

**ESTUDIO SOBRE LA APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE FILTRACIÓN POR
MEMBRANA A LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTOS DE AGUAS
RESIDUALES**

RONCANCIO PARRA DARÍO



UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ D.C.

2015

**ESTUDIO SOBRE LA APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE FILTRACIÓN POR
MEMBRANA A LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTOS DE AGUAS
RESIDUALES**

RONCANCIO PARRA DARÍO

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Civil**

Asesor Disciplinar: I.C. Arcila Torres Héctor Fabio

Asesor Metodológico: Lic. Laura Milena Cala Cristancho

UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ D.C.

2015

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	12
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
2. JUSTIFICACIÓN.....	17
3. HIPÓTESIS.....	19
4. OBJETIVOS.....	20
4.1. OBJETIVO GENERAL	20
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
5. ANTECEDENTES.....	21
6. MARCO DE REFERENCIA	26
6.1. MARCO CONCEPTUAL	26
6.1.1. Aguas residuales	26
6.1.2. Características de las aguas residuales	27
6.1.3. Teoría y descripción de las membranas	43
6.2. MARCO LEGAL	63
7. DISEÑO METODOLÓGICO	68
7.1. ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN.....	68
7.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	68
7.3. DISEÑO MUESTRAL.....	68
7.3.1. Población.....	68
7.3.2. Muestra.....	68
7.3.3. Variables.....	69
7.4. FASES DE INVESTIGACIÓN	69
7.5. INSTRUMENTOS Y TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN 70	
8. RESULTADOS	72
8.1. DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES A TRAVÉS DE ENSAYOS DE LABORATORIO	72

8.1.1. Sistema por filtración por membranas empleado para tres diferentes vertimientos	72
8.1.2. Sistema de filtración por membranas empleado para un mismo tipo de vertimiento	76
8.2. APLICACIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO TERCIARIO DE AGUAS RESIDUALES A TRAVÉS DE LA PLANTA PILOTO DE MEMBRANAS DE FILTRACIÓN.....	79
8.2.1. Laguna de oxidación del municipio de Chía.....	84
8.2.2. Lagunas de oxidación de Madrid 1	87
8.2.3. Lagunas de oxidación de Madrid 2	89
8.2.4. Planta de tratamiento de aguas residuales Echavarría (Madrid 3)	94
8.3. COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA EL VERTIMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES DESDE LO ESTABLECIDO POR LAS NORMATIVA COLOMBIANA.	103
9. ANÁLISIS DE RESULTADOS	105
9.1. DETERMINACIÓN A TRAVÉS DE ENSAYOS DE LABORATORIO LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES A TRAVÉS DE ENSAYOS DE LABORATORIO.....	105
9.1.1. Sistema de filtración por membranas empleado para tres diferentes vertimientos	105
9.1.2. Sistema de filtración por membranas empleando un mismo tipo de vertimiento	111
9.2. APLICACIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO TERCIARIO DE AGUAS RESIDUALES A TRAVÉS DE LA PLANTA PILOTO DE MEMBRANAS DE FILTRACIÓN.....	114
9.2.1. Laguna de oxidación del municipio de Chía.....	114
9.2.2. Lagunas de oxidación de Madrid 1	116
9.2.3. Lagunas de oxidación de Madrid 2.....	117
9.2.4. Planta de tratamiento de aguas residuales Echavarría (Madrid 3) ..	118
9.3. COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA EL VERTIMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES DESDE LO ESTABLECIDO POR LAS NORMATIVAS INTERNACIONALES Y COLOMBIANAS.....	122

10. CONCLUSIONES.....	124
11. RECOMENDACIONES	127
BIBLIOGRAFÍA	128
ANEXOS	132

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Umbral de olor de compuestos olorosos asociados con aguas residuales.....	30
Tabla 2. Compuestos residuales típicos producidos en actividades agrícolas, comerciales e industriales que están clasificados como contaminantes prioritarios.....	33
Tabla 3. Clasificación general de microorganismos.....	39
Tabla 4. Descripción de microorganismos presentes en aguas naturales y residuales.....	41
Tabla 5. Agentes potencialmente infecciosos presentes en agua residuales domesticas no tratada.....	42
Tabla 6. Eficiencia general de un proceso de tratamiento de agua para eliminar contaminantes.....	45
Tabla 7. Costos de inversión y mantenimiento para la planta de MF en el caso estudio parte A.....	50
Tabla 8. Costos de inversión y mantenimiento para la planta de MF en el caso estudio parte B.....	51
Tabla 9. Costos comparativos y medios de filtración alternativos.....	51
Tabla 10. Ventajas y desventajas de las configuraciones de las membranas de ultrafiltración.....	55
Tabla 11. Eficiencia de la UF para la eliminación de indicadores microbianos.	58
Tabla 12. Requisitos para los vertimientos procedentes de instalaciones de depuración de aguas residuales urbanas mediante tratamiento secundario...	64
Tabla 13. Requisitos para los vertidos procedentes de instalaciones de depuración de aguas residuales urbanas en zonas de alta montaña (> 1.500 m).....	64
Tabla 14. Límites de vertimientos en ríos receptores en México.....	66
Tabla 15. Normas mínimas de los vertimientos a los cuerpos de agua.....	67

Tabla 16. Parámetros de aguas residuales obtenidos en el proceso de filtración de membranas como un sistema tratamiento terciario en lagunas de oxidación de Chía.....	73
Tabla 17. Parámetros de aguas residuales obtenidos en el proceso de filtración de membranas como un sistema tratamiento terciario en lagunas de oxidación de Madrid 1.....	74
Tabla 18. Parámetros de aguas residuales obtenidos en el proceso de filtración de membranas como un sistema tratamiento terciario en lagunas de oxidación de Madrid 2.....	75
Tabla 19. Parámetros de aguas residuales obtenidos en el proceso de filtración de membranas como un sistema tratamiento terciario en lagunas de oxidación de Madrid Echavarría primer día.....	76
Tabla 20. Parámetros de aguas residuales obtenidos en el proceso de filtración de membranas como un sistema tratamiento terciario en lagunas de oxidación de Madrid Echavarría segundo día.....	77
Tabla 21. Parámetros de aguas residuales obtenidos en el proceso de filtración de membranas como un sistema tratamiento terciario en lagunas de oxidación de Madrid Echavarría tercer día.....	78
Tabla 22. Tabla resumen de resultados.....	78
Tabla 23. Parámetros hidráulicos obtenidos en el primer día.....	95
Tabla 24. Medidas de las membranas de polipropileno de $1\mu\text{m}$ y $5\mu\text{m}$	96
Tabla 25. Parámetros hidráulicos obtenidos en el segundo día.....	99
Tabla 26. Parámetros hidráulicos obtenidos en el tercer día.....	101
Tabla 27. Comparación de la normativa nacional con los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio de la PTAR Echavarría	104

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sólidos totales en aguas residuales.....	28
Figura 2. Porcentajes de la composición de los sólidos presente en las aguas residuales.....	30
Figura 3. Ciclo del nitrógeno.....	37
Figura 4. Estructura típica de microorganismos celulares: (a) eucarísticas (b) procariótico.....	40
Figura 5. Clasificación de las técnicas de separación con base en el tamaño de las especies a filtrar y a factores operación.....	44
Figura 6. Procesos de separación seleccionados y utilizados en el tratamiento de agua y rango de tamaños de varios materiales hallados en agua bruta....	47
Figura 7. Representación esquemática de los cuatro módulos principales de membranas: (a) de placa y bastidor; (b) módulo espiral; (c) módulo tubular; (d) de fibra hueca.....	46
Figura 8. Diagrama de un elemento de membrana de Ol de fina fibra hueca....	48
Figura 9. Estructuras moleculares de los principales materiales orgánicos de las membranas.....	49
Figura 10. Membranas de celulosa de microfiltración.....	80
Figura 11. Tanques de almacenamiento de fibra de vidrio.....	80
Figura 12. Bombas centrifugas empleadas en el sistema.....	80
Figura 13. Carcasa y membranas instaladas con su respectivo manómetro..	81
Figura 14. Membrana de microfiltración de cerámica.....	81
Figura 15. Planta piloto de membranas de filtración.....	83
Figura 16. Membrana de carbón activado después procesar las lagunas de oxidación del municipio de Chía.....	85
Figura 17. Carcasa de la membrana de carbón activada después de procesar el agua residual.....	86

Figura 18. Membranas de microfiltración de celulosa y polipropileno de 5 μm , después de haber sido sometidas al primer tipo de agua.....	86
Figura 19. Membrana de carbón activado después procesar las lagunas de oxidación del municipio de Madrid.....	87
Figura 20. Membranas de microfiltración de celulosa de 5 μm , después de haber sido sometidas al segundo tipo de agua.....	88
Figura 21. Agua residual del vertimiento de la laguna de oxidación de Madrid 1.....	88
Figura 22. Agua residual a la salida de la planta piloto de membranas de filtración.....	89
Figura 23. Agua residual del vertimiento de la laguna de oxidación de Madrid 2.....	90
Figura 24. Agua residual a la salida de la planta piloto de membranas de filtración.....	90
Figura 25. Membrana de carbón activado después de 3 pruebas con diferentes tipos de aguas.....	91
Figura 26. Carcasa de la membrana de carbón activado después de procesar diferentes tipos de aguas residuales.....	91
Figura 27. Membrana de celulosa después de 3 pruebas con diferentes tipos de aguas.....	92
Figura 28. Carcasa de la membrana de celulosa después de procesar diferentes tipos de aguas residuales.....	92
Figura 29. Membrana de polipropileno de 5 μm después de 3 pruebas con diferentes tipos de aguas.....	93
Figura 30. Carcasa de la membrana de polipropileno después de procesar diferentes tipos de aguas residuales.....	93
Figura 31. Planta piloto de membranas de filtración (nuevos cartuchos).....	94

Figura 32. Medidas de la membrana de cerámica de 0,5 μm	96
Figura 33. Comparación de las membranas al inicio y al final del primer día.....	96
Figura 34. Comparación del agua residual a la entrada, en la mitad del proceso y a la salida de la planta piloto.....	97
Figura 35. Tanques de agua filtrada.....	97
Figura 36. Tanque de agua tratada.....	98
Figura 37. Planta piloto el segundo día de filtración un mismo tipo de agua residual.....	98
Figura 38. Comparación de las membranas de filtración a la entrada y a salida del segundo día.....	100
Figura 39. Comparación de aguas residuales desde la entrada del planta piloto hasta la salida en el segundo día.....	100
Figura 40. Planta piloto el tercer día de filtración un mismo tipo de agua residual.....	101
Figura 41. Comparación de las membranas al inicio y al final de los ensayos de laboratorios del tercer día.....	102
Figura 42. Comparación de aguas residuales desde la entrada del planta piloto hasta la salida en el tercer día.....	103

TABLA DE ANEXOS

Anexo 1. Plano de la planta piloto.

Anexo 3. Resultados ANALQUIM Laguna de oxidación Chía.

Anexo 4. Resultados ANALQUIM planta piloto Chía.

Anexo 5. Resultados ANALQUIM Laguna de oxidación Madrid 1.

Anexo 6. Resultados ANALQUIM planta piloto Madrid 1.

Anexo 7. Resultados ANALQUIM Laguna de oxidación Madrid 2.

Anexo 8. Resultados ANALQUIM planta piloto Madrid 2.

Anexo 9. Resultados CIAN LTDA Planta de tratamiento Echavarría primer día.

Anexo 10. Resultados CIAN LTDA planta piloto primer día.

Anexo 11. Resultados CIAN LTDA Planta de tratamiento Echavarría segundo día.

Anexo 12. Resultados CIAN LTDA Planta piloto segundo día.

Anexo 13. Resultados CIAN LTDA Planta de tratamiento Echavarría tercer día.

Anexo 14. Resultados CIAN LTDA Planta piloto tercer día.

INTRODUCCIÓN

La presente investigación se refiere al estudio de aplicación de las técnicas de filtración por membranas a los sistemas de tratamiento de aguas residuales, aplicando este proceso como un pulimiento a este tipo de líquido. Actualmente este sistema se emplea como tratamientos terciarios de aguas residuales, procesos de purificación en industrias y en tratamientos en plantas de aguas potable. A través del trabajo se expresan los diferentes tipos de membranas para los proceso de retención de partículas, químicos, materia orgánica y microorganismos presentes en el agua.

La principal característica de este estudio, es conocer el comportamiento de las membranas de filtración, tomando como pruebas en diferentes plantas de tratamiento de aguas residuales, con el fin, de realizar el pulimiento a este tipo de agua, buscando lograr la reutilización de este líquido con destino a actividades agrícolas y de recreación logrando un agua de muy buena calidad. Para esto se midieron parámetros físicos, químicos y biológicos de las aguas residuales, tomando muestras de los municipios de Madrid y Chía.

Para este procedimiento se observaron parámetros físicos como: sólidos suspendidos, sedimentables y disueltos, color, olor, temperatura, turbiedad, conductividad y densidad. Entre los parámetros químicos se analizaron la Demanda Bioquímica Oxígeno, Demanda Química Oxígeno y pH; y por parte de las características biológicas, se realizaron laboratorios en lugares certificados por el IDEAM para la medición de coliformes totales y algunos parámetros más de los anteriormente mencionados, los cuales se encuentra definidos en el marco conceptual de la investigación.

Entre las membranas de filtración se encontraron varios tipos de técnicas, entre éstos procesos de microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa. Los ensayos de laboratorio se realizaron por medio de membranas de microfiltración, con una configuración en espiral y una geometría cilíndrica. Se emplearon tres tipos de materiales para este proceso de investigación, los cuales fueron: celulosa, polipropileno y cerámica.

Esta investigación busca profundizar el interés de conocer la aplicación de estas técnicas de filtración, adaptar las membranas de filtración como un tratamiento terciario o como un proceso de pulimiento a este tipo de agua residual, con el fin, de lograr la reutilización del agua y cumpliendo con la normativa colombiana frente a estos parámetros mencionados anteriormente.

En el marco conceptual se explica cada una de las características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales, expresando cada una de sus definiciones a través de diversas fuentes bibliográficas. Al igual que se realizó enfoque a la teoría de las membranas de filtración, explicando cada uno de los medios filtrantes, configuraciones de módulos, materiales presentes para este tipo de filtración, geometría de las membranas y un ejemplo que explica la inversión y el mantenimiento que se puede aplicar estas técnicas, al igual que una ecuación empleada en el Sistema Ambiental de Chile para conocer la inversión de membranas, conociendo como factor el caudal de procesamiento en el sistema.

Por medio de tablas y figuras se presentó el comportamiento de las membranas su configuración y eficiencias en general expresando el procedimiento más adecuado para el funcionamiento de estas membranas. Al igual que el parámetro de microorganismos que se encuentran en el agua residual, las enfermedades que puede producir cada una de estos organismos patógenos.

Se analizaron cada uno de los objetivos específicos como fases de investigación, logrando resultados, con el fin, de cumplir el objetivo general, el cual se basa en la aplicación de estas técnicas a los municipios colombianos, pero la limitación de este proyecto, fue la falta de análisis de las membranas en más plantas de tratamiento de varios municipios, en un proceso secundario, puesto que se analizaron mecanismos como lagunas de oxidación y una planta de tratamiento de aguas residuales convencional, que no logran cumplir como tratamiento secundario, afectando el estado de las membranas de filtración empleada en el laboratorio.

La primera etapa de esta investigación, fue la creación de la planta piloto de membranas de filtración, con el propósito de realizar las correspondientes pruebas y de esa forma conocer la aplicación de las técnicas de filtración por membranas como un tratamiento terciario.

La segunda etapa fue la realización de los ensayos de laboratorio, lo cuales se tomaron de la laguna de oxidación de Chía, la laguna de oxidación de Madrid 1, la laguna de oxidación de Madrid 2 y la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas Echavarría del municipio de Madrid. Las lagunas de oxidación se analizaron con un mismo sistema de filtración, es decir, que no se cambiaron los filtros para estos tres tipos de aguas, para conocer el comportamiento de las membranas estando en un estado de saturación. Mientras tanto con la muestra tomada con la PTAR Echavarría, se analizó el comportamiento de estas membranas por medio de un mismo sistema, sin embargo se realizaron las

pruebas en diferentes días con una fuente captadora para los ensayos. El análisis se realizó por medio de parámetros físicos, químicos y biológicos, realizando el ensayo de algunos parámetros en dos diferentes laboratorios certificados por el IDEAM y conociendo el comportamiento de factores hidráulicos, como son el caudal, la carga hidráulica y el tiempo de retención hidráulico.

La última etapa fue comparar los datos obtenidos a la salida de la planta piloto con el fin de conocer si se cumple con la Normativa Colombiana.

Finalmente y después de los laboratorios realizados a través de la membranas de filtración, se encontraron muy buenos resultados en los tres parámetros que nos expresa el comportamiento de las membranas, estas características son los coliformes totales, sólidos suspendidos totales y sedimentables de la planta de tratamiento Echavarría, aunque estos resultados presentaron porcentajes por encima del 70%, no lograron cumplir con la función principal de un tratamiento terciario, que es la reutilización de aguas residuales.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Según lo referido por el ingeniero Jairo Alberto Romero Rojas¹, profesor de la Escuela Colombiana de Ingeniería, en el año 2008, Colombia requería 900 plantas de tratamiento de aguas residuales, puesto que, en esa época se encontraba solamente el 9% de los procesos de tratamiento de aguas residuales que requiere el país. De lo anterior, se concluye que los tratamientos de las aguas residuales no son óptimos para los niveles de contaminación que se presentan actualmente en los municipios colombianos. En este momento el Estado colombiano ha realizado inversiones a proyectos de infraestructura en materia de ampliación de plantas de tratamiento de aguas residuales y la creación de éstas, pero mientras se inician estos proyectos de millones de dólares, muchas plantas de tratamiento se encuentran en estados en los cuales no se aplican los tratamientos sugeridos por la norma y por las entidades encargadas de esto.

