub>5</sub> (mg/L) | 25.67        | 10.38    | 60                       | 20  |
| G y A (mg/L)            | 12.24        | 3.37     | 72                       | 15  |
| CF (UFC/100ml)          | 3.44E+06     | ND       | 100                      | NE*   |
| HH (H/L)                | 42           | 0        | 100                      | ≤ 1   |

ND: No detectado

NE: No existe

NE\*: Para los CF, la norma reporta la cantidad de 240 NMP/100ml.



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Por último, en relación a este capítulo se presenta los siguientes gráficos de TMP vs t, donde se observaran diferentes presiones trans membranales de operación (TMPop) registradas durante el proceso de Microfiltración. También se presenta en la tabla 4.24 el porcentaje de recuperación que tubo la membrana después de la limpieza con químicos y el promedio del tiempo de operación de la misma.

Fig. 4.7 TMP vs t

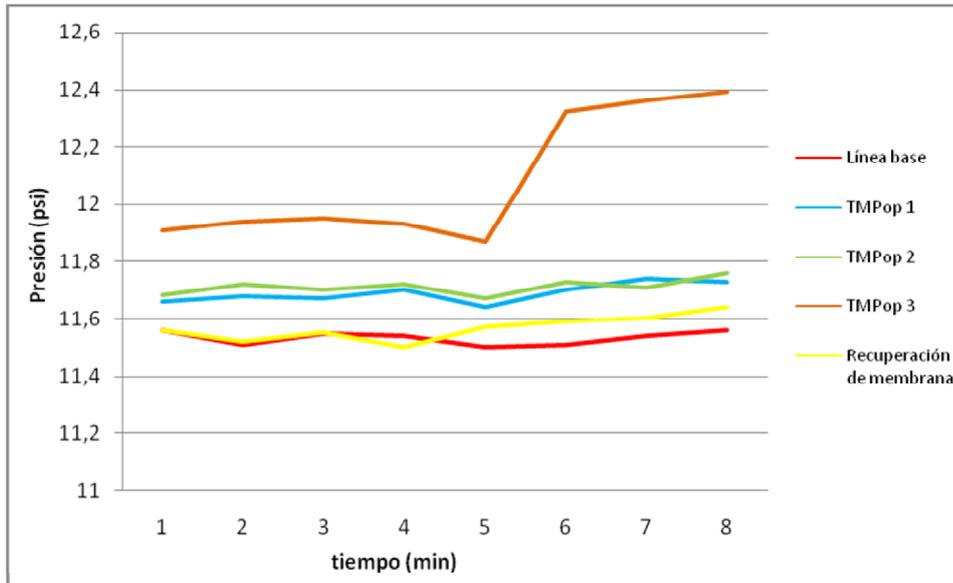
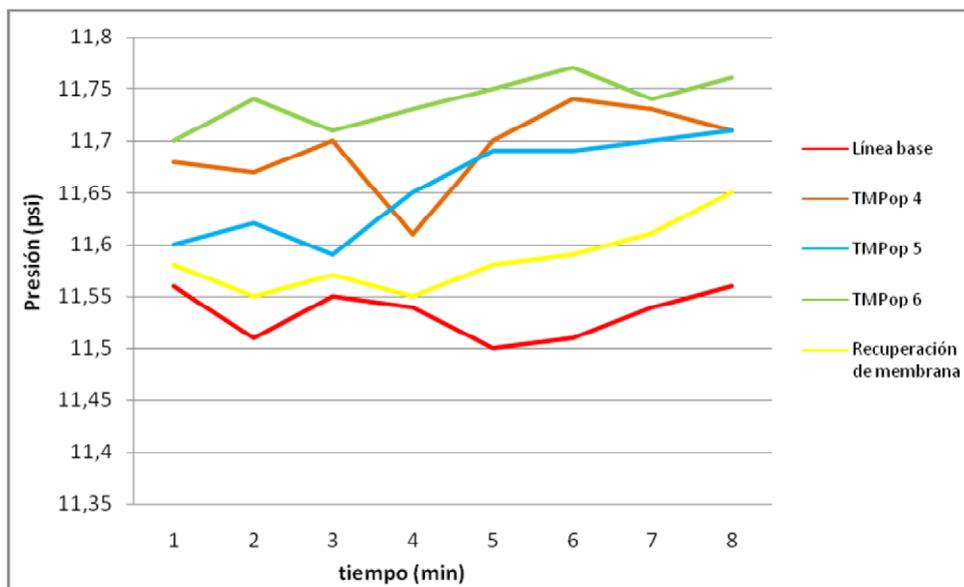