Por otra parte, los nuevos proyectos a los cuales el gobierno ha invertido, solo se implementan hasta un tratamiento secundario como es el caso de la ampliación de la PTAR del salitre en Bogotá, la creación del proyecto Canoas en la misma ciudad y las ampliaciones de algunas plantas en Valle del Cauca. Las plantas de tratamiento de algunos municipios como por ejemplo Chía y Madrid, se encuentran en estados en los cuales no se cumplen los decretos vigentes sobre los vertimientos establecidos, provocando contaminación en los cuerpos de agua del país, y muchas de estas obras de aguas residuales se encuentran en un estado deteriorado.

El proceso de filtración por membrana no está implementado actualmente en los cascos urbanos de Colombia, como un sistema de tratamiento terciario de agua residual. Países más industrializados, enfocan a que sus industrias y sus plantas de tratamiento residual operen por medio de diversas técnicas de filtración, para mejoramiento de la calidad del agua que en muchos casos es reutilizado y las que no, son vertidas a corrientes superficiales sin que se produzca impacto negativo en ella, puesto que, estas técnicas como sistema de tratamiento terciario de agua residual ofrecen procesos más adecuados frente a la eliminación de la materia orgánica, bacterias y virus que contienen normalmente ese tipo de aguas.

¹ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Colombia sólo trata 9% de sus aguas residuales. En: Espectador, Bogotá: (25, Sep., 2008); En línea <<http://www.elespectador.com/impreso/negocios/articuloimpreso-colombia-solo-trata-9-de-sus-aguas-residuales>> [citado en 09 de Mayo del 2014].

De acuerdo con lo anteriormente explicado, se busca por medio de ensayos de laboratorio, encontrar por medio de microfiltración un pulimento a este tipo de agua residual, con el propósito de lograr la reutilización del agua analizada en la investigación. Por lo cual se plantea la siguiente pregunta: ¿es posible que a través de las técnicas de filtración por membrana aplicar a los sistemas de tratamiento terciario de aguas residuales, cumplan con los parámetros de calidad que establece la normativa colombiana?

2. JUSTIFICACIÓN

Como consecuencia de esta investigación, se pretende observar los diferentes parámetros para la realización de un estudio detallado sobre la aplicación de las técnicas de filtración por membrana a los sistemas de tratamiento de aguas residuales, con el propósito de evitar la contaminación de fuentes hídricas, y a través de este sistema resolver los problemas que se están produciendo actualmente en los diversos municipios colombianos en materia de saneamiento básico.

A través de este estudio, se plantea analizar las características fundamentales que proporcionan los diversos tipos de membranas que actualmente son empleados como sistemas de tratamiento, y al mismo tiempo, observar las condiciones actuales que viven los municipios colombianos en materia de aguas residuales, con el propósito de detallar a fondo las técnicas que mejor se acomoden a las necesidades actuales que requieran los habitantes de diversos cascos urbanos y rurales que se encuentran en Colombia.

Mediante esta investigación y con lo anteriormente mencionado, se plantean alternativas en las cuales se controle la contaminación de las fuentes hídricas nacionales; entre estas alternativas encontramos el estudio de las técnicas de filtración por membrana como tratamiento terciario de las aguas residuales.. Mediante este proyecto, se busca implementar las técnicas de filtración por membrana como nuevo sistemas de tratamiento terciario de las aguas residuales, con el fin resolver el problema que mencionaba el ingeniero Romero y buscar el proceso de reutilización de este tipo de agua en consumo.

Con los sistemas de filtración por membrana, se busca modificar las técnicas de tratamiento, para que cumplan la normativa existente y logren mejorar la calidad del agua, lo cual redundará en una adecuada salubridad y bienestar de la comunidad en los diversos municipios colombianos en materia de aguas residuales; al mismo disminuir las tasas de morbilidad y mortalidad que son producidas por la falta de control frente a este contaminante natural y realización de proyectos para la recolección de agua apta para el consumo humano, lograr con éste un adecuado proceso de reutilización de aguas para futuros suministros de aguas a los diversos cascos municipales, así mismo, se busca profundizar en la línea de hidrotecnia especialmente el tema de suministro y saneamiento básico, con el fin conocer los parámetros y estándares de calidad que se ofrece a través

de las técnicas de filtración por membrana a los sistemas de tratamiento de aguas residuales.

3. HIPÓTESIS

Los tratamientos terciarios de aguas residuales son el pulimiento de este tipo de aguas para lograr un mejor vertimiento a las fuentes hídricas y la reutilización de éstas, las técnicas de filtración por membranas son un tipo de pulimiento, estas membranas son aptas como un tratamiento de este tipo para los municipios colombianos.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Estudiar la aplicación de las técnicas de filtración por membrana a los sistemas de tratamiento de aguas residuales para los municipios colombianos.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar a través de ensayos de laboratorio las características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales obtenidas como muestra.
- Aplicar el sistema de tratamiento terciario a varios tipos de aguas residuales a través de la planta piloto de membranas de filtración.
- Comparar los parámetros de la calidad del agua para el vertimiento de las aguas residuales desde lo establecido por la normativa colombiana.

5. ANTECEDENTES

Al hablar de tratamientos de aguas residuales se conocen una gran variedad de técnicas, las cuales tiene como objetivo principal la descontaminación y control frente este tipo de aguas. En el caso de esta investigación se hará énfasis en las técnicas de filtración por membrana en los sistemas de tratamiento terciarios de aguas residuales. De estas técnicas se encuentran una gran variedad de investigaciones que pretenden demostrar la operación de las membranas frente al tratamiento nombrado; pero claro está, que cada uno de estos investigadores ha tomado la decisión de trabajar en una sola técnica de filtración, tomando y analizando diferentes parámetros como son el funcionamiento y la descontaminación que pueda ofrecer.

Se encuentra un trabajo de grado de la Pontificia Universidad Javeriana de Colombia realizado por Sandra Carolina Alfaro Garzón y María Ximena Rojas Sánchez², titulado “Validación de los métodos de filtración por membrana y sustrato definido Readyult, para detención de coliformes totales y *Escherechiacoli* en aguas crudas, tratadas y potables en el acueducto de Zipaquirá”, en el cual demuestran que a través de las membranas de filtración si es posible conocer la concentración de coliformes que se encuentran en este tipo de aguas, y por medio de la técnica de membranas de filtración se concentran estos tipos de microorganismos en aguas crudas, tratadas y potables, mientras que por las pruebas Readyult se encuentra la desventaja que no tiene las mismas características que ofrece las técnica anteriormente mencionada, puesto que este no puede ser empleado para aguas residuales o potables.

En otras investigaciones realizadas en Colombia sobre las membranas de filtración, se encontró un estudio realizado en la Pontificia Universidad Javeriana en la cual utilizan esta técnica en el área del agua potable, este estudio realizado por Elisa Marcela Carrillo Zapata y Aura María Lozano Caicedo³ titulado “Validación de detención de coliformes totales y fecales en agua potable utilizando

² ALFARO GARZON, Sandra Carolina. Validación de los métodos de filtración por membrana y sustrato definido Readyult, para detención de coliformes totales y *Escherechiacoli* en aguas crudas, tratadas y potables en el acueducto de Zipaquirá. Bogotá, 2006; Tesis de grado para optar por el título de Microbióloga industrial; PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA. [En línea] <<http://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/ciencias/tesis271.pdf>> [citado en 02 de Mayo del 2014].

³CARRILLO ZAPATA, Elisa Marcela., LOZANO CAICEDO, Aura María. Validación de detención de coliformes totales y fecales en agua potable utilizando Agar Chromocult. Bogotá, 2008; Tesis de grado para optar por el título de Microbióloga Industrial; PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA. [En línea] < <http://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/ciencias/tesis203.pdf>> [citado en 02 de Mayo de 2014]

Agar Chromocult”, este estudio realizado como trabajo de grado, explica cómo se puede retener la acumulación de coliformes por medio de membranas de filtración utilizado el ensayo de Agar Chromocult; en este trabajo se observa como este tipo de laboratorio reduce precios de tratamiento en aguas potables para evitar el incremento de coliformes y los pertinentes estudios y ensayos para ubicación adecuada de la membrana en casos en los cuales este tipo de fuentes se encuentre en grados muy altos de contaminación por las grandes acumulaciones de coliformes totales y fecales.

En la planta de tratamiento de aguas residuales número 3 del municipio de Madrid, Cundinamarca, se encuentra un proceso de filtración por membranas, empleando un proceso de microfiltración con el fin de realizar una etapa de posclarificación, vertiéndola al río Subachoque. El proyecto como tal garantiza grandes porcentajes de retención de partículas presentes en el agua, pero como se mencionaba anteriormente este proceso no está implementado en los cascos urbanos de Colombia. El grupo Phileco World, Inc⁴ es la empresa encargada del proceso de instalación de estas técnicas actualmente utilizada en este municipio colombiano.

Aunque estas investigaciones realizadas en Colombia sobre membranas de filtración no tienen una gran información sobre la operación que se debe tratar frente a sistemas de tratamientos de aguas residuales, pero explican de manera adecuada las propiedades, el funcionamiento y los porcentajes de retención de materia orgánica y microorganismos que pueden garantizar las técnicas de filtración por membrana.

Actualmente este tipo de sistema de tratamiento de aguas residuales no está en la innovación latinoamericana, puesto que, la filtración por membrana se ha desarrollado en países como Unión Europea, Estados Unidos y Japón; en las cuales se encuentra la siguiente investigación realizada por Arcadio Sotto Díaz⁵, estudio que realizó para optar al título de doctorado en la Universidad Rey Juan Carlos, en Madrid (España), titulado “Aplicación de tecnología de membranas de nanofiltración y osmosis inversa para el tratamiento de disoluciones acuosas de compuestos fenólicos y ácidos carboxílicos”; en este estudio se explica el diseño

⁴ PROYECTOS TECNICOS Y MAQUINARIA LTDA. Descripción general del sistema de tratamiento de aguas residuales con tecnología Biolace. Bogotá; proyecto de municipal; Empresa de Acueducto y alcantarillado de Madrid.

⁵SOTTO DÍAZ, Arcadio. Aplicación de tecnología de membranas de nanofiltración y osmosis inversa para el tratamiento de disoluciones acuosas de compuestos fenólicos y ácidos carboxílicos. Madrid, 2008; tesis de doctorado; UNIVERSIDAD REY JUAN CARLOS. [En línea] <<http://ciencia.urjc.es/bitstream/10115/4605/1/Tesis%20ARCADIO%20SOTTO%20D%C3%8DAZ.pdf>> [citado en 02 de mayo del 2014].

de las membranas de filtración por medio de las técnicas de nanofiltración y ósmosis inversa para el tratamiento de disoluciones acuosas, normalmente se ven este tipo de sustancia en aguas industriales; Colombia no es riguroso en los ítems de control en materia de tratamientos de aguas industriales, y la aplicación de este tipo membrana se acomoda a las variaciones de industria con el propósito de detener y/o controlar la contaminación que pueda provocar este tipo de contaminantes en las fuentes hídricas aledañas a éste tipo de compañías.

Continuando con las investigaciones desarrolladas como los tratamientos terciarios, teniendo el enfoque a las técnicas de filtración por membrana, se encontró el proyecto de maestría realizado por David Sanz⁶, presentado a la Universidad Politécnica de Valencia (España), titulado “Estudio de viabilidad de la reutilización de las aguas residuales depuradas de una planta petroquímica mediante tecnología de membrana”, a través de este estudio se encuentra que los sistemas terciarios no solamente se emplean para lograr la pureza de este tipo de aguas, si nó, a su vez, la forma de reutilizarla para sistemas de riego agrícola, para la recreación y en el debido caso el consumo humano. Aunque esta investigación es aplicada a aguas industriales, presenta un proceso de recirculación de las aguas residuales, logrando un sistema de tratamiento terciario, con el propósito de reutilización de este tipo de agua a zonas verdes y uso agrícola.

Sanz plantea que la membrana que mejor garantiza la reutilización de aguas residuales en la planta mencionada es el proceso de Ósmosis Inversa. Esta tecnología conocida a su vez como la hiperfiltración logra eliminar la mayor cantidad de sólidos disueltos en el agua, específicamente las sales ionizadas, logrando con ésto la posibilidad que este tipo de tratamiento que pueda ser utilizado para el aprovechamiento de sistemas de riego en los cultivos agrícolas.

Siguiendo con investigaciones europeas, se encontró un estudio aplicado a las industrias cerveceras en España, con el propósito de prevenir la contaminación de fuentes receptoras que se encuentren cerca a este tipo de fábricas. Rebeca Martínez, de la Universidad Católica de San Antonio, realizó la investigación

⁶ SANZ ESCRIBANO, David. Estudio de viabilidad de la reutilización de las aguas residuales depuradas de una planta petroquímica mediante tecnología de membrana. Valencia, 2007; tesis de maestría; UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA. [En línea] <<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12904/DESARROLLO%20DE%20UN%20SISTEMA%20DE%20OI%20PARA%20LA%20REUTILIZACI%C3%93N%20DE%20AGUAS%20RESIDUALES%20DEPURADAS%20DE%20UNA%20PLANTA%20.pdf?sequence=1>> [citado en 08 de agosto del 2014].

titulada: “Descontaminación de efluentes de la industria cervecera mediante el uso de membranas UF arrolladas en espiral como barrera de seguridad”⁷.

Martínez concluye que este tipo de tecnología puede ser aplicado como un tratamiento terciario siempre y cuando se realice un tratamiento previo, específicamente empleando un sistema de filtración como puede ser el caso de la microfiltración. A su vez determinó que este proceso secundario de aguas residuales no es recomendable para ser distribuido en los de reutilización de zonas verdes y cultivos agrícolas, a menos, que se imprime un sistema terciario aplicado por la técnica de filtración por membranas puesto que este tratamiento lograría la calidad requerida por dicho país.

Por último, se analiza un estudio aplicado en las membranas de filtración, pero en este caso se busca recuperar un compuesto químico. Andrea Guastalli⁸, realizó esta investigación como tesis de doctorado en la Universidad de Barcelona, titulado este proyecto: “Estudio sobre la aplicación de la tecnología de membranas para la recuperación de ácido fosfórico de las aguas de lavado en el proceso de anodizado del aluminio”.

Guastalli analizó la recuperación de ácido fosfórico por medio de membranas de filtración, mientras que se recuperaba las propiedades naturales del agua a través de esta tecnología, a su vez se comprueba que estas técnicas facilitan recuperar compuestos importantes que puedan ser reutilizados para respectivos estudios que influyen que el agua pueda generar microorganismos y enfermedades que puedan poner en riesgo la vida humana.

A través de cada una de estas investigaciones, se conocen las propiedades y los procesos de laboratorio que se deben realizar, con el propósito de lograr que los tratamientos terciarios cumpla los caracteres de calidad por medio de las membranas de filtración.

⁷ MARTÍNEZ MARTÍNEZ, Rebeca. Descontaminación de efluentes de la industria cervecera mediante el uso de membranas UF arrolladas en espiral como barrera de seguridad. Murcia, 2010; tesis de doctorado; UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SAN ANTONIO. [en línea] <<http://repositorio.ucam.edu/jspui/bitstream/10952/59/1/Tesis%20Doctoral%20PDF.pdf>> [citado en 09 de agosto del 2014].

⁸GUASTALLI, Andrea Raquel. Estudio sobre la aplicación de la tecnología de membranas para la recuperación de ácido fosfórico de las aguas de lavado en el proceso de anodizado del aluminio. Barcelona, 2006; tesis de doctorado. UNIVERSIDAD DE BARCELONA. [En línea] <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/69956/GUASTALLI_TESIS.pdf;jsessionid=BC83C308FC3074EE17E50C3CD74F84.tdx2?sequence=1> [citado en 09 de agosto del 2014].

En cada uno de estudios mencionados de este numeral, se presentó un comportamiento a selección de membranas de microfiltración frente a los demás proceso de filtración por membrana, puesto que este medio filtrante logra retener la mayor cantidad de sólidos suspendidos y a su vez los materiales en los cuales se fabrica éstos son más aptos para resistir las concentraciones provenientes del agua residual.

6. MARCO DE REFERENCIA

6.1. MARCO CONCEPTUAL

6.1.1. Aguas residuales

Las aguas residuales recogidas en los municipios y distritos de un país deben ser vertidas, en última instancia, a fuentes receptoras. Este proceso en la actualidad se encuentra dividido en tres tipos de tratamientos, los cuales buscan la eliminación de todos organismos que circulan a través de las aguas residuales y a su vez, lograr la reutilización de este tipo de aguas después de realizar el mecanismo de descontaminación.

De acuerdo con la literatura de Metcalf y Eddy, los tratamientos que realizan para la purificación de aguas residuales son tratamientos primarios, secundarios y terciarios, los autores anteriores señalan que procesos primarios se define como “el tratamiento primario contempla el uso de operaciones físicas tales como la sedimentación y el desbaste para la eliminación de los sólidos sedimentables y flotables presentes en el agua residual”⁹. Este mecanismo de descontaminación se especificará más adelante a través de la investigación.

El tratamiento secundario es definido como el proceso de oxidación de la materia orgánica que no pudo ser removido por los procesos de sedimentación, empleando de esta manera técnicas de proceso biológico y procesos químicos; por ultimo tenemos el tratamiento terciario. Es el proceso que busca entregar un producto con todos los estándares de calidad que logre ser reutilizada para procesos recreativos, usos agrícolas y buscando su reutilización para el consumo humano. Al igual que el tratamiento primario estos procesos se explicarán más detalladamente en otros capítulos de la investigación.

En este trabajo se busca analizar la implementación de las membranas de filtración a los sistemas de tratamientos terciarios del agua residual; a su vez, conocer las sustancias contaminantes que se retienen a través de este dispositivo, por medio de exámenes de laboratorio y que tipos de técnicas de filtración, que garanticen una mejor calidad de vertimientos, con el propósito de realizar procesos de reutilización.