Fig. 4.8 TMP vs t





## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Las graficas 4.7 y 4.8 ilustran la variación que hubo en la determinación de la TMP a lo largo de los días que fue operada la membrana. Primero se determino la línea base (TMP inicial) que como ya se menciona es la primera por tratarse de una membrana nueva. Posteriormente se observa un incremento de estas presiones durante tres días de operación sin limpieza con químicos y por último en la recuperación de la membrana se observa una disminución considerable en las presiones ya que la membrana ha sido tratada con químicos.

En la siguiente tabla se encuentra el porcentaje de recuperación obtenido de dos limpiezas con químicos realizadas a la membrana.

**Tabla 4.24** Porcentos de recuperación y tiempo de operación

| <b>Recuperación de la membrana</b>  |          |
|---|----------|
| Primera determinación   | 99.72%   |
| Segunda determinación   | 99.55%   |
| <b>Tiempo de operación del modulo de Microfiltración modelo XUNP-003 N/S 01220306</b> |          |
| Tiempo de operación promedio  | 1:15 min |

A lo largo del proceso de MF se realizaron dos limpiezas con químicos, esto con la finalidad de recuperar la membrana, es decir tratar de que las presiones registradas en la TMP bajen y sean lo más parecidas a la línea base inicial. La recuperación se dio en un 99.72% en la primera vez y un 99.55% para la segunda vez como lo muestra la tabla anterior, lo cual significa que se recuperó casi por completo la membrana.



# CAPITULO 5

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES





## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Para poder disponer del agua residual en forma segura, es necesario aplicar un tratamiento adecuado de tal forma que se minimicen los riesgos a la salud, y mientras mayor sea la probabilidad de contacto con el ser humano el tratamiento debe ser más riguroso.

Por tal motivo, la finalidad de este estudio es aportar mayor información acerca del proceso de Microfiltración por membranas con base en la experimentación y los resultados obtenidos en el mismo. Estos resultados demuestran que la tecnología de Microfiltración tiene la capacidad de reducir en un porcentaje considerable los valores en parámetros como Sólidos Suspendidos Totales (SST), Turbidez (T), Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $DBO_5$ ), Grasas y Aceites (G y A), Coliformes Fecales (CF) y Huevos de Helminto (HH), pese a todas las características particulares de dichos parámetros.

Las reducciones antes mencionadas, se traducen en la eficiencia de remoción que tiene el equipo, las cuales van desde un 60% como en el caso de la  $DBO_5$  hasta la mas alta que fue de 100% para los casos de CF y HH, de los cuales no se detectó presencia en el efluente de la membrana.

Estos resultados corroboran que la tecnología de Microfiltración es una buena opción para integrarse al tren de tratamiento de aguas residuales de la planta de Cerro del Agua (PTARCA) de Ciudad Universitaria.