⁹METCALF & EDDY. Ingeniería de aguas residuales, volumen I. Madrid: McGRAW-HILL, Ed. Tercera, 1995. p 93.

A continuación se explican las propiedades y características que presentan todos los tipos de aguas residuales y cómo influyen los microorganismos, que hacen parte de este líquido, a la creación de enfermedades transmitidas por medio de éstas, a su vez, conocer la normatividad que rige en Colombia y los parámetros que se deben tener en cuenta al momento de garantizar la calidad en los sistemas de tratamientos de agua residual.

Los conceptos que se define a continuación han sido revisados por varias fuentes bibliográficas.

6.1.2. Características de las aguas residuales

Antes de especificar las características y propiedades de las aguas residuales, hay que conocer los orígenes que ocasionan, que este líquido tenga alteraciones en su naturaleza. Este tipo de aguas se clasifican en cuatro categorías: domésticas, industriales, pluviales y escorrentías de uso agrícola.

- **Aguas residuales domésticas (ARD).** Las ARD son las provenientes de las actividades domésticas de la vida diaria como lavado de ropa, baño, preparación de alimentos, limpieza, etc., estos desechos presentan un alto contenido de materia orgánica, detergentes y grasas. Su composición varía según los hábitos de la población que los genera.
- **Aguas Lluvia (ALL).** Este tipo de aguas es originado por el escurrimiento superficial de las lluvias que fluyen desde los techos, calles, jardines y demás superficies del terreno. Los primeros flujos de ALLL son generalmente muy contaminados debido al arrastre de basura y demás materiales acumulados en las superficies.
- **Residuos líquidos industriales (RLI).** Los RLI son los provenientes de los diferentes procesos industriales. Su composición varía según el tipo de industrial y aún, para un mismo proceso, se presentan características diferentes en cada una de estas industrias. Los RLI pueden ser alcalinos o ácido, tóxicos, coloreados, etc.; su composición refleja el tipo de materias primas utilizado dentro del ciclo industrial.
- **Aguas residuales agricultura (ARA).** Estas aguas son las que provienen de la escorrentía superficial de las zonas agrícolas. Se caracterizan por la presencia de pesticidas, sales y un alto contenidos de sólidos en suspensión. La descarga de estas aguas es recibida directamente por los ríos o por los alcantarillados.

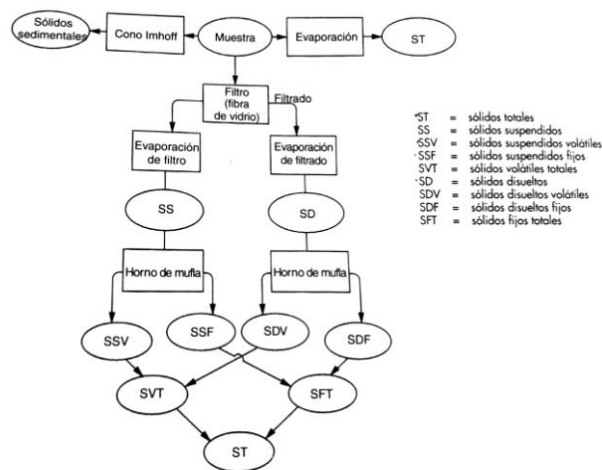
6.1.2.1. Características físicas

Las características más importantes son el contenido de sólidos totales, término que engloba toda la materia en suspensión, la materia sedimentable, la materia coloidal y la materia disuelta, utilizando a su vez otras características como el olor, la temperatura, la densidad, el color y la turbiedad, con el propósito determinar las materias que circulan por las aguas residuales.

- **Sólidos totales**

Se define el contenido de sólidos totales como los residuos obtenidos después de evaporar el agua entre las temperaturas de 103°C a 105°C. Entre éstos se encuentra una gran variedad de sólidos que presentes en el agua residual. En la figura 1, se explican los diferentes tipos de sólidos encontrados en las aguas residuales.

Figura 1. Sólidos totales en aguas residuales.



Fuente: METCALF & EDDY. Ingeniería de aguas residuales, volumen I. 3 ed. Madrid: McGraw-Hill, 1995. p.58. [citado en 14 de agosto del 2014]

A continuación se describe cada uno de ellos.

- **Sólidos volátiles totales (SVT):** Si los sólidos totales se someten a una combustión bajo una temperatura de $500 \pm 50^\circ\text{C}$ durante un tiempo de 20 minutos, la materia orgánica se convierte a CO_2 y H_2O .
- **Sólidos suspendidos totales (SST):** los SS se determinan como la cantidad de material retenido después de realizar la filtración de un determinado volumen de muestra. El volumen que se filtra es casi siempre

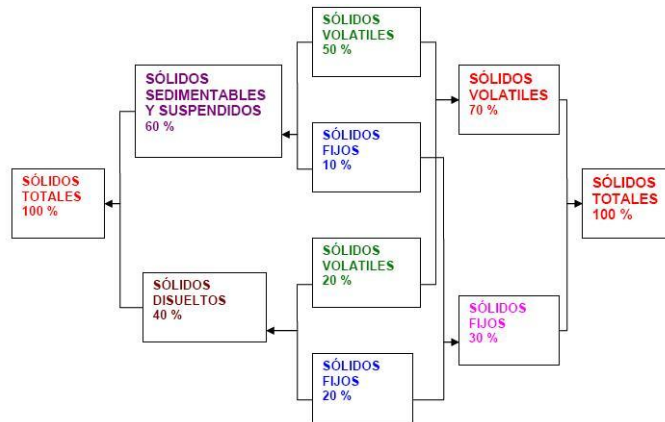
muy pequeño (50mL) por dificultades que se presentan en la filtración. Estas filtraciones se hacen en crisoles de Gooch* que se utilizan como medio filtrante el asbesto o la fibra de vidrio.

- **Sólidos suspendidos volátiles (SSV):** los sólidos suspendidos volátiles representan la fracción de SS, que se obtiene por la pérdida de peso al realizar una ignición a una temperatura de 500 ± 50 °C.
- **Sólidos disueltos (SD):** los sólidos que han sido filtrados corresponden a los sólidos coloidales y disueltos. La fracción coloidal está compuesta por partículas del tamaño de 0.001 y $1\mu\text{m}$. mientras que los SD que se encuentran compuestos por materia orgánica, inorgánica e iones, estos se encuentran entre tamaños de partículas menores de $0.001\mu\text{m}$. para este proceso de eliminación se aplican técnicas de filtración por membrana en los sistemas de tratamiento terciarios de agua residual.
- **Sólidos sedimentables (SSD):** la determinación de los sólidos sedimentables es la suma importante en el tratamiento de las ARD al permitir la determinación de la eficiencia de los procesos de sedimentación. A diferencia de los de más sólidos que se presentan en unidades de mg/L, este parámetro se mide en unidades de mL/L. Es la cantidad de materia que sedimenta de una muestra en un periodo de tiempo.
- **Sólidos fijos totales (SFT):** residuo que permanece después de incinerar los sólidos totales a una temperatura de 500 ± 50 °C en un horno de mufla.
- **Sólidos suspendidos fijos (SSF):** residuo remanente después de calcinar sólidos suspendidos totales a una temperatura de 500 ± 50 °C.
- **Sólidos disueltos fijos (SDF):** residuos remanente después de calcinar sólidos disueltos a una temperatura de 500 ± 50 °C.

En la figura 2, se muestra los porcentajes de sólidos presentes en las aguas residuales.

* Llámase así a unos crisoles de porcelana, cuyo fondo está agujerado en forma de criba y cubierto con un disco de papel de filtro.

Figura 2. Porcentaje de la composición de los sólidos presente en las aguas residuales.



Fuente: UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA. Características de las aguas residuales. Bogotá D.C.: Universidad nacional abierta y a distancia. En línea <http://datateca.unad.edu.co/contenidos/301332/contLinea/leccin_2_caractersticas_de_las_aguas_residuales.html> [citado en 26 de septiembre de 2014]

- **Olores**

Los olores son producidos a través de los gases liberados durante el proceso de oxidación de la materia orgánica. El olor que genera el agua residual es desagradable, pero al mismo tiempo es más tolerable frente al agua residual séptica.

Los olores molestos producen apetito, náuseas, problemas respiratorios y perturbaciones mentales; mientras que los desagradables producen deterioro personal y comunitario. En la tabla 1, se presenta el umbral de olor para los compuestos olorosos asociados con las aguas residuales.

Tabla 1. Umbral de olor de compuestos olorosos asociados con aguas residuales.

Compuesto olorosos	Fórmula química	Peso molecular	Umbral de olor, ppm _v	Olor característico
Amoniaco	NH ₃	17	46,8	Amoniaco
Cloro	Cl ₂	71	0,314	
Crotilmercaptano	CH ₃ -CH=CH-CH ₂ -SH	90,19	0,000029	Zorrillo
Dimetilsulfuro	CH ₃ -S-CH ₃	62	0,0001	Vegetales descompuestos

Tabla 1. (Continuación)

Compuesto olorosos	Formula química	Peso molecular	Umbral de olor, ppm _v	Olor característico
Difenilsulfuro	(C ₆ H ₅) ₂ S	186	0,0047	
Etilmercaptano	CH ₃ CH ₂ -SH	62	0,00019	Coles descompuestas
Sulfuro de hidrógeno	H ₂ S	34	0,00047	Huevos podridos
Indol	C ₈ H ₆ NH	117	0,0001	
Metilamina	CH ₃ NH ₂	31	21	
Metilmercaptano	CH ₃ SH	48	0,0021	Coles descompuestas
Eskatol	C ₉ H ₉ N	132	0,019	Materia fecal
Dióxido de azufre	SO ₂	64,07	0,009	
Tiocresol	CH ₃ -C ₆ H ₄ -SH	124	0,000062	Zorrillo, rancio

Fuente: CRITES, Ron., TCHOBANOGLOUS, George. Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Bogotá D.C.: McGraw-Hill, 2000. p. 55.

- **Temperatura**

En función de la situación geográfica, la temperatura media anual del agua residual varía entre 7°C y 30°C, en regiones frías la temperatura varía entre 7°C y 18°C y en regiones cálidas éste factor varía entre los valores de 13 ° C y 30 ° C.

Algunos autores como Metcalf y Eddy¹⁰, afirman que la temperatura media de las aguas residuales se encuentra en un valor de 15,6 °C. Pero este factor depende de sitio en donde se analice la muestra.

- **Densidad**

Se define la densidad de un agua residual como una masa por unidad de volumen, expresada en Kg/m³. Es una característica física importante del agua residual dado que de ella depende la potencial formación de corrientes de densidad en lodos de sedimentación y otras instalaciones de tratamiento.

- **Color**

El color es un indicativo de la edad de las aguas residuales. Cuando estas son frescas su color es grisáceo, pero a medida que los compuestos orgánicos son desdoblados por las bacterias y condiciones se tornan en anaeróbicos, su color cambia a negro. El *color aparente* es causado por sólidos suspendidos en las aguas residuales, mientras que el *color verdadero* es por causa de las sustancias disueltas y coloidales presente en éstas.

¹⁰Ibid., p.71

- **Turbiedad**

La turbiedad es causada por partículas suspendidas que interfieren el paso de la luz a través del agua. Estas partículas varían en tamaños y van desde las coloidales hasta las granulares, éste se puede medir por métodos visuales y instrumentales.

La medición de la turbiedad se realiza comparando entre la intensidad de la luz dispersa en una muestra y la luz dispersa por la suspensión de referencia bajo las mismas condiciones. El resultado de ésta característica se dan en unidades nefelometrías de turbiedad (NTU).

- **Conductividad**

La conductividad eléctrica (CE) del agua es la medida de la capacidad de una solución para conducir la corriente eléctrica. Como la corriente eléctrica es transportada por iones en solución, el aumento en la concentración de iones provoca un aumento en la conductividad.

6.1.2.2. Características químicas

El estudio de las características químicas de las aguas residuales se aborda en los siguientes cuatro parámetros: materia orgánica, materia inorgánica, medición de contenido orgánico y gases presentes en el agua residual.

- **Materia orgánica**

Cerca del 75% de los sólidos en suspensión y del 40% de los sólidos filtrables de un agua residual de concentración media son de naturaleza orgánica.

Los compuestos orgánicos están formados normalmente por combinaciones de carbono, hidrógeno y oxígeno; con la presencia, en determinados casos, de nitrógeno. A continuación se presenta algunos compuestos que conforman la materia orgánica en las aguas residuales, entre los más importantes están:

- **Proteínas.** Las proteínas son los principales componentes del organismo animal, mientras que su presencia es menos relevante en el caso de organismos vegetales.
- **Hidratos de carbono.** Ampliamente distribuidos por la naturaleza, los hidratos de carbono incluyen azúcares, almidones, celulosa y fibra de madera, compuestos que están presentes en el agua residual.

- **Grasas.** Las grasas animales y los aceites son el tercer componente, en importancia de alimentos. El término grasa, engloba las grasa animales, aceites ceras otros constituyentes presentes en las aguas residuales. El contenido de grasas se determina por extracción de la muestra con triclorotrifluoroetano, debido a que la grasa es soluble en él.

Otros compuestos orgánicos son los *sustancias tensoactivas*, que son los causantes de la aparición de la espuma en las plantas de tratamiento de aguas residuales; compuestos orgánicos volátiles (COV) son aquellos que presenta un punto de ebullición por debajo de 100°C; y por último los *pesticidas y los productos químicos para el uso agrícola*, en su mayor parte son los causantes de las muertes de las vidas presentes a través de cuerpo hídrico.

- **Contaminantes prioritarios**

Tabla 2. Compuestos residuales típicos producidos en actividades agrícolas, comerciales e industriales que están clasificados como contaminantes prioritarios.

Nombre (fórmula)	Uso	Problema asociados
No metales		
Arsénico (As)	Aditivo para la aleación de metales, especialmente el plomo y el cobre en sondas mallas, recubrimientos de cables, calderería. Alto grado de pureza.	Carcinógeno y mutagénico. Puede ocasionar fatiga y falta de energía.
Selenio (Se)	Electrónica, placas xerográficas, cámaras de televisión, células fotoeléctricas, soportes magnéticos para ordenadores.	Aparición de manchas rojas en los dedos y pelo, debilidad general.
Metales		
Bario	Aleaciones a tuberías de aspiración, desoxidante para el cobre.	Inflamable a temperaturas propias de espacios cerrados. Aumento de presión sanguínea.
Cadmio (Cd)	Recubrimiento de metales por baños o electrodeposición, aleaciones maleables y de bajo punto de fusión, sistemas de protección contra incendios, cables de transmisión de potencia.	Se concentra en el hígado, riñones, páncreas y tiroide; se sospecha que provoca hipertensión. Carcinógeno.
Cromo (Cr)	Elemento de aleación y recubrimiento para substratos metálicos y plásticos para aumentar la resistencia a la corrosión, investigación nuclear y altas temperaturas.	Los compuestos del cromo exavalente son carcinógenos y corrosivos para los tejidos.
Plomo (Pb)	Pilas de almacenamiento de energía, aditivo para gasolinas, revestimiento de cables, municiones, conducciones, tanques, chapas.	Daños al cerebro y a los riñones.

Tabla 2. (Continuación)

Nombre (formula)	Uso	Problema asociados
Mercurio (Hg)	Aparatos eléctricos de catálisis, cátodos para la producción de sosa caustica y cloro.	Tóxico para el sistema nervioso central.
Plata (Ag)	Productos fotoquímicos, espejos, conductores de electricidad, purificación de agua, joyería.	Metal tóxico. Decoloración grisácea permanente de la piel, ojos y membranas mucosas.
Compuestos orgánicos		
Benceno (C₆H₆)	Fabricación de etilbenceno, dodecilbenceno, ciclohexano, uso como disolvente.	Carcinógeno. Es Altamente tóxico, inflamable.
Etil-benceno (C₆H₅C₂H₅)	Producto intermedio en la producción de estireno; disolvente.	Tóxico por ingestión, inhalación y adsorción cutánea, irritante de la piel y los ojos.
Tolueno (C₆HC₅H₃)	Gasolina de aviación y de altos octanaje, disolvente de pinturas y recubrimientos, gomas, resinas, la mayoría, productos químicos, explosivos.	Inflamable.
Compuestos halógenos		
Clorobenceno (C₆H₅Cl)	Fenol, disolvente, pesticida, transferencia de calor.	Riesgo de incendio moderado.
Cloroetano (CH₂CHCl)	Cloruro de polivinilo y copolímeros, síntesis orgánica.	Tóxico.
Diclorometano (CH₂Cl₂)	Eliminación de pinturas, desengrase mediante disolventes, procesamiento de plásticos, impulsor de aerosoles.	Narcótico, carcinógeno.
Tetracloroetano (CCl₂CCl₂)	Disolvente para el lavado en seco, disolvente para el desengrasado con vapor, agente secador para metales y otros sólidos.	Irritante para piel y ojos.
Pesticidas, herbicidas, insecticidas.		
Endrina (C₁₂H₈OCl₆)	Insecticida y fumigante.	Tóxico por inhalación.
Lindano (C₆H₆Cl₆)	Pesticida.	Tóxico por inhalación.
Metoxicloro (Cl₃CCH(C₆H₄OC H₃)₂)	Insecticida.	Material tóxico.
Toxafeno (C₁₀H₁₀Cl₈)	Insecticida y fumigante.	Tóxico por inhalación.

Fuente: METCALF & EDDY. Ingeniería de aguas residuales, volumen I. 3 ed. Madrid: McGRAW-HILL, Ed. Tercera, 1995. P.78-79.

- **Medida del contenido orgánico**

Normalmente se utilizan los siguientes métodos para la determinación de la materia orgánica presente en las aguas residuales: Demanda Bioquímica de Oxígeno; Demanda Química de Oxígeno y Carbono Orgánico Total. A continuación se explica cada uno de estas metodologías para la determinación de dicho contenido.

- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).** La DBO se define como la cantidad de oxígeno requerida por los microorganismos en el proceso de estabilización (oxidación) de la materia orgánica biodegradable bajo condiciones aeróbicas. Esta materia servirá como alimento a las bacterias, las cuales derivan energía del proceso de descomposición u oxidación. El periodo de incubación de la DBO es generalmente de cinco días a 20 °C. La DBO¹¹ se calcula por medio de dos ecuaciones a través de procesos de laboratorio; la ecuación (1) calcula el agua de dilución que no ha sido inoculada; la ecuación (2) se utiliza para el agua de dilución que ha sido inoculada.

$$DBO, \frac{\text{mg}}{\text{l}} = \frac{D_1 - D_2}{P} \quad (1)$$

$$DBO, \frac{\text{mg}}{\text{l}} = \frac{(D_1 - D_2) - (B_1 - B_2)f}{P} \quad (2)$$

Donde D_1 corresponde al oxígeno disuelto de la muestra diluida inmediatamente después de la preparación de la muestra (mg/l), mientras que D_2 corresponde a el oxígeno disuelto final de la muestra diluida a una incubación a 20°C (mg/l). P equivale a la fracción volumétrica de muestra.

Para la ecuación (2), B_1 es la concentración de oxígeno disuelto en el testigo antes de la incubación (mg/l), mientras que B_2 es después de la incubación (mg/l) y f es la relación entre inóculo en la muestra ((por 100 inóculo en D_1)/ (por 100 inóculo en B_1)).

La cantidad de DBO ejercida para un tiempo t está dada por la siguiente ecuación:

$$DBO_t = DBOU(1 - e^{-k_1 t}) \quad (3)$$

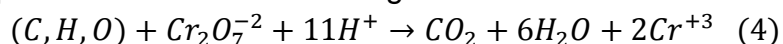
Donde $DBOU$ es la demanda bioquímica de oxígeno carbonácea última dada en mg/l; k_1 es la constante cinética para una relación de primer orden

¹¹CRITES, Ron, TCHOBANOGLIOUS, George. Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Bogotá: McGRAW-HILL, 2000. p. 60.

dada 1/día, este valor oscila entre 0,12 y 0,46 día⁻¹ cuando el agua no se encuentra tratada, en el caso que el agua residual se encuentre por medio de algún tratamiento este valor está entre 0,12 a 0,23 día⁻¹. Este valor a una temperatura de 20°C es de 0,23 día⁻¹; T es la temperatura.

- **Demanda Química de Oxígeno (DQO).** La DQO es una prueba ampliamente utilizada para determinar el contenido de materia orgánica de las aguas residuales. Una de las ventajas de la DQO es el poco tiempo que tarda su realización: un análisis de DBO tarda cinco días y uno de DQO, tres horas. En el ensayo de DQO se podrá oxidar casi que completamente todos los compuestos orgánicos a CO₂ y H₂O, mientras que durante la DBO hay sustancias orgánicas como la lignina que son oxidables por procesos biológicos.

En el ensayo de la DQO se realiza con gran exactitud utilizando el dicromato de potasio, como agente oxidante, en un medio ácido. La reacción que se lleva a efecto es la siguiente:



En consecuencia, los valores de la DQO son mayores que los de la DBO y la diferencia con la presencia de materia orgánica biológica resistente.

- **Carbono Orgánico Total (COT).** Otro método para medir la materia orgánica presente en el agua es la técnica de COT, especialmente indicado para pequeñas concentraciones de materia orgánica. El ensayo se lleva a cabo incluyendo una cantidad conocida de la muestra en un horno a alta temperatura o en un medio químicamente oxidante. En presencia de un catalizador, el carbono orgánico se oxida a anhídrido carbónico, el cual se mide con un analizador infrarrojo o otros medios.

- **Materia inorgánica**

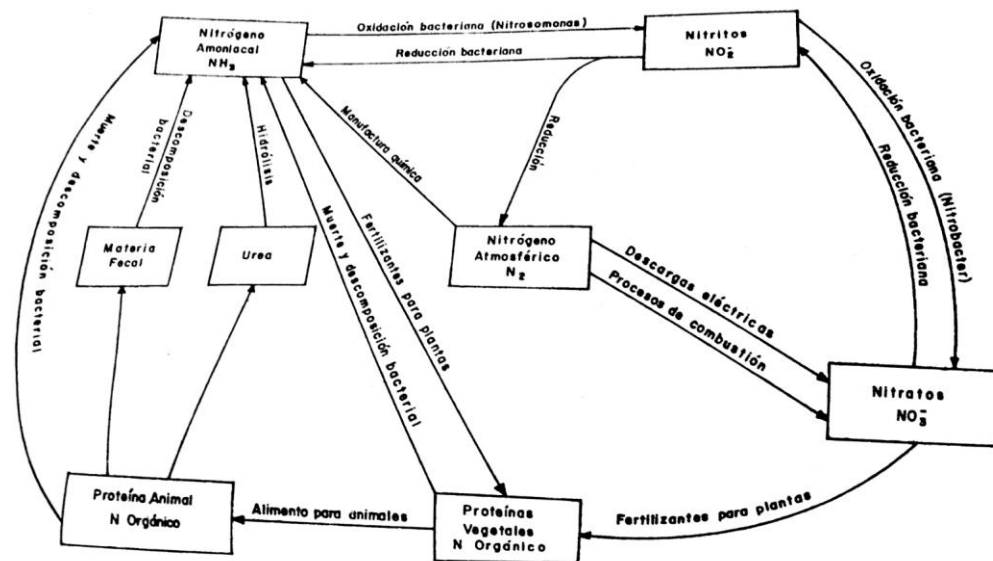
Son varios componentes inorgánicos de las aguas residuales y naturales que tienen importancia para la determinación y control de la calidad del agua. Las concentraciones de las sustancias inorgánicas en el agua aumentan tanto por el contacto del agua con las diferentes formaciones geológicas, como por las aguas residuales, tratadas o sin tratar. Es importante aclarar que a través de las técnicas de filtración por membrana en tratamiento terciario, se busca remover la mayor cantidad de materia inorgánica presente en las aguas residuales.

- **pH.** El intervalo adecuado de pH para existencia de la mayor parte de la vida biológica es relativamente estrecho, en general entre 5 y 9. Las aguas residuales con valores de pH del agua residual tratada no es ajustado antes

de ser vertido, el pH de la fuente receptora puede ser alterado, por ello, la mayoría de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales deben ser descargados dentro de límites específicos de éste.

- **Nitrógeno.** El nitrógeno es un elemento de gran importancia sanitaria al estar presente en el metabolismo de todas las plantas y animales. Como el nitrógeno es indispensable para la síntesis de proteínas, es necesario un conocimiento de la cantidad de nitrógeno presente en ARD y RLI que vaya a ser tratada biológicamente. Si en el proceso biológico no está presente en las cantidades requeridas será necesario agregarlo; contrariamente, habrá que limitar sus concentraciones cuando se quieren proteger los recursos hídricos de crecimiento indeseables de algas.

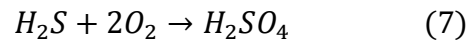
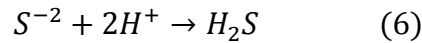
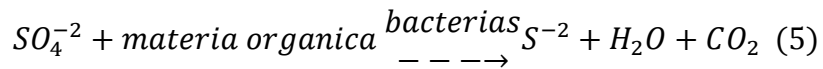
Figura 3. Ciclo del nitrógeno.



Fuente: OROZCO JARAMILLO, Álvaro., SALAZAR ARIAS, Álvaro. Tratamiento biológico de las aguas residuales. Medellín: Universidad de Antioquia- Facultad de ingeniería, 1987. p. 70.

- **Fósforo.** El efecto que tiene el fósforo (P) en el medio ambiente es similar al causado por el nitrógeno. Altas concentraciones de fósforo fomentan el crecimiento de algas y otros organismos biológicos. Las formas más comunes de P, que pueden ser utilizadas por los metabolismos biológicos en aguas residuales, son los ortofosfatos, polifosfatos y fosfatos orgánicos expresados como PO_4^{-3} , $H_2PO_4^{-2}$ y H_3PO_4 .
- **Sulfatos.** Los iones del sulfato se encuentran en las aguas de abastecimiento público y en las aguas residuales. Los sulfatos, por acción bacteriana y en condiciones anaeróbicas, son reducidos a sulfuros y luego a

anhídridos sulfuros. El proceso de descomposición se presenta por tres ecuaciones básicas.



- **Alcalinidad.** La alcalinidad del agua se define como su capacidad para neutralizar ácidos. En aguas residuales, la alcalinidad se debe a la presencia de hidróxidos (OH^-), carbonatos (CO_3^{-2}) y bicarbonatos (HCO_3^-) de elementos como calcio, magnesio, sodios, potasio o de ion amonio.
- **Cloruros.** La concentración de cloruros en agua residuales es un parámetro importante relacionado con su reutilización. Los cloruros en agua naturales provienen de los cloruros lixiviados de las rocas y los suelos con los que ellas hacen contacto. Las fuentes potenciales de cloruros son las descargas de aguas residuales domésticas, industriales y agrícolas a las aguas superficiales. En las aguas residuales, los cloruros son añadidos como consecuencia de uso.
- **Metales.** La determinación de metales se puede realizar por absorción atómica, plasma acoplado por inducción o colorimétricamente. Varias clases de metales son definidas en Standard Methods¹², 1995:
 1. Metales disueltos son aquellos metales presentes en muestras no acidificadas que pasan a través de un filtro de membrana de 0,45 μm .
 2. Metales suspendidos son aquellos metales presentes en muestra sin acidificar que son retenidas en un filtro de membrana de 0,45 μm .
 3. Metales totales que corresponde a la suma de los metales disueltos y metales suspendidos o la concentración de metales determinados en una muestra sin filtrar después de la digestión.
 4. Metales extractables en ácido son aquellos que permanecen en solución después de que una muestra sin filtrar se trata con un ácido mineral diluido en caliente.

¹²AWWA. Standard methods for the examination of water and wastewater. 14 ed. USA: American public health association, 1975.

- **Gases**

La determinación de gases disueltos tales como amoníaco, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, metano y oxígeno, se realiza para ayudar en la operación de sistemas de tratamiento de aguas residuales. las mediciones de oxígeno disuelto y amoníaco se realizan para controlar y monitorear los procesos de tratamiento biológico aerobios. La presencia de sulfuro de hidrógeno se determina no solo por ser gas tóxico y de mal olor, sino porque su formación puede causar corrosión en alcantarillados de concreto.

- **Oxígeno Disuelto (OD).** Todos los organismos dependen en una u otra forma del oxígeno para mantener los procesos metabólicos que producen energía para su crecimiento y su reproducción. La presencia de OD es el factor que determina si los cambios biológicos en las aguas residuales son llevados a cabo por organismos aeróbicos o por anaeróbicos. La determinación de oxígeno disuelto se realiza normalmente por dos métodos: el de *Winkler* y el de los *electrodos*.

6.1.2.3. Características biológicas

- **Microorganismos**

Los principales grupos de organismos presentes en aguas superficiales y aguas residuales están conformados por bacterias, hongos, protozoos, plantas animales y virus.

Tabla 3. Clasificación general de microorganismos.

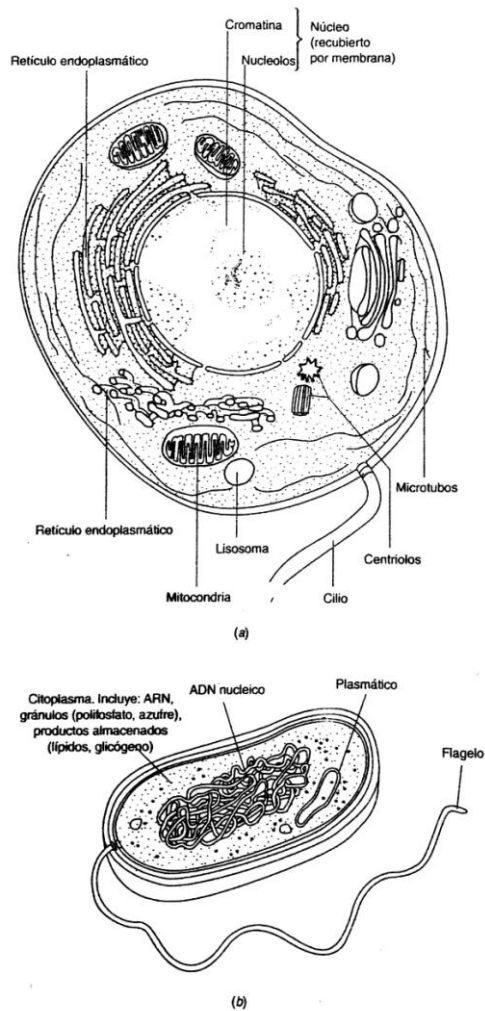
Grupo	Estructuras celular	Caracterización	Tamaño típico	Miembros representativas
Eucarióticos	Eucariótica (contiene un núcleo verdadero encerrado dentro de una membrana nuclear)	Multicelular, con gran diferenciación amplia de células y tejido. Unicelular o miceliales, con escasa o nula diferenciación de tejidos.	10-100µm de diámetro células y tejidos. 10-100µm de diámetro.	Plantas (plantas de semillas, helechos, musgo); animales (vertebrados, invertebrados). Algas, hongos, protozoos.
Eubacterias	Procarióticas (sin membrana nuclear)	Química celular parecida a las eucarióticas	0,2-2µm de diámetro	La mayoría de las bacterias

Tabla 3. (Continuación)

Grupo	Estructuras celular	Caracterización	Tamaño típico	Miembros representativas
Arqueobacterias	Procarióticas	Química celular distinta	0,2-2 μm de diámetro	Metanógenos, halófilos, termoacidófilos.

Fuente: CRITES, Ron., TCHOBANOGLOUS, George. Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Bogotá: McGRAW-HILL, 2000. p. 75.

Figura 4. Estructura típica de microorganismos celulares: (a) eucarióticas (b) procariótico



Fuente: CRITES, Ron., TCHOBANOGLOUS, George. Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Bogotá: McGRAW-HILL, 2000. p. 76.

En la tabla 4, se presenta la descripción general de los microorganismos presentes en aguas naturales y residuales.

Tabla 4. Descripción de microorganismos presentes en aguas naturales y residuales

Organismo	Descripción
Bacterias	Las bacterias son organismos procarióticos unicelulares. El interior de la célula contiene una suspensión coloidal de proteínas, carbohidratos, y otros compuestos orgánicos complejos, llamada citoplasma.
Hongos	Los hongos son eucarióticos multicelulares, fotosintéticos y heterotróficos. Los hongos son aeróbicos estrictos y se reproducen en forma sexual o asexual, por fisión binaria, gemación, o por formación de esporas.
Protozoos	Los protozoos son móviles, de tamaño microscópico, con estructura eucariótica y generalmente unicelulares. La mayoría de los protozoos son aerobios heterótrofos*, algunas anaerobios aerotolerantes y un grupo reducido de anaerobios. Es por eso que los protozoos son usados para el pulimento de los efluentes de procesos de tratamiento biológico, al alimentarse de bacterias y materia orgánica particulada.
Rotíferos	Los rotíferos son eucarióticos animales aerobios, heterotróficos y multicelulares. Su nombre se deriva del hecho que tienen dos juegos de cilios sobre la cabeza que usan para moverse y capturar comida. Los rotíferos son muy efectivos en el consumo de bacterias floculadas y dispersas, y algunas partículas de materia orgánica. Su presencia en un efluente indica un proceso de purificación biológica bajo condiciones aerobias muy eficientes.
Algas	Las algas son eucarióticas unicelulares o multicelulares, autotróficas y fotosintéticas. Son importantes en los procesos de tratamiento biológico, especialmente en los procesos de tratamiento de aguas residuales con lagunas de estabilización, en donde su habilidad de producir oxígeno por fotosíntesis es vital para el ambiente ecológico del agua.
Virus	Los virus están compuestos de un ácido nucleico (ADN o ARN) ubicado en el centro y rodeado por una capa externa de proteína llamada capsida*. Los virus son parásitos intracelulares obligados que se multiplican únicamente dentro de una célula huésped donde reorientan el sistema bioquímico de la célula para reproducirse a mismo.

Fuente: CRITES, Ron., TCHOBANOGLOUS, George. Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Bogotá: McGRAW-HILL, 2000. p. 79.

*Se aplica al organismo que es incapaz de elaborar su propia materia orgánica a partir de sustancias inorgánicas y se nutre de sustancias elaboradas por otros seres vivos: los animales son seres heterótrofos.

*Un cápside es la cubierta de proteína de un virus

- **Organismos patógenos**

Los organismos patógenos presentes en las aguas residuales pueden provenir de desechos humanos que estén infectados o que sean portadores de una enfermedad determinada. Las principales clases de organismos patógenos que pueden encontrarse en aguas residuales son: bacterias, parásitos (protozoos y helmintos) y virus. En la tabla 5 se presentan los principales organismos patógenos encontrados en aguas residuales crudas, junto con la enfermedad que producen y sus síntomas asociados.

- **Coliformes.** Los organismos patógenos que pueden existir en las aguas residuales son generalmente, poco y difíciles de aislar e identificar. “ Por esta razón se prefiere utilizar a los coliformes como organismo indicador de contaminación o, en otras palabras, como indicador de la existencia de organismos productores de enfermedad”¹³.

En la remoción de coliformes tiene efecto principal el tiempo de retención, la temperatura, la radiación ultravioleta, la concentración algal y el consumo de protozoos y dáfneas.

Según Romero Rojas¹⁴, con excepción de algunas cepas de coliformes fecales enteropatógenos que causan diarrea, los coliformes no son patógenos para el hombre. Sin embargo, los coliformes pueden aceptar y transferir genes resistentes a las drogas, por lo cual hacen necesaria su eliminación.

Tabla 5. Agentes potencialmente infecciosos presentes en agua residuales domestica no tratada.