### Conclusiones particulares

1. El efluente secundario permeado por MF, se caracterizó en base a parámetros físicos, químicos y microbiológicos como son SST, T,  $DBO_5$ , G y A, CF y HH. Los resultados revelan una disminución considerable en la mayoría de los parámetros, consultar Tabla 4.23, en la cual se observan los parámetros que estaban fuera de la norma y que al ser tratados por MF reducen su concentración.
2. La calidad del agua obtenida por filtración en membranas de fibra hueca XUNP-003 mejora su calidad significativamente con respecto al efluente biológico sin filtrar. Particularmente se observa una reducción en el contenido de sólidos suspendidos del 92%, turbiedad del 98%,  $DBO_5$  del 60%, G y A del 72%, CF y HH del 100%. De estos resultados se deduce que gran parte de la materia presente en el efluente biológico puede ser removida mediante un simple proceso de Microfiltración.
3. Al comparar los resultados obtenidos del efluente secundario antes y después de la membrana podemos deducir el impacto que tendrá este proceso en la etapa de desinfección, en la cual el impacto mayor se verá reflejado en la disminución de la dosis de cloro que se requiera y a su vez se asegurará el cumplimiento de los parámetros establecidos por la norma.



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

4. Con respecto a la eficiencia de remoción que presentó la membrana encontramos porcentos de remoción que fluctúan entre el 60 al 100%. La filtración por membrana resultó efectiva en la eliminación de CF y HH al no encontrarse presencia de estos en el efluente de la membrana.
5. En relación al módulo de Microfiltración, se realizaron varias corridas con el módulo y el efluente secundario en tiempos de operación de 1:15 minutos, el flujo de agua que se manejo en estas pruebas fue de 20 ml/min, valor recomendado, manteniendo una presión menor a 25 psi para garantizar la seguridad de la membrana.
6. Para la determinación de la TMP inicial, se filtraron 240 mL con un flujo de 30 ml/min, para obtener de esta manera la grafica representativa de TMP <sup>vs</sup> t. De las limpiezas de la membrana se obtuvieron recuperaciones de 99.72% y 99.55% respectivas a las dos ocasiones en las que se dio mantenimiento a esta.
7. El equipo de Microfiltración es conveniente para la optimización del proceso de tratamiento de aguas residuales en muchos sentidos; por un lado reduce de manera significativa los parámetros que regula la NOM-003-SEMARNAT-1997, por otro lado, como ya se mencionó, tendrá un impacto económico en el proceso ya que al reducirse la dosis de cloro esto repercute directamente en la cuestión económica y por si esto fuera poco, la conveniencia mayor de este proceso es la mejora en la calidad del agua residual que es el objetivo principal de este tipo de estudios.

### Conclusión final

De acuerdo con todo lo que se encuentra recopilado en este estudio, se concluye que la filtración por membranas de Microfiltración es una excelente opción hoy en día para el tratamiento de aguas residuales y que en un futuro podría llegar a ser la mejor opción para integrarlo al tren de tratamiento de la planta de Ciudad Universitaria (PTARCA).



### **Recomendaciones**

1. A pesar de que los resultados de este trabajo llevaron a concluir que la Microfiltración tendrá un impacto importante en la economía de la planta, por la disminución en la dosis necesaria de cloro, es recomendable realizar trabajos posteriores donde se corrobore esta conclusión. Realizando pruebas de la dosis de cloro que se debe aplicar al efluente de la membrana y estimar el impacto económico.
2. Es necesario profundizar en buscar las mejores condiciones de operación del módulo de Microfiltración, realizando pruebas experimentales que permitan conocer las condiciones óptimas del módulo. Para este efecto se recomendaría una siguiente etapa de evaluación a través de una prueba piloto.