Organismos	Enfermedad	Síntomas
Bacterias		
Campylobacter jejuni	Gastroenteritis	Diarrea
Escherichiacoli (enteropatógeno)	Gastroenteritis	Diarrea
Legionellapneumophila	Legionelosis	Malestra, fiebre, dolor de cabeza, enfermedades respiratorias agudas
Leptospira (150 esp)	Leptospirosis	Ictericia, fiebre (enfermedad de Weil).
Salmonella typhi	Fiebre tifoidea	Fiebre alta, diarrea, úlceras en el intestino delgado
Salmonella (~2100 esp)	Salmonelosis	Envenenamiento por comida

¹³ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Acuitratamiento por lagunas de estabilización. Bogotá: ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA, 1998. p 38-39.

¹⁴ Ibid., p 39.

Tabla 5. (Continuación)

Shigella (4 esp)	Shigellosis	Disentería bacilar
Vibrio cholerae	Cólera	Diarrea aguda, deshidratación
Protozoos		
Balantidium coli	Balantidiasis	Diarrea, disentería
Cryptosporidium parvum	Criptosporidiasis	Diarrea
Cyclospora	Ciclosporiasis	Diarrea severa,
Entamoeba histolytica	Amebiasis (disentería amebica)	Diarrea prolongada con sangrado, abscesos en el hígado y en el intestino delgado.
Giardia lamblia	Giardiasis	Diarrea leve o severa, náuseas, indigestión
Helminthos*		
Ascaris lumbricoides	Ascariasis	Infestación de gusanos intestinales
Enterobius vermicularis	Enterobiasis	Gusanos
Fasciola hepática	Fascioliasis	Lombriz de ovejas
Hymenolepis nana	Hymenolepiasis	Tenia enana
Teniasaginata	Teniasis	Tenia (buey)
T. solium	Teniasis	Tenia (cerdo)
Trichuris trichiura	Trichuriasis	Gusano intestinal alargado
Virus		
Adenovirus (31 clases)	Enfermedades respiratorias	
Enterovirus (72 clases, p. ej., polio, eco y virus coxsackie)	Gastroenteritis, anomalías cardiacas, meningitis	
Hepatitis A	Hepatitis infecciosa	Ictericia, fiebre, vomito
Agente norwalk	Gastroenteritis	
Parvovirus (3 clases)	Gastroenteritis	
Rotavirus	gastroenteritis	

Fuente: CRITES, Ron., TCHOBANOGLOUS, George. Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Bogotá: McGRAW-HILL, 2000. p. 82.

6.1.3. Teoría y descripción de las membranas

6.1.3.1. Membranas de filtración

En este capítulo se explican las membranas de filtración, actualmente utilizadas en los sistemas de tratamiento de agua residual, tratamientos para la purificación de agua potable, procesos industriales y procesos domésticos para potabilización del agua para la remoción de sustancias presentes en el líquido procesado por los acueductos.

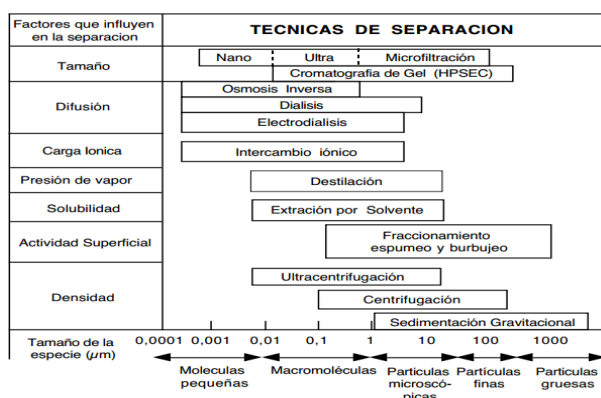
*Los helmintos citados son aquellos de importancia a nivel mundial.

Una membrana de filtración es un film delgado que se encuentra separado por dos fases: alimentación y permeado; que actúa como una barrera selectiva al transporte de materia. Este tipo de técnica se inició para desalación de agua de mar y lograr el consumo humano de ésta.

Después de varios estudios en países desarrollados como Japón, Estados Unidos y algunos países europeos, se comprobó que estas técnicas pueden ser utilizadas para post-tratamiento, logrando con esto la remoción de partículas y microorganismos que no se lograron sedimentar en los tratamientos primarios y secundarios.

Actualmente se utilizan cuatro técnicas de filtración por membranas: microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y osmosis inversa. A continuación se describirá cada uno de estos procesos de tratamiento terciario de aguas residuales. En la figura 5 se explica los tipos de membranas utilizadas para las PTAR, PTAP y en procesos industriales.

Figura 5. Clasificación de las técnicas de separación con base en el tamaño de las especies a filtrar y a factores operacionales



Fuente: GUIZARD, Christian. Técnicas membranarias de filtración de líquidos. 2 ed. Mérida: Universidad de los Andes, 1999. En línea
 <<http://www.firp.ula.ve/archivos/cuadernos/S451B.pdf>> [citado en 22 de septiembre del 2014]

En la tabla 6, se presenta la eficiencia general que presentan las membranas de filtración frente a otros procesos de tratamiento de aguas. Para esto es importante aclarar la clasificación de la eficiencia que se le está otorgando a la categoría del contaminante. P= pobre (20% eliminación); F= bien (20% a 60% de eliminación); G= bueno (60% a 90% de eliminación); E= excelente (90% a 100% de eliminación); -= datos insuficientes.

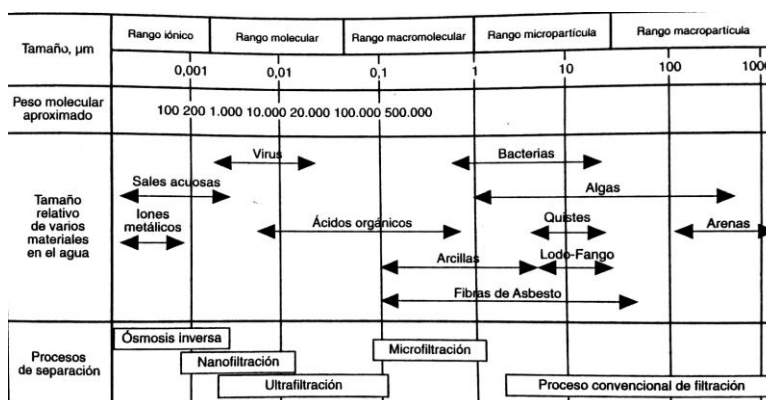
Tabla 6. Eficiencia general de un proceso de tratamiento de agua para eliminar contaminantes.

Categoría del contaminante	Procesos de coagulación, sedimentación, filtración	Desendurecimiento calcáreo	Osmosis inversa	Ultrafiltración	Oxidación química desinfección
Coliformes	G-E	G-E	E	E	E
Giardia lamblia	G	G	E	E	G
Virus	G-E	G-E	E	E	E
Legionella	G-E	G-E	E	E	E
Turbidez	E	G	E	E	P
Materia organica					
COV	P	P-F	F-G	P	P-G
COS	P-G	P-F	F-E	P	P-G
Pesticidas	P-G	P-F	F-E	P	P-G
THM	P	P	F-G	P	P
Percusores de THM	F-G	F-G	G-E	P-F	P
Color	F-G	F-G	G-E	F	F-E
Hierro	F-E	E	G-E	G	G-E
Manganeso	F-E	E	G-E	G	F-E
Sabor y color	P-F	P-F	-	-	F-E

Fuente: MALLWVIALLE, Joel., ODENDAAL, Peter E., WIESNER, Mark R. Tratamiento de agua por procesos de membrana; principales procesos y aplicaciones. Madrid: McGraw-Hill, 1998. p. 386.

En la figura 6 se presenta los procesos de separación (técnicas de filtración por membrana), los tamaños de los materiales presentes en agua bruta y después de los procesos secundarios de aguas residuales y los respectivos rangos presentes en el agua.

Figura 6. Procesos de separación seleccionados y utilizados en el tratamiento de agua y rangos de tamaños de varios materiales hallados en agua bruta.



Fuente: MALLWVIALLE, Joel., ODENDAAL, Peter E., WIESNER, Mark R. Tratamiento de agua por procesos de membrana; principales procesos y aplicaciones. Madrid: McGraw-Hill, 1998. p. 389.

- **Configuraciones del módulo**

La unidad de operación en la que se disponen las membranas para su utilización se denomina o se conoce como módulo. Esta unidad de trabajo consta de las membranas, las estructuras de soporte de la presión, las puertas de entrada de alimentación y salida de la concentración y de puntos de extracción de permeado.

Los cuatro tipos principales de módulos que se encuentran en el mercado son: placas y bastidor, arrollamiento espiral, tubular y de fibra hueca.

- **Placa y bastidor.** Estos módulos están hechos de membranas de cara plana y placas de soporte. La alimentación circula entre las membranas de dos placas adyacentes. El espesor de la lámina líquida está entre el rango de 0,5 y 3 mm.
- **Arrollamiento espiral.** Una envoltura de dos membrana plana encerrado en una hoja flexible prosa (colector de permeado), está sellada por tres de sus bordes. La alimentación fluye paralela al eje del tubo de permeado.
- **Tubular.** El módulo tubular es la configuración más simple en las membranas, se moldea sobre la pared interior de un tubo soporte porosos. Cada elemento de membrana multicanal está alojado individualmente o bien en haces paralelos (hasta 99 elementos), formado así módulos de membranas con un área superficial total de 0,2 a 7,2 m².
- **Fibra hueca.** Las fibras están reunidas en haz de varios miles incluso millones. El flujo de alimentación tiene lugar por dentro de las fibras (configuración de dentro afuera) o bien por fuera de las fibras (configuración exterior- interior).

A continuación en la figura 7 y 8, se presenta el tipo de configuraciones y las partes que constituyen las membranas de filtración.

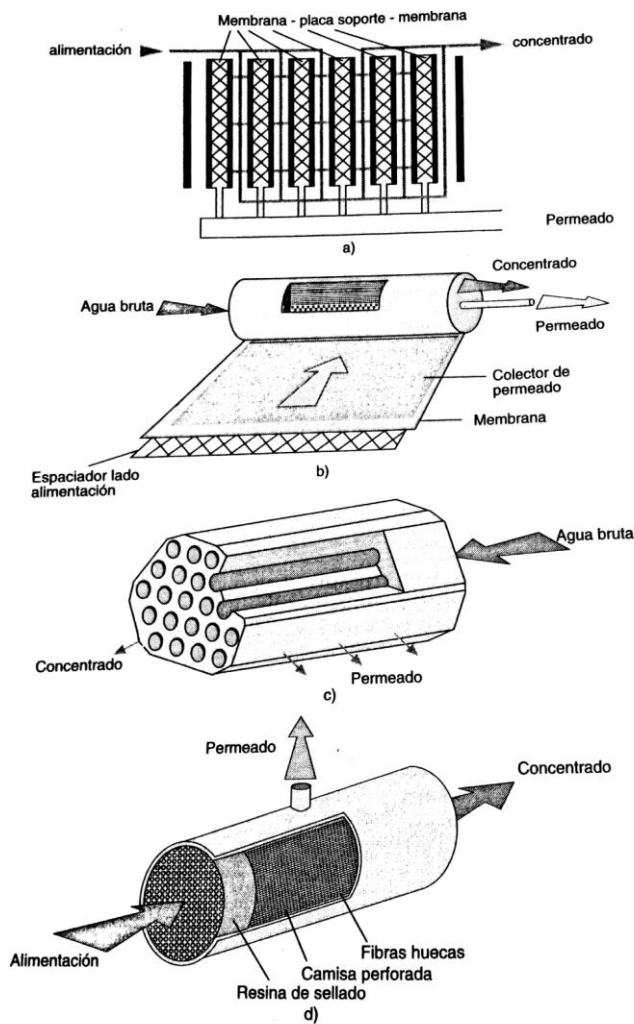
- **Recuperación de las aguas residuales.**

Se han anulado un gran número de aplicaciones para recuperación de aguas residuales. “Éstas, normalmente, pertenece a zonas donde la lluvia y las corrientes de agua son muy escasas para poder soportar un suministro fluido de distribuciones de agua potable a la población local”¹⁵.

¹⁵ MALLWVIALLE, Joel., ODENDAAL, Peter E., WIESNER, Mark R. Tratamiento de agua por procesos de membrana; principales procesos y aplicaciones. Madrid: McGraw-Hill, 1998. p. 65.

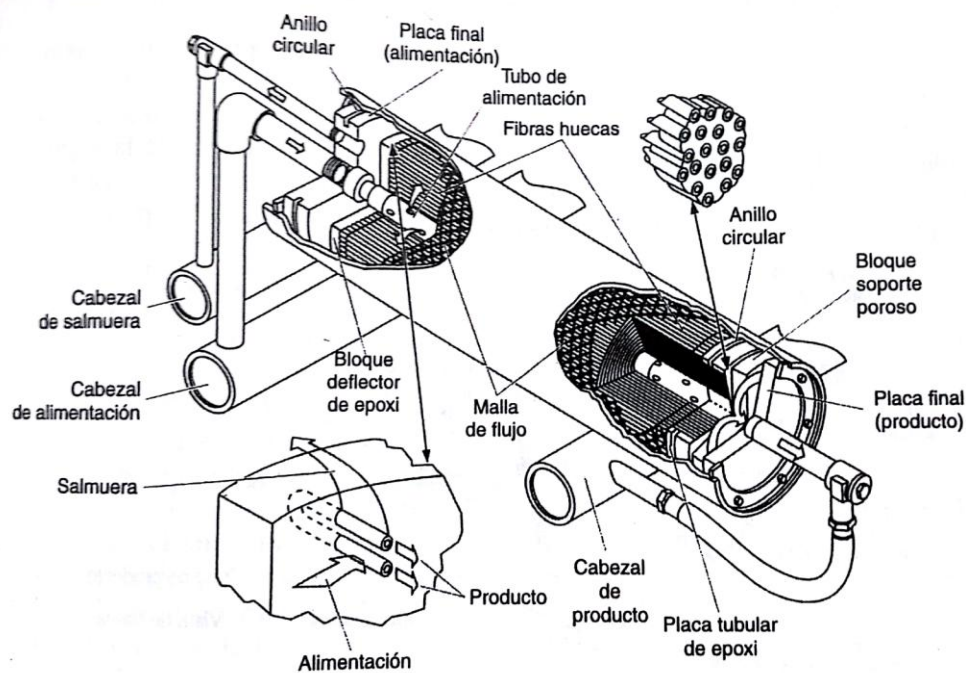
Los primeros resultados indicaron que el tratamiento de aguas residuales, concentradas con unidades de separación de membranas, utiliza menos de la tercera parte de necesidades de energía convencional y que algunas de las unidades de membrana alcanzan sus objetivos de tratamiento.

Figura 7. Representación esquemática de los cuatro módulos principales de membranas: (a) de placa y bastidor; (b) módulo espiral; (c) módulo tubular; (d) de fibra hueca.



Fuente: MALLWVIALLE, Joel., ODENDAAL, Peter E., WIESNER, Mark R. Tratamiento de agua por procesos de membrana; principales procesos y aplicaciones. Madrid: McGraw-Hill, 1998. p. 34.

Figura 8. Diagrama de un elemento de membrana de OI de fina fibra hueca.



Fuente: MALLWVIALLE, Joel., ODENDAAL, Peter E., WIESNER, Mark R. Tratamiento de agua por procesos de membrana; principales procesos y aplicaciones. Madrid: McGraw-Hill, 1998. p. 297.

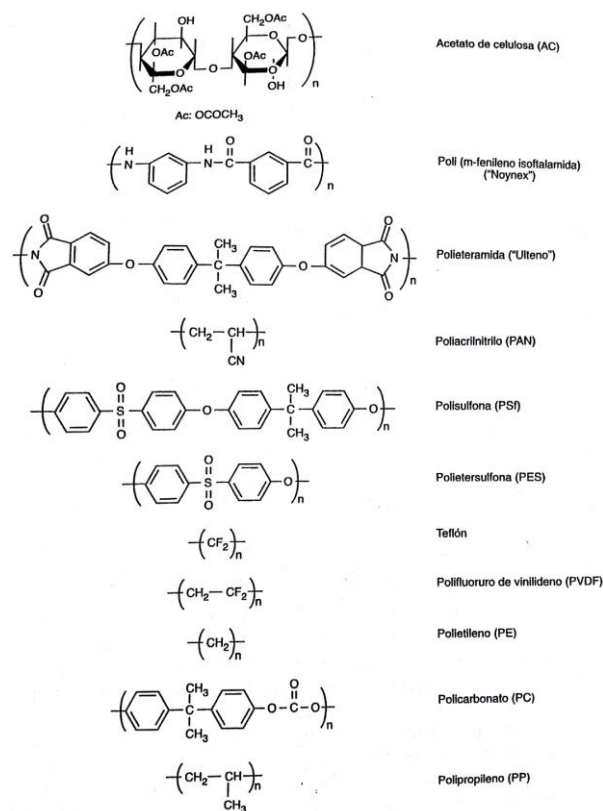
- **Clasificación de acuerdo con su naturaleza química.**

Las membranas sintéticas pueden realizarse a partir de un gran número de diferentes materiales: orgánicos (polímeros) o inorgánicos (metales, cerámica, vidrio, etc).

Las membranas orgánicas son básicamente polímeros que pueden ser utilizados, pero por necesidades del proceso y vida de la membrana, solo se utiliza en la práctica un número limitado. Los más usados ampliamente son la celulosa y sus derivados.

A continuación se presenta las estructuras moleculares de los principales materiales orgánicos.

Figura 9. Estructuras moleculares de los principales materiales orgánicos de las membranas.



Fuente: MALLWVIALLE, Joel., ODENDAAL, Peter E., WIESNER, Mark R. Tratamiento de agua por procesos de membrana; principales procesos y aplicaciones. Madrid: McGraw-Hill, 1998. p. 26.

Las membranas inorgánicas generalmente poseen mayor estabilidad química, mecánica y térmica en comparación con los polímeros orgánicos. Sin embargo, tiene la desventaja de ser muy frágiles y más caros que las membranas orgánicas.

- **Configuración según su geometría**

Las membranas pueden prepararse en dos formas geométricas: plana y cilíndrica. Con base en las diferentes dimensiones, pueden distinguirse los siguientes tipos de membranas cilíndricas.

- Membranas tubulares con diámetro interno mayor a 3mm.
- Membranas tubulares de fibra hueca con diámetro interno menor de 3 mm.

- **Ejemplo de costos de operación y mantenimiento**

Este ejemplo de costos y operación se lleva a cabo para un caudal de 75.700 m³/día, resultando los precios en dólares.

A continuación se ilustra una serie de tablas, mostrando los parámetros para la inversión y mantenimiento de una planta de Microfiltración y los costos comparativos de la MF y medios filtrantes alternativos.

Tabla 7. Costos de inversión y mantenimiento para la planta de MF en el caso estudio parte A*

Elemento	Costo en dólares de EE. UU.*
O. civil y tuberías	930.000
Estructura de entrada	60.000
Instalación de alimentación química	720.000
Depósitos de floculación	—
Depósitos de sedimentación	—
Filtro de desgaste	—
Filtros	—
Prefiltros de membrana	350.000
Membranas	7.910.000
Manipulación del agua de lavado residual y distribución de lodos	2.310.000
Depósitos de contacto CT y clarificado	1.540.000
Estación de bombeo de agua tratada	820.000
Edificios	2.740.000
Electricidad e instrumentación	3.180.000
Total	20.560.000

* Los costos de construcción están basados en índice ENR de 1993 de 6.000. No incluyen los servicios, derechos de paso, financiación del terreno, administración ni coste de ingeniería. Todos los costes son para una planta de 75.700 m³/día.

Fuente: MALLWVIALLE, Joel., ODENDAAL, Peter E., WIESNER, Mark R. Tratamiento de agua por procesos de membrana; principales procesos y aplicaciones. Madrid: McGraw-Hill, 1998. p. 516.

* ENR: Engineering News Record (Registro de Noticias de Ingeniería)

Tabla 8. Costos de inversión y mantenimiento para la planta de MF en el caso estudio parte B.

Costos de operación y mantenimiento ^a (O y M)	
Elemento	Costo en dólares de EE. UU.
Personal ^b	52.000
Gastos varios de operación ^c	10.000
Mantenimiento de edificios y terrenos	5.000
Mantenimiento de equipos	20.000
HVAC ^d	6.000
Energía eléctrica	
Alumbrado y equipo ^e	87.000
Equipo básico de bombeo ^f	75.000
Productos químicos	65.000
Evaluación de residuos ^g	22.000
Reposición de membranas ^h	250.000
Total	592.000

^a Todos los costes son para una planta de 75.700 m³/día (caudal medio anual de 47.000 m³/día).

^b Una persona operador/mantenedor a una tasa de 25 \$/hora y 2.080 horas/año por empleado.

^c Incluye costes varios de personal (entrenamiento, vestuario, etc.), oficina y costes de laboratorio.

^d Basado en 10,7 \$/m² de calefacción y refrigeración para las zonas de trabajo y 2,69 \$/m² para todas las demás zonas.

^e Basado en 0,12 \$/kWh de coste de energía eléctrica; alumbrado y una permisión de más zonas de 10,7 kWh/m²/mes para el equipo (ítems individualizados).

^f Representa el coste de energía de bombeo para pérdidas de carga de planta solamente (no se incluyen los bombeos de agua bruta y agua tratada (potable); basado en un promedio de 7,3 m de pérdida de carga a través de los procesos de membranas y 0,12 \$/kWh de costes de energía.

^g Basado en descarga a la red de saneamiento.

^h Basado en una vida de membrana de 5 años.

Fuente: MALLWVIALLE, Joel., ODENDAAL, Peter E., WIESNER, Mark R. Tratamiento de agua por procesos de membrana; principales procesos y aplicaciones. Madrid: McGraw-Hill, 1998. p. 516.

Tabla 9. Costos comparativos y medios de filtración alternativos en dólares*.

Proceso	Costes alternativos de filtración	
	Inversión	Operación y mantenimiento
MF	\$20.560.000	\$592.000
Filtración convencional	\$21.200.000	\$566.000
Filtración directa	\$19.550.000	\$546.000

Los costes de construcción están basados en un índice ENR de 1993 de 6.000. Los costes no incluyen servicios, derechos de paso, financiación de terrenos, administración ni costes de ingeniería. Todos los costes son para una planta de 75.700 m³/día.

Fuente: MALLWVIALLE, Joel., ODENDAAL, Peter E., WIESNER, Mark R. Tratamiento de agua por procesos de membrana; principales procesos y aplicaciones. Madrid: McGraw-Hill, 1998. p. 517.

* Costes: costos

- **Microfiltración (MF)**

La microfiltración es el proceso más antiguo de las técnicas de filtración por membranas. Es el mecanismo más “libre”, puesto que no requiere de pre-tratamiento de filtración, teniendo en cuenta que el tamaño de su poros se encuentra entre 0,05 μm a 5 μm . “A consecuencia de su tamaño se utiliza especialmente para la eliminación de partículas, microbios y se puede manipular a través de presiones ultra bajas”¹⁶.

Entre sus aplicación, se encuentra la remoción de partículas y microorganismos presentes en las aguas residuales; se utiliza normalmente como un pre-tratamiento de membranas de ósmosis inversa (OI) o nanofiltración (NF); aunque en su proceso normal no elimina la suficiente materia orgánica que se encuentra después de tratamiento secundario, a través de procesos preliminares como puede ser coagulantes, floculantes y precibado, se logra remover más éste tipo de contaminante, y por último, se implementa para deshidratación de los lodos y la eliminación de materia coloidal en corrientes de rechazo antes de los procesos de OI.

De acuerdo con la fundación de investigación de la AWWA¹⁷, la microfiltración muestra una geometría, de las cuales las que presenta un mejor comportamiento en las aguas residuales son de fibra hueca y tubular. A continuación se indican las ventajas y desventajas que presenta este tipo de membranas.

Las membranas capilares de fibra hueca presenta unas luces o diámetros internos entre un rango de 0,4 mm a 1,5 mm. Las ventajas son: las bajas velocidades de flujo cruzado en el rango de valores cercanos a 0 hasta 2,5 m/s; elevando la relación entre área superficial/ volumen o densidad de compactación de membranas; las fibras puede ser retrolavadas; bajas presiones transmembranas con un rango de 0,2 a 1 bar y bajas presiones de caída entre un rango de 0,1 a 1 bar. Como desventajas se indica un pequeño diámetro de tubo son susceptibles de cegarse y un gran número de vibras en el módulo despliega dificultades provocando fugas en las membranas en grandes plantas.

Las membranas tubulares tienen diámetros mayores, éstos se encuentra en un rango de 1 a 2,5 cm. Las ventajas son: los grandes diámetros de los canales, que permiten tratar un alto contenido de sólidos y grandes partículas; son posibles de elevar a velocidades de flujo transversal (5 m/s); por grandes luces permiten su

¹⁶ Ibid., p 477.

¹⁷ Ibid., p 482.

fácil limpieza y en algunos casos por medio de limpieza mecánica. Entre las desventajas se encuentra una baja densidad de compactación de membranas y un alto costo en su proceso de instalación.

En los procesos de diseño, se tiene en cuenta el precibado del agua y su bombeo a presión sobre las membranas en un modo directo o de flujo cruzado. Para filtración directa, la presión transmembrana se calcula de la siguiente manera:

$$P_{tm} = P_i - P_p \quad (8)$$

Donde P_{tm} es la presión transmembrana (bar), la P_i presión a la entrada del módulo de MF (bar) y P_p la presión de permeado (bar). Cuando el sistema opera en el módulo de flujo transversal, la presión media se determina por:

$$P_{tm} = \frac{P_i + P_0}{2} - P_p \quad (9)$$

Donde P_{tm} es la presión a través de la membrana (bar) y P_0 es la presión a la salida del módulo (bar). Cuando las membranas operan por flujo transversal o cruzado, hay una caída de presión, éste se define como:

$$P = P_i - P_0 \quad (10)$$

Donde P es la caída de presión a través del módulo (bar). El caudal total de un sistema de membranas puede calcularse por:

$$Q_p = J_{tm} \times S \quad (11)$$

Donde Q_p es caudal de permeado (l/h), J_{tm} es el flujo a través de la membrana (l/h*m²), que se encuentra en unos rangos de 80 a 200 l/h*m² y por último, el área superficial total efectiva (m²), que se calcula a partir del área efectiva por módulo por el número de módulos, este valor se encuentra normalmente entre 1 a 15 m², sin embargo en ocasiones puede llegar a los 50 m².

A través de este proceso de filtración, se logra eliminar microorganismos como lo son virus, bacterias y protozoos (siempre y cuando sean organismos de tamaño mayor a los diámetros de los poros de la membrana mencionada). A su vez, la eliminación de partículas de 0,05, 0,2 y 0,8 µm; logrando la reducción de la turbidez a los valores como 0,4, 0,9 y 1,8 NTU, respectivamente; pero al utilizar coagulantes se logra un 99% de remoción de partículas. Por último, logra la eliminación de materia orgánica natural, logrando eliminar entre un 30 a 60% de COT y 30% de formación potencial de trihalometanos.

Las membranas de MF operan de dos maneras: a caudal constante con presión variable o con presión constante variando el caudal de transmembranas. El mantenimiento de éstas se realiza por tres formas: retrolavado de membranas, pre-tratamiento de membranas y limpieza de éstas (limpieza química).

- **Ultrafiltración (UF)**

La ultrafiltración es un proceso conducido por presión, el cual remueve los coloides, las partículas y las especies solubles de elevada masa molecular,; a su vez, retiene partículas discretas de materias y especies orgánicas iónicas y no iónicas, dependiendo del peso molecular de corte* (PMC) de la membrana. La UF trabaja al igual que la MF, con presiones bajas, pero ésta no necesita de pre-tratamiento de coagulantes o floculantes para mejorar su eficiencia.

La membrana de ultrafiltración, puede ser aplicada como pre-tratamiento de ósmosis inversa y nanofiltración. Este proceso da más garantías al mecanismo de operación de la OI, logrando una mayor purificación de las aguas residuales. Una de las características de la asimetría es la presencia de una discernible y fina película en la superficie de la filtración, normalmente esta película presenta un espesor de 0,1 a 1 μm y se encuentra soportada por una subestructura más abierta; por medio de la UF se logra permear al agua residual y retener sólidos en suspensión y sólidos disueltos presentes en las descargas.

Este proceso de filtrado no solamente remueve sólidos, a su vez, remueve las cantidades de carbono orgánico volátil (COV) presente en las aguas residuales; por presencia de este materia orgánica se conduce a la formación de trihalometanos (THM) carcinogénicos, para este caso se utilizan unos precursores con el fin de elevar el peso molecular y por medio de UF remover 20 a 50% de los precursores de los THM.

Esta membrana de filtración presenta dos tipos de geometrías: capilares, tubulares, plana y espiral. Las capilares presentan la mayor remoción de partículas disueltas, reducción de la turbidez; las bacterias presentes en las aguas residuales e incluso la eliminación de protozoos y virus detectables en este tipo de sustancia tratada. Estas membranas capilares son delgadas de forma cilíndricas con diámetro exterior de 500 a 2000 μm y el diámetro interior es aproximadamente entre un 25% a 40%. Por último, este tipo de membrana trabaja con presiones muy bajas (valores menores de 5 bares).

* Es el peso molecular máximo del compuesto que pasa a través de los poros de la membrana hacia la corriente de permeado.

Otro tipo de UF son las tubulares, éstas son más simples de manipular, las mismas condiciones que presentan las membranas capilares, pero con diámetros mucho mayores, el diámetro normalmente utilizado en tratamiento de agua residuales es 13 mm y su limpieza mecánica es más sencilla que las capilares.

Las membranas de arrollamiento en espiral fue inicialmente un tratamiento previo de las OI, presentando caídas de presiones de 0,7 a 1,05 kg/cm²; pero como se mencionó anteriormente este tipo de UF es más recomendable como tratamiento preliminar para otro tipo de filtración y no como un proceso de filtrado. Por último se encuentran los procesos de placa o plano, aunque son membranas muy efectivas demuestra altos costos para la instalación; sus procesos de limpieza son manuales.

En la tabla 10 se presenta las ventajas y desventajas que presenta los tipos de membranas de ultrafiltración.

Tabla 10. Ventajas y desventajas de las configuraciones de las membranas de ultrafiltración.

	Tubular	Capilar	Placa y bastidor	Arrollada en espiral
Costo/superficie	Alto	Bajo	Alto	Bajo
Costo cambio de membrana	Alto	Moderado	Bajo	Moderado/bajo
Caudal, Lmh	Bueno	Bueno	Bajo	Bajo
Densidad compact, m ² /m ³	Pobre	Excelente	Bueno/bien	Bueno
volumen	Alto	Bajo	Medio	Medio
Consumo energético	Alto	Bajo	Medio	Medio
Ensuciamiento	Excelente	Bueno/bien	Bueno/bien	Medio
Limpieza in situ	Excelente	Bueno	Bien/pobre	Bien/pobre

Fuente: MALLWVIALLE, Joel., ODENDAAL, Peter E., WIESNER, Mark R. Tratamiento de agua por procesos de membrana; principales procesos y aplicaciones. Madrid: McGraw-Hill, 1998. p. 395.

Los materiales de las membranas para ultrafiltración y microfiltración se utiliza: polímeros y cerámica. Los polímeros se fabrican de materiales hidrofílicos* e hidrofóbicos, este último es más adecuado para las tensiones mecánicas, térmicas y químicas.

La polisulfona* es uno de los materiales de membrana más ampliamente utilizados, principalmente a causas de: amplia tolerancia al pH (rango de 1 a 13);

* Aquellos que presentan propiedades de los enlaces hidrogenados.

* Hidrofóbicas

alto límite de temperatura (75°C); buena resistencia a los oxidantes (exposición al cloro, almacenaje 50 mg/l); amplio rango tamaño de poros (1 a 20 µm).

Las membranas construidas por *cerámica*, están hechas por sinterización de materiales inorgánicos, aunque este tipo de material se acomoda mejor para procesos de MF que para las membranas de UF. Las ventajas que presenta este tipo de material son: bajo costo de mantenimiento; amplia resistencia al pH (rango de 0 a 14); alta resistencia a la temperatura (140°C); elevadas limitaciones de presión (2 MPa); elevando caudal; resistencia al ensuciamiento.

El umbral de corte de una membrana de UF puede definirse con respecto al peso molecular de las macromoléculas para que la retención sea mayor del 90 a 95%; esto quiere decir, dentro del rango de UF de varios miles de Daltons a 500 kdaltons, o con respecto al tamaño equivalente a las partículas retenidas entre rango de 1 a 50 nm.

El equilibrio de permeación del flujo puede también expresarse como:

$$v_{lim} = D \ln \left(\frac{C_w}{C_b} \right) \quad (12)$$

Donde V_{lim} es el flujo de equilibrio de permeado; D es la difusión del soluto; C_w concentración de soluto sobre una pared (C_{pared}) y C_b es la concentración de soluto fuera de la pared (C_{bulk}). Este flujo está influido directamente por la concentración de la solución y las condiciones de filtración hidráulica (caudal, presión).

La materia orgánica natural (MON) es una de las causantes del ensuciamiento de las membranas, bien por adsorción superficial sobre las partículas que forman la torta del filtrado. Este modelo da una relación entre el caudal de permeado y las resistencias hidráulicas inducidas por las membranas y la torta de filtrado:

$$J = L_p \Delta P \quad (13)$$

Donde J es el flujo o caudal a través de la membrana $m^3/h \cdot m^2$, L_p permeabilidad de la membrana, $m^3/h \cdot m^2 \cdot bar$; el gradiente de presión de filtrado dando en bar. De acuerdo con la Ley de Darcy, se presenta la siguiente relación:

$$\Delta P = J * \mu * R_h \quad (14)$$

Donde R_h es la resistencia al filtrado; μ es la viscosidad de la solución filtrada. En esta relación, R_h puede verse como una suma de términos de resistencia como se describe a continuación:

$$R_h = R_m + R_r + R_{irr} \quad (15)$$

Donde R_m es la resistencia hidráulica de la membrana virgen, que se transforma con el ensuciamiento en R_h (resistencia aparente de la membrana sucia), R_r es la resistencia específica al filtrado de a torta, puesto que, esta formación de torta es reversible por retrolavado y por último R_{irr} es la resistencia específica que es irreversible por retrolavado hidráulico y reversible por limpieza química.

La ultrafiltración es claramente semejante a la osmosis inversa, para el requerimiento de pre-tratamiento del agua de alimentación es mucho menor. Debido a la estabilidad química e hidráulica de los materiales de la membrana de UF, no se aplica algunos de los proceso de pre-tratamiento esenciales para las membranas de OI, como es el caso del ajuste de pH o niveles de concentración de cloro.

La ultrafiltración se emplea para eliminar sólidos en suspensión y sólidos macromoleculares disueltos de los fluidos. El índice de densidad de sal (IDS) que se diseñó para las membranas de osmosis inversa no se aplica a las membranas de UF.

Se utilizan tres diferentes parámetros para dirigir los procesos de operación de las membranas de ultrafiltración: el primero, es el nivel de presión de entrada, que esta correlacionado con el caudal y ensuciamiento específico de membranas. Se establece en dos niveles altos de presión (NAP); el segundo, es el nivel de turbidez del agua bruta con dos valores preseleccionados; y el tercero, es el nivel de relación en la absorbancia UV y el COT con dos valores preseleccionados.

La capacidad de las membranas de ultrafiltración en operación se emplea para eliminar la turbidez presente en las aguas residuales y la disminución de partículas. A través de investigaciones se ha certificado valores bajos de turbidez como 0,1 NTU y partículas en el rango de tamaños de 0,5 a 5 μm removidas. En la tabla 11 se presenta la eficiencia de remoción de indicadores de microorganismos.