## BIBLIOGRAFIA

- ◆ **Agenson, K. O., Oh, J. y Urase, T.** *Retention of a wide variety of organic pollutants by different nanofiltration/reverse osmosis membranes: controlling parameters of process.* J. Membr. Sci. 225, (2003), 91-103.
- ◆ **Arboleda Valencia, J.** *Teoría y práctica de la purificación del agua.* Bogotá: Acodal/Mac Graw Hill, 2003.
- ◆ **APHA-AWWA-WPCF,** *Metodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales.* España: Ediciones Díaz, 1992.
- ◆ **AWWA,** manual M53: *Microfiltration and Ultrafiltration Membranes for Drinking Water.* Denver: AWWA, 2005.
- ◆ **AWWARF, LdE, WRC:** *Tratamiento del agua por procesos de membrana.* Madrid: McGraw Hill/Interamericana de España, 1998.
- ◆ **Breath, Elias. and Jabez, Van Cleef.** "High-shear membrane separation for process and wastewater treatment". *Chemical Engineering.* September 1998. Pp 94-104.
- ◆ *Climate change in Latin America* No 12 DFID: Londres, RU. 2004
- ◆ Comisión Nacional del Agua (**CONAGUA**). 2006. Panorama del Agua en el Valle de México. IV Foro Mundial del Agua. México, D.F.
- ◆ CONAGUA. "Gaceta de administración del agua", Volumen 1, México D.F. 2007
- ◆ **Degrémont.** *Manual técnico del agua.* 4ª ed. Bilbao: Artes Gráficas Grijelmo, S.A. 1979.
- ◆ Dirección General de Obras y Conservación del Campus Universitario 2008, (Comunicación personal del operador de la planta Cerro del agua).
- ◆ *Ensayos preliminares de microfiltración directa para potabilización de aguas superficiales en la Sabana de Bogotá/ Prieto P., Ma. Isabel y Carrillo R., Ana Isabel. // Revista de Ingeniería, Facultad de ingeniería Universidad de los Andes. No. 22 (Noviembre, 2005). Págs. 133-140.*
- ◆ **Fane, A.G.,** *An overview of the use of microfiltration for drinking water and waste water treatment.* Documento presentado en el Microfiltration Symposium for Water Treatment, Irvine, CA., 1994.
- ◆ **García Santiago, Erick I.** *Análisis de potencialidad de reuso de agua residual en el edificio 12 del Instituto de Ingeniería de la UNAM.* Universidad Nacional Autónoma de México, México 2009.



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

- ◆ **Genta, R.M.**, *The immune regulation of intestinal helminthiases*. En: Paradise, L.J., Bendinelli, M., Friedman, H. *Enteric Infections and Immunity*, Plenum Press, New York, USA, 1996.
- ◆ **González, J. F.**, *Wastewater treatment in the Fishery Industry*. FAO Fisheries Technical Paper-355. ISBN 92-5-103788-4. 1996.
- ◆ **Hernández, Aurelio M.** *Depuración de aguas residuales*. España: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1990.
- ◆ Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (**INEGI**). 2000a. *Censo de Población y Vivienda*.
- ◆ INEGI. 2005a. Censo Nacional de Población. [www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx)
- ◆ INEGI. 2006a. Cuaderno Estadístico de la Zona Metropolitana del Valle de México. [www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx)
- ◆ INEGI. 2006b. Anuario Estadístico del Distrito Federal 2005. [www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx)
- ◆ **Ives, K. J.** and **Pienvichtr, V.** "Kinetics of the filtration of dilute suspension". *Chemical Engineering Science*, 1965, Págs. 965-973.
- ◆ **Jacangelo, J.G.** et al. Mechanism of Cryptosporidium, Giardia, and MS2 Virus Removal by MF and UF. *Journal AWWA*, septiembre de 1995.
- ◆ **Lee F. y Jones-Lee**, Public Health Significance of Waterborne Pathogens in Domestic Water Supplies and Reclaimed Water. Disponible en: [www.water.sesep.drexel.edu/outbreaks/misc\\_documents/fredlee1.html](http://www.water.sesep.drexel.edu/outbreaks/misc_documents/fredlee1.html)
- ◆ **Maldonado, Víctor Y.** "Filtración". *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida*, Manual I: Teoría, Tomo I. Lima: OPS/CEPIS/PUB, 2004.
- ◆ **Metcalf & Eddy**. *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización*. 3ª ed. Madrid. McGRAW-HILL/ INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S.A. 1996.
- ◆ **Mourato, D** et al, *Applications of Immersed Membranes in the Drinking Water Field*. Documento presentado en la AWWA Membrane Technology Conference, Louisiana, febrero de 1997.
- ◆ **Negrete, M.E.** 2000. "Migración". *En la ciudad de México en el fin del segundo milenio*. El Colegio de México- GDF. México.
- ◆ NMX-AA-005-SCFI-2000, Calidad del agua - Determinación de grasas y aceites recuperables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Diario Oficial de la Federación, 2000.