Tabla 11. Eficiencia de la UF para la eliminación de indicadores microbianos.

Microorganismos	Tamaño, μm	Eliminación reportada log	Referencia
Giardia (quistes)	7-14	>5,1	JMM East Bay MUD/ Contra costa WD
		>5	(Anselme, AGHTM)
Criptosporidiumoquistes	3-7	>4,8	(Anselme, AGHTM)
Escherichiacoli	1-3	>8,3	JMM (AWWARF Boise)
Pseudomonas diminuta	0,2-0,5	>7	(Mandra, Hydrotop)
Bacteriófago MS2	0,025	>7,2	JMM-EBMUD CCWD
		>6,5	(Anselme, AGHTM)
Virus entéricos*	0,025	>4	(Mandra, Hydrotop)
Virus de polio	0,025	>8,9	(Mandra, Hydrotop)

Fuente: MALLWVIALLE, Joel., ODENDAAL, Peter E., WIESNER, Mark R. Tratamiento de agua por procesos de membrana principales, procesos y aplicaciones. Madrid: McGraw-Hill, 1998. p. 461.

De acuerdo con el Sistema Nacional de Información Ambiental de Chile (SINIA)¹⁸, las membranas ultrafiltración y microfiltración presentan las siguientes ventajas:

- Alta eficiencia y bajos consumos de energía.
- Pueden tratar altos volúmenes de agua.
- Tamaños pequeños para las plantas de tratamiento.

SINIA, presenta a su vez las desventajas que éstas puede tener en el proceso de tratamiento:

- Las membranas no son completamente permeable, puesto que, permite el acceso de algunas sales y puede ocurrir fugas en su proceso de mantenimiento.

La vida útil de las membranas es aproximadamente 2 años, pero su sistema de operación puede durar alrededor de los 20 años.

El Sistema Ambiental de Chile plantea una ecuación en función del caudal de operación; se puede calcular el valor de la inversión de las membranas de

*Organismos que se dan en la naturaleza

¹⁸SISTEMA NACIONAL DE INFORMACIÓN AMBIENTAL. Tecnología de membranas de ultra y microfiltración. Santiago: SINIA. En línea<http://www.sinia.cl/1292/articles-49990_26.pdf> [citado en 08 de octubre del 2014]

filtración. A continuación se presenta la siguiente expresión para conocer el costo de las membranas de MF y UF.

$$inv = 0,3067 * Q^{0,6} * 1'000.000 \quad (16)$$

Este valor se obtiene en US\$ con un caudal de tratamiento en unidades de l/s.

- **Ósmosis Inversa (OI) y Nanofiltración (NF)**

La Ósmosis Inversa es capaz de rechazar contaminantes o partículas, con diámetros tan pequeños como 0,0001 μm , mientras que la nanofiltración puede rechazar contaminantes tan pequeñas como de 0,001 μm . Ambas pueden describirse como procesos de difusión controlada en que la transferencia de masa de iones a través de las membranas se encuentra controlada por el proceso de difusión.

Estos procesos son capaces de remover sales, durezas, organismos patógenos, turbidez, desinfección de subproductos precursores (SPP), compuestos orgánicos sintéticos (COS), pesticidas.

Las membranas de ósmosis inversa de alta presión son mucho menos permeables que las membranas de nanofiltración. Para que la OI pueda soportar altas presiones se emplea un material más grueso para lograr remover sólidos disueltos o sal en el permeado.

La turbidez, dureza y color son contaminantes que pueden ser retirados por las membranas de NF y OI. La turbidez está regulada por una normativa internacional como proceso de remoción primario; el color por una secundaria y la dureza no se encuentra "regulado"¹⁹. Normalmente, la NF eliminará del 60% a 80% de la dureza total, más del 90% de color y virtualmente toda turbidez en la corriente de alimentación.

Las membranas de ósmosis inversa y nanofiltración han demostrado una eficiencia para rechazar todo tipo de virus, bacterias y quistes y otros organismos patógenos, pero raramente son utilizadas para la eliminación de agentes biológicos, puesto que la UF y MF son procesos de membrana más baratos y pueden alcanzar el mismo grado de rechazo patógeno.

Los módulos de *fibra fina hueca* (FFH) consisten en un recipiente a presión, en cuyo interior hay un cartucho conteniendo el mazo de membranas. Los diámetros

¹⁹Op. Cit., p.295.

interior y exterior de la fibra hueca son de 41 y 90 μm , respectivamente. La recuperación que presenta FFH varia del 10% a 50% y es normalmente más elevada que la de un elemento de membrana en espiral. La velocidad de la corriente radial de alimentación a lo largo de la superficie exterior de la fibra hueca varia aproximadamente entre 0,003 a 0,0003 m/s y su número de Reynolds se encuentra entre 10 y 500 a través de la membrana. De acuerdo con muchos autores el flujo que rige el proceso de tratamiento de filtración por membrana es laminar.

Por el contrario los *elementos arrollados en espiral* presentan una recuperación del 5% y 15%. El caudal máximo de alimentación y concentrado en un elemento de 10,1 cm es aproximadamente $6,1 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{min}$ y $1,1 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{min}$ y su número de Reynolds se encuentra entre 100 y valores menores de 1000.

Las superficies activadas de las membranas de OI y NF puede ser fabricados de acetato de celulosa (AC), derivadas de éste, poliamidas, derivados de poliamídicos y otras combinaciones de polímeros orgánicos.

A través de un tratamiento objetivo se determinara la selección de membranas para OI procesos de osmosis inversa o nanofiltración. La NF proporciona la eliminación de color, desendurecimiento o control de subproductos precursores (SPP); mientras OI ofrece el mismo tratamiento de que la NF, adicional a esto, se garantiza la remoción de sólidos totales disueltos. Es de gran importancia conocer que estas dos últimas técnicas de filtración por membrana son más utilizadas para los procesos de potabilización y procesos de purificación de agua mar. Pero a través de investigaciones se ha encontrado que estos procesos de OI y NF, son aplicados a los sistemas de tratamiento terciarios de aguas residuales, pero este tipo de membranas necesita un tratamiento preliminar de filtrado el cual es proporcionado por MF y UF.

La ecuación básica de transporte por difusión usada para el cálculo del flujo de agua es la siguiente:

$$J = k_w[\Delta P - \Delta \Pi] \quad (17)$$

Donde K_w es el coeficiente de permeabilidad del agua; ΔP es la pérdida de presión a través de la membrana; $\Delta \Pi$ es el cambio de presión osmótica a través de la membrana. Las características de rendimiento de retención y caudal del producto de la membrana afectan a la relación de concentración -polarización, incorporando ésta relación se obtiene una nueva ecuación de transporte del agua. A continuación se presenta las siguientes ecuaciones:

$$\frac{C_s}{C_b} = e^k \left[1 - \frac{1}{D_r} \right] + \frac{1}{D_r} \quad (18)$$

$$J = k_w \left[\Delta P - \Delta \Pi \left(\frac{C_s}{C_b} \right) + \frac{\Delta \Pi}{D_r} \right] \quad (19)$$

Donde k es el coeficiente de transferencia de masa, el cual se calcula por el flujo de producto por el número de Schmidt* para difusión salina sobre los valores de la velocidad cinemática del agua por factor de transferencia de masa de Chilton – Coburn**, este último valor depende del número de Reynolds; D_r es la relación de desalación, éste valor depende de la retención intrínseca de sal; C_s/C_b es la relación de concentración –polarización, donde C_s es la concentración de sal en la superficie y C_b es la concentración de sal en la salmuera de alimentación.

El ensuciamiento de membranas es una consideración importante en el diseño y operación de los sistemas de membranas de filtración. El índice de densidad (IDS), el índice de ensuciamiento modificado (IEM) y el mini- índice del factor de cegado (MIFC) son los índices más comunes de ensuciamiento.

Los factores que son importantes y que se deben considerar cuando se contempla un pre-tratamiento son: primero, material de fabricación de membranas; segundo, configuración del módulo, tercero; calidad del agua de alimentación; relación de recuperación; y por ultimo calidad final del agua.

De acuerdo con el Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA)²⁰ de Chile, las membranas de ósmosis inversa presentan las siguientes ventajas:

- Alta eficiencia.
- Genera aguas de alta calidad.
- Es capaz de remover todo tipo de contaminante.
- Puede tratar altos volúmenes de agua
- Bajos costos de operación.

* Dicho número es el resultante del cociente entre la difusión de cantidad de movimiento y la difusión de masa, este número es usado para poder caracterizar los flujos dentro de los cuales existen procesos convectivos de las diferentes cantidades de movimiento y de masa.

** Es un analogía, la cual conciste en transferir calor, tiempo y masa a través de un flujo turbulento, tomando el número de Reynolds como eje principal de este factor.

²⁰SISTEMA NACIONAL DE INFORMACIÓN AMBIENTAL. Tecnología de membranas de osmosis inversa. Santiago: SINIA. En línea <http://www.sinia.cl/1292/articles-49990_25.pdf> [citado en 08 de octubre del 2014]

Pero a su vez, presenta las siguientes desventajas:

- Requiere pre-tratamiento
- Requiere gran consumo de energía.

La vida útil de la membrana se encuentra en los 2 años, a esto nos referimos a cambio membranas de filtración, por otro lado, el sistema o mecanismo de operación tiene como tal una vida útil aproximadamente de 20 años.

De acuerdo con la SINIA de Chile, las membranas de nanofiltración presentan las siguientes ventajas:

- Alta eficiencia.
- Sistema compacto y fácil operación.
- Generación de bajos volúmenes de rechazo.
- Bajo costos de operación.

Pero a su vez presenta las siguientes desventajas

- Requiere pre-tratamiento.
- Requiere un alto costo para el reemplazo de sus membranas
- El reemplazo de las membranas requiere de un personal especializado.

La vida útil de esta membrana de nanofiltración, al contrario de la OI, duran aproximadamente 5 años las membranas de filtración, pero el mecanismo de operación tiene 20 años de vida útil.

Para las dos membranas, SINIA presenta una ecuación con el propósito de conocer el costo de operación en función de caudal de operación de las membranas de filtración. A continuación se presenta la ecuación para conocer la inversión de las membranas de OI y NF:

$$inv = 0,3485 * Q^{0,6} * 1'000.000 \quad (20)$$

Este valor se obtiene en US\$ con un caudal de tratamiento en unidades de l/s.

- **Filtro de carbón activado**

La filtración con carbón activado retiene efectivamente ciertos compuestos orgánicos y el cloro presente en el agua. También puede retener algunos metales

pesados. Pero este tipo de filtro es muy utilizado como un proceso previo para las membranas de filtración.

Este tipo de filtro puede remover bacterias y virus, cloro y derivados del cloro, el color y olor del agua residual y son muy efectivos en la remoción de petróleo y aceites.

Para el cálculo de carga superficial o flujo transmembrana se emplearon las mismas condiciones de microfiltración y ósmosis inversa, este cartucho presenta la primera etapa de la planta piloto diseñada y construida por el investigador y personal calificado.

6.2. MARCO LEGAL

Para el tratamiento de aguas residuales rigen gran cantidad de normas, las cuales se encargan de controlar y velar para que los índices de contaminación de determinado lecho de agua o determinando caudal de río no se vean perjudicados con la contaminación que se presenta hoy en día.

- **Normativa española**

Las normas internacionales, como la Norma Internacional Española (Orden del 7 de octubre de 1910), establece que las aguas residuales deben estar separadas de las aguas potables, puesto que para estas últimas se establece la supervivencia y abastecimiento de la población que convive en determinado sitio. De igual manera esta norma española (orden de 22 de abril de 1922) también establece que la construcción de pozos sépticos no debe hacerse con un vertimiento directo en los cursos de agua, ya que si esto se hace, la filtración del terreno pueden generar contaminación en las aguas subterráneas, la solución que brinda esta orden es la de depurar en primera instancia estas aguas residuales y que de este modo sean vertidas a sitios donde se encuentren aguas del mismo estilo sin afectar las aguas para suministro potable.

En cuanto al tratamiento de aguas residuales establece que estas deben estar completamente separadas de las aguas potables, y que las aguas residuales deben recibir un tratamiento especial (depuración) antes de ser vertidas o depositadas en un lecho acuático o marino. Lo anteriormente dicho aplica para aguas residuales de origen industrial doméstico y aguas lluvias, ya que estas son las que mayor índice de contaminación presenta según la norma ambiental española.

La normatividad española establece lo siguiente: “el consumo de agua potable debe tener controles aceptables de toxicidad y radioactividad, dependiendo del tratamiento al cual haya sido sometida la porción de agua que se quiso potabilizar, es por esta razón que los niveles de potabilización buscados deben presentar un 98% libres de cualquier impureza que puede presentar algún riesgo para la salud de la comunidad que tiene acceso a este servicio”²¹.

De acuerdo con el ministerio de Medio Ambiente, la ley española establece determinados límites de emisión en concentración o en porcentaje de reducción. En los siguientes cuadros se presentan los parámetros analizados para el control de vertimientos en este país extranjero:

Tabla 12. Requisitos para los vertimientos procedentes de instalaciones de depuración de aguas residuales urbanas mediante tratamiento secundario.

parámetros	concentración	Porcentaje mínimo de reducción
DBO ₅	25 mg/l O ₂	70-90%
DQO	125 mg/l O ₂	75%
Total de sólidos suspendidos	35 mg/l	90%

Fuente: ESPAÑA. MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE. Manual para la gestión de vertidos.

Madrid: MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, 2007. p 121. En línea < [http://www.magrama.gob.es/es/agua/publicaciones/manual_para_la_gestion_de_vertidos_tcm7-](http://www.magrama.gob.es/es/agua/publicaciones/manual_para_la_gestion_de_vertidos_tcm7-28966.pdf)

[28966.pdf](http://www.magrama.gob.es/es/agua/publicaciones/manual_para_la_gestion_de_vertidos_tcm7-28966.pdf)> [citado en 01 de marzo del 2015]

Tabla 13. Requisitos para los vertidos procedentes de instalaciones de depuración de aguas residuales urbanas en zonas de alta montaña (> 1.500 m).

parámetros	concentración	Porcentaje mínimo de reducción
DBO ₅	25 mg/l O ₂	40%
DQO	125 mg/l O ₂	75%
Total de sólidos suspendidos (2000-10000 h.e.)	60 mg/l	70%
Total de sólidos suspendidos(>10000)	35 mg/l	90%

Fuente: ESPAÑA. MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE. Manual para la gestión de vertidos.

Madrid: MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, 2007. p 121. En línea <

http://www.magrama.gob.es/es/agua/publicaciones/manual_para_la_gestion_de_vertidos_tcm7-28966.pdf> [citado en 01 de marzo del 2015]

²¹ESPAÑA. MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE. Medios legales para la lucha contra la contaminación de las aguas subterráneas. Madrid: MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE, 1985. En línea < http://aguas.igme.es/igme/publica/libro43/pdf/lib43/2_3.pdf> [citado en 24 de Abril del 2014]

- **Normativa mexicana**

Otro tipo de normatividad es la Norma Mexicana, la cual establece en su norma *nom-014-conagua 2003 (requisitos para recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada)*, los requisitos mínimos necesarios para que el agua residual ya tratada haga parte del abastecimiento de acuíferos, ya que la función es almacenar e incrementar los volúmenes de agua en los acuíferos, para su posterior recuperación y rehusó. De igual forma esta norma mexicana también contempla los límites máximos permisibles de los contaminantes para las aguas residuales tratadas que se rehusen en servicios al público (NOM-003-SEMARNAT-1997), “la cual tiene como objeto brindar rehúso en los componentes industriales, comerciales y servicios agrícolas entre otros, además de tener en cuenta el rehúso también en llenado artificiales de lagos y canales, y también en el lavado de vehículos, gracias a estas labores implementadas en México, el país solamente usa el agua potable nueva si se puede decir en usos netamente necesario como lo son para labores de cocina y labores de aseo, todo lo demás es agua rehusada la cual ha ayudado en gran cantidad al manejo de aguas residuales que presentaba el país de México”²².

La diferencia entre Colombia y México en control de vertimiento de aguas residuales, es la diferenciación que establece México para distinguir sus ríos, es decir, ríos urbanos, ríos con vía acuática y ríos agrícolas. Mientras en Colombia no se diferencia estos ríos, la población está acostumbrada a descargar el agua residual en cualquier río sin diferenciarlos y no preocupándose por la vidas y medio ambiente los cultivos agrícolas. En la siguiente tabla se presenta una comparación de los límites establecidos por México.

²²MEXICO. SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES. NOM-003-SEMARNAT. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Ciudad de México: SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, 1997. En línea < <http://hidropluviales.com/?q=node/63#NOM03>> [citado en 24 de Abril del 2014]

Tabla 14. Límites de vertimientos en ríos receptores en México.

Parámetros	México ríos receptores		
	Uso en riego agrícolas	Uso público Urbano	Protección de la vida acuática
Temperatura (°C)	NA	40	40
Grasas y aceites	15 mg/l	15 mg/l	15 mg/l
Sólidos sedimentables	1 mLI	1 mL/l	1 mgLI
DBO	150 mg/l	75 mg/l	30 mg/l
Sólidos suspendidos	150 mg/l	75 mg/l	40 mg/l

Fuentes: GRAJALES GARCIA, Natalia Giomara; PRIETO CASTAÑEDA, Alejandra. Análisis de la normatividad aplicada al vertimiento de aguas de producción en la explotación de recursos hidrococarburos en Colombia. Bucaramanga, 2012; Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero de petróleos; UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTADER. p 155. En línea < <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/977/2/144259.pdf>> [citado en 01 de marzo del 2015]

- **Normativa colombiana**

La ley 9 de 1979 el congreso de la república de Colombia²³ decreta lo siguiente: “medidas de sanitarias y protección del medio ambiente; según el artículo 3 de la presente ley, y para generar un control en los usos del agua se tendrá en cuenta los usos para consumo humano, consumo doméstico preservación, agrícola recreativo industrial y por ultimo transporte”.