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

- ◆ NMX-AA-102-SCFI-2006, Calidad del agua - Detección y enumeración de organismos coliformes, organismos coliformes termotolerantes y *Escherichia coli* presuntiva - Método de filtración en membrana. Diario Oficial de la Federación, 2006.
- ◆ NMX-AA-113-SCFI-1999, Análisis de agua - determinar huevos de helminto - Método de prueba. Diario Oficial de la Federación, 1999.
- ◆ NOM-001-SEMARNAT-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación, 2003.
- ◆ NOM-003-SEMARNAT-1997, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público. Diario Oficial de la Federación, 2003.
- ◆ PNUMA, SMA-GDF y Centro Geo. 2004. *Informe GEO Ciudad de México: una visión territorial del sistema urbano ambiental*. México, DF.
- ◆ **Rojas-Valencia**, N., T. Orta de Velásquez, M. Vaca-Mier y V. Franco (2004) Ozonation byproducts issued from the destruction of microorganisms presented in wastewaters treated for reuse. *Water Science and Technology*, 50(2):187-193.
- ◆ **Salazar**, Claudia D. *Reducción de disruptores endocrino, microcontaminantes y modificación de características organolépticas de las aguas residuales utilizando técnicas de filtración avanzadas*. E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM). Ingeniería Civil: Ordenación del Territorio, Urbanismo y Medio Ambiente, 26 Abril 2006.
- ◆ Secretaria del Medio Ambiente (**SMA**). 2006a. Hacia la Agenda XXI de la Ciudad de México. [www.sma.df.gob.mx](http://www.sma.df.gob.mx) SMA. México, DF.
- ◆ **Shalan**, H. F. *Development of fouling control strategies pertinent to nanofiltration membranes*. *Desalination*, 153 (1-3), 2002, 125-131.
- ◆ **Sheinbaum**, Claudia P. *Problemática ambiental de la Ciudad de México: Diagnóstico y experiencia de gestión de 2001-2006*. México: Limusa, 2008. 309 págs.
- ◆ **Silva Sandoval**, Claudia. *Diagnóstico fisicoquímico del agua para reuso en Ciudad Universitaria*, Universidad Nacional Autónoma de México, México 2009.
- ◆ Sistema de Aguas de la Ciudad de México (**SACM**). 2006. Informe.
- ◆ Tecnoadecuación Ambiental, S.A de C.V., (1996). "Proyecto ejecutivo, Contrato de obra pública No. 96-B2-DGO-L0100-0500, Construcción y/o adecuación de 26 fosas sépticas con post tratamiento para aguas residuales en Ciudad Universitaria", México D.F.



## EVALUACION DEL PROCESO DE MICROFILTRACION PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

---

- ◆ *Tratamiento de Aguas Residuales en Latinoamérica: Identificación del problema*/**Reynolds**, Kelly A.//De la llave. sep-oct, 2002.
- ◆ **Wackerly**, Dennis D., Mendenhall William, Scheaffer, Richard L. Estadística matemática con aplicaciones. 6<sup>a</sup> Ed. México: THOMSON, 2002.
- ◆ **Wang**, K. Y. & **Chung**, T. *The characterization of flat composite nanofiltration membranes and their applications in the separation of Cephalexin*. J. Membr. Sci, 247 (1-2), 2005, 37-50.