Según el artículo 10 de la presente ley establece que los diferentes vertimientos de los residuos líquidos deberán someterse a las restricciones que establezca el Ministerio de Salud, para que de este modo no se vea afectada la población por los olores que emitan este tipo de aguas, sino que también no se presente una afectación en el medio ambiente en este caso el aire y los suelos, ya que este tipo de aguas presentan filtración sobre éstos; además, este artículo también tiene en cuenta las características que debe presentar el alcantarillado y las fuentes receptoras correspondientes, en este caso vertimientos trapezoidales.

En el día de hoy la reglamentación y control de aguas residuales en Colombia lo realiza el SINA, cual es una agencia del gobierno encargada de ejercer control sobre las aguas servidas provenientes de usos domésticos e industriales, siendo la primera la que mayor generación de contaminantes genera en Colombia. Un

²³COLOMBIA. MINISTERIO DE SALUD. Ley 9 (enero 24 de 1979). La protección del medio ambiente. Bogotá D.C.: El ministerio, 1979. En línea < <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=1177>> [citado en 24 de Abril del 2014]

ejemplo típico del control que se ejerce a este tipo de aguas residuales es el artículo 31 de la ley 3930 del 2010, “la cual establece que las edificaciones o centros turísticos que no tengan ningún tipo de sistema de alcantarillado, estos deberán dotarse de sistemas de recolección y tratamiento de aguas residuales y deberá contar con un permiso de vertimiento de este tipo de aguas residuales, además de que este tipo de aguas residuales no deben presentar ningún tipo de afectación al medio ambiente”²⁴.

En el decreto 1594 de 1984, en el capítulo 6 se encuentra los parámetros y procesos de control de los vertimientos de los residuos líquidos. En el artículo 72 se establecen las normas para todos los vertimientos a un cuerpo de agua deberá cumplir como mínimo lo siguiente:

Tabla 15. Normas mínimas de los vertimientos a los cuerpos de agua.

Referencia	Usuarios existentes	Usuarios nuevos
pH	5 a 9 unidades	5 a 9 unidades
Temperatura	<40 °C	< 40 °C
Material flotante	Ausente	Ausente
Grasas y aceites	Remoción > 80% de la carga	Remoción > 80% de la carga
Sólidos suspendidos, domésticos e industriales	Remoción > 50% de la carga	Remoción > 80% de la carga
Demanda bioquímica de oxígeno		
Para desechos domésticos	Remoción > 30% de la carga	Remoción > 80% de la carga
Para desechos industriales	Remoción > 20% de la carga	Remoción > 80% de la carga

Fuente: COLOMBIA. MINISTERIO DE AGRICULTURA. Decreto 1594 (26 de Junio del 1984).

Cuanto a usos del agua y residuos líquidos. Bogotá D.C.: El ministerio, 1984. En línea <<http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=18617>> [citado en 10 de Septiembre del 2014].

Por último nos referimos a la Constitución Política de Colombia, específicamente los artículos 79 y 80, que establecen los derechos para el cuidado del medio ambiente, aprovechamiento de los recursos y el derecho a gozar de un ambiente sano.

²⁴COLOMBIA. MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Decreto 3930 (25 de Octubre del 2010). Cuanto a usos del agua y residuos líquidos. Bogotá D.C.: El ministerio, 2010. En línea <http://www.corpamag.gov.co/archivos/normatividad/Decreto3930_20101025.pdf> [citado en 24 de Abril del 2014]

7. DISEÑO METODOLÓGICO

7.1. ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN

Según lo realizado en la investigación, ésta recopila datos tanto numéricos obtenidos por medio de ensayos de laboratorio, con el propósito de conocer las características que presentan las aguas residuales tanto antes de que sea procesada por las membranas y después de éste funcionamiento, se deduce que éste presenta un enfoque cuantitativo.

7.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación que se realiza actualmente, es un tipo de investigación experimental; de acuerdo a Sampieri, “una investigación experimental es aquella que se realiza cuando el objetivo consiste en examinar un tema poco estudiado”²⁵. Este tipo de estudio se acopla a un enfoque cuantitativo. Se define experimental porque se busca por medio de una planta piloto realizar una observación detallada del comportamiento que presentan las membranas de filtración cuando procesa aguas residuales con un tratamiento secundario, a su vez, es un tema poco estudiado en Colombia, lo cual convierte este trabajo de grado en éste tipo de investigación.

7.3. DISEÑO MUESTRAL

7.3.1. Población

El tipo de membranas de filtración aplicados a los sistemas de tratamiento de aguas residuales.

7.3.2. Muestra

Las muestras se tomarán de las lagunas de oxidación de los municipios de Chía y Madrid. De Chía se tomó una muestra y de Madrid se tomaron dos muestras de diferentes plantas. Además de estas muestras se tomarán algunas más en la planta de tratamiento Echavarría en el municipio de Madrid, Cundinamarca.

²⁵ HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto. Metodología de la investigación. México: McGRAW-HILL, 4^o Edición, 2006. p. 101

7.3.3. Variables

Características físicas de las aguas residuales, características químicas de las aguas residuales, características biológicas de las aguas residuales, niveles de contaminación, caudal, remoción de contaminantes.

- **Variables independientes.** Caudal, remoción de contaminantes.
- **Variables dependientes.** Características físicas de las aguas residuales, características químicas, características biológicas, niveles de contaminación.

7.4. FASES DE INVESTIGACIÓN

Fase 1. Determinación las características físicas, químicas y biológicas de las muestras de las aguas residuales obtenidas a través de ensayos de laboratorio.

- Se realizaron ensayos de laboratorio para conocer los parámetros iniciales de las aguas residuales tomadas como muestras para conocer su concentración en cada uno de éstos. El investigador analizará 6 parámetros los cuales son los siguientes: temperatura, pH, densidad y se analizaron 2 parámetros por medio de visual y olfato, son los siguientes: color y olor del agua residual. Se llevarán muestras a un laboratorio certificado con el propósito de medir las siguientes características: conductividad, color, DBO, DQO, sólidos suspendidos, sólidos sedimentables y coliformes totales.
- Después de realizar las pruebas de laboratorio, se obtiene agua tratada a la cual se analizará las mismas características tomadas en los parámetros iniciales de las aguas residuales tomadas como muestras. Estos dos procedimientos se realizarán con tres diferentes muestras de aguas residuales, pero con uno solo sistema de membranas, se busca mirar la eficacia de éstas y el tiempo de retención hidráulico más adecuado para el siguiente procedimiento.
- Conociendo el tiempo de retención hidráulico, la eficiencia que éstas puedan presentar empleando varios tipo de aguas, se busca medir otros parámetros con un solo tipo de agua y un mismo sistema de membranas de filtración. Los parámetros analizados en este método son los siguientes: color, conductividad, coliformes, sólidos suspendidos, sólidos sedimentables, pH, DBO, DQO, temperatura, densidad, olor. Estas características se analizarán a la entrada de la planta piloto y a la salida de la misma.

Fase 2. Aplicación del sistema de tratamiento terciario de varios tipos de aguas residuales a través de la planta piloto de membranas de filtración.

- Se explicará el proceso de construcción de la planta piloto, en la cual se realizaran los diversos ensayos de laboratorios.
- Se emplearán 3 cartuchos de microfiltración para tres tipos de aguas residuales, las cuales son: PTAR Chía, PTAR Madrid 1 y PTAR Madrid 2. El fin del análisis es conocer la eficiencia y comportamiento de este tipo de membranas al implementar 3 tipos de diferentes aguas, utilizando el mismo proceso de filtrado. Se medirán los parámetros hidráulicos de los ensayos realizados.
- Por medio de un mismo sistema de filtración, se efectuaran tres pruebas de laboratorio adicionales con un mismo tipo de agua residual, en esta ocasión se tomaron muestras de la planta de tratamiento de Madrid Echavarría. Se medirán los parámetros hidráulicos de los ensayos realizados.

Fase 3. Comparación de los parámetros de la calidad del agua para el vertimiento de las aguas residuales desde lo establecido por las normativa colombiana.

- Después de obtenidos los resultados de laboratorio y procesado el agua residual en la planta piloto, se emplea el marco jurídico para analizar los datos de vertimientos a las salida del tratamiento por membranas con lo establecido con la normativa colombiana.

7.5. INSTRUMENTOS Y TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Básicamente las técnicas e instrumentos utilizados durante la investigación son los siguientes:

- **Análisis de documentos:** consiste en la recolección y manejo de datos de los cuales se puede analizar el comportamiento del agua después haber pasado por las membranas de filtración.
- **La observación casual:** A medida que se avanza en la investigación se ha ido recopilando información que de un modo u otro ha sido casual y ha servido para realizar adelantos en esta.
- **Planta piloto:** por medio de la planta piloto realizar los respectivos ensayos de laboratorio, para comprobar la aplicación de las técnicas de filtración por membrana a los sistemas de tratamiento de aguas residuales.

De las cuatro categorías explicadas en el marco conceptual sobre la teoría y descripción de los sistemas de filtración por membrana, se selecciono que las pruebas de laboratorio se realizaran por medio de microfiltración, puesto que este medio filtrante puede garantizar mejor resistencia al inicio para los proceso de pulimiento de este tipo de agua.

Los ensayos de laboratorio para la medición de los parámetros de esta investigación, se realizaron en los laboratorios ANALQUIM LTDA y CIAN LTDA, cada una con certificación del IDEAM.

8. RESULTADOS

8.1. DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES A TRAVÉS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

8.1.1. Sistema por filtración por membranas empleado para tres diferentes vertimientos

Estos ensayos de laboratorio se realizaron a través de la planta piloto, seleccionado como medio filtrante el proceso de microfiltración en cada una de las pruebas explicadas a continuación.

8.1.1.1. Laguna de oxidación del municipio de Chía

Se analizó el vertimiento de las lagunas de oxidación del municipio de Chía en este procedimiento de filtración por membranas. Para esto se analizaron los siguientes parámetros:

- Cloro Residual*
- Coliformes totales.
- Color.
- Conductividad eléctrica.
- DBO
- Densidad.
- DQO
- Olor**
- pH***
- Sólidos disueltos totales.
- Temperatura
- Turbiedad.

Estos valores fueron tomados a la entrada de la planta piloto (vertimiento de las lagunas) y a la salida del procedimiento de membranas de filtración

* solo se analiza el resultado obtenido por medio de un kit de pH y cloro residual para purificadoras. No se realizara la curva de cloro residual.

** este parámetro fue analizado de forma organoléptica.

*** se analiza este parámetro con un kit de pH y cloro residual para purificadoras.

(microfiltración), con el propósito de analizar la eficiencia y el comportamiento de estas membranas de filtración, además se realizó un proceso de dosificación de cloro a la entrada y a la salida de la planta, con el fin de realizar un proceso de desinfección en las aguas residuales, controlar los olores molestos que ésta presentaba y lograr un cambio de color notable.

A diferencia de las pruebas realizadas en el numeral 8.1.2. en la cual se busca a través de una misma muestra comprobar la eficiencia del tratamiento con un sistema terciario de aguas residuales, en este método se utilizan otros parámetros para conocer el comportamiento que está presenta y para éstos se analizan valores de agua potable como son la turbiedad y el cloro residual. A continuación se ilustra en la tabla 16 el comportamiento que se obtuvo al procesar el agua de las lagunas de oxidación del municipio de Chía.

Tabla 16. Parámetros de aguas residuales obtenidos en el proceso de filtración de membranas como un sistema tratamiento terciario en lagunas de oxidación de Chía.

Chía		
Parámetros (unidad)	Entrada	Salida
Coliformes totales (NMP/100ml)	9,10E+06	1
Color (UPC)	17	9
Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C)	850	878
DBO (mg/l O ₂)	206	155
DQO (mg/l O ₂)	290	310
Sólidos disueltos totales (mg/l)	518	490
turbiedad (UNT)	42,8	30
pH*	7,2	7,8
Cloro residual (mg/l)*	0	1
Olor (Descripción)**	50	25
Temperatura (°C)*	19	19

Fuente: propia

A estas aguas residuales se aplicó una dosis de hipoclorito a la entrada y salida de la planta piloto.

** Estos valores se toman de la Empresa de Acueducto de Bogotá en la cual se presenta los olores de la siguiente forma: IMPERMISIBLES: 0; PERMISIBLE: 25; MOLESTO: 50; OFENSIVOS: 75; INSOPORTABLE: 100.

* parámetros analizados por el investigador, los demás fueron datos obtenidos de un laboratorio certificado por el IDEAM llamado ANALQUIM LTDA.

8.1.1.2. Laguna de oxidación de Madrid 1

Se analizó el vertimiento de las lagunas de oxidación de Madrid, también conocida como PTAR 1 de Madrid, pero este tipo de agua tuvo un procedimiento con algunas variaciones, puesto que esta agua se procesó con la mismas membranas utilizadas para el municipio de Chía, en este caso se busca observar el comportamiento de las membranas a través de diferentes fuentes receptoras.

Se analizaron los mismos parámetros empleados en Chía con las mismas condiciones. En la tabla 17 se observa los resultados obtenidos de las muestras de laboratorios:

Tabla 17. Parámetros de aguas residuales obtenidos en el proceso de filtración de membranas como un sistema tratamiento terciario en lagunas de oxidación de Madrid 1.

Madrid 1		
Parámetros (unidad)*	Entrada	Salida
Coliformes totales (NMP/100ml)	1,68E+07	1,98E+07
Color (UPC)	6	17
Conductividad eléctrica (μ S/cm a 25°C)	1012	973
DBO (mg/l O ₂)	232	349
DQO (mg/l O ₂)	339	442
Sólidos disueltos totales (mg/l)	598	546
Turbiedad (UNT)	73,5	52,9
pH	8,2	7,8
Cloro residual (mg/l)	1	0,3
Olor (Descripción)**	25	0
Temperatura (°C)	22	22

Fuente: propia.

* los parámetros de coliformes totales, color, conductividad, DBO, DQO, sólidos disueltos, turbiedad, se realizaron en el laboratorio certificado ANALQUIM LTDA.

** Este valores se toman de la Empresa de Acueducto de Bogotá en la cual se presenta los olores de la siguiente forma: IMPERMISIBLES: 0; PERMISIBLE: 25; MOLESTO: 50; OFENSIVOS: 75; INSOPORTABLE: 100.

8.1.1.3. Laguna de oxidación Madrid 2

Por último se analizó el vertimiento de la PTAR 2 del municipio de Madrid, la cual se lleva a cabo por medio de un proceso de lagunas de oxidación. Con este tipo de agua se utilizó el mismo tipo de membranas para observar el comportamiento demuestran y la cantidad de remoción que éstas ocasionaron en este tipo de aguas, como se observó anteriormente las membranas ya se encontraba cargada de la cantidad de materia orgánica que recibió con las aguas de Chía y Madrid 1.

A continuación se presenta la tabla 18, los resultados obtenidos en la laguna de oxidación de Madrid 2.

Tabla 18. Parámetros de aguas residuales obtenidos en el proceso de filtración de membranas como un sistema tratamiento terciario en lagunas de oxidación de Madrid 2.

Madrid 2		
Parámetros (unidad)*	Entrada	Salida
Coliformes totales (NMP/100ml)	1,00E+08	1,20E+08
Color (UPC)	7	18
Conductividad eléctrica (μ S/cm a 25°C)	1675	1226
DBO (mg/l O ₂)	394	301
DQO (mg/l O ₂)	486	358
Sólidos disueltos totales (mg/l)	986	734
Turbiedad (UNT)	373	99,8
pH	7,6	7,8
Cloro residual (mg/l)	0,3	0
Olor (Descripción)**	75	25
Temperatura (°C)	19	21

Fuente: propia.

* los parámetros de coliformes totales, color, conductividad, DBO, DQO, sólidos disueltos, turbiedad, se realizaron en el laboratorio certificado ANALQUIM LTDA.

** Este valores se toman de la Empresa de Acueducto de Bogotá en la cual se presenta los olores de la siguiente forma: IMPERMISSIBLES: 0; PERMISIBLE: 25; MOLESTO: 50; OFENSIVOS: 75; INSOPORTABLE: 100.

8.1.2. Sistema de filtración por membranas empleado para un mismo tipo de vertimiento

Se analizaron las correspondientes pruebas de laboratorio tomando como muestra el vertimiento de la planta de tratamiento de aguas residuales número 3 de Madrid (Echavarría). Estas pruebas se realizaron en tres diferentes días con un mismo sistema de membranas de filtración. Los parámetros analizados en esta fase fueron los siguientes:

- Coliformes totales.
- Color
- Conductividad.
- DBO
- Densidad.
- DQO
- Olor
- pH
- Sólidos sedimentables
- Sólidos suspendidos
- Temperatura

Al igual que en el numeral anterior se analizaron los respectivos parámetros mencionados a la entrada de la planta piloto y a salida de ésta, con el propósito fundamental medir su eficiencia. En tabla 19 se presenta el comportamiento de la planta piloto en su primer día.

Tabla 19. Parámetros de aguas residuales obtenidos en el proceso de filtración de membranas como un sistema tratamiento terciario en lagunas de oxidación de Madrid Echavarría primer día.

Características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales*			
Parámetros**	Unidades	Entrada	Salida
Coliformes totales	NMP/100ml	1,27E+06	1,05E+06
Color	UPC	99	65
Conductividad	μS/cm a 25°C	1523	1528

* los colores que se presenta en la tabla 13, significa cada una de las características. Morado: parámetros biológicos, Azul: parámetros químicos, Rojo: parámetros físicos.

** Los siguientes parámetros fueron analizados en el Laboratorio CIAN LTDA: color, conductividad, DBO, DQO, pH, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos, coliformes totales

Tabla 19. (Continuación)

DBO	mg/L	39	137
DQO	mg/L	475	226
olor	Descriptivo	50	0
pH	Unidades	7,47	4,51
Sólidos sedimentables	mL/L	1,8	<0,1
Sólidos suspendidos totales	mg/L	60	27
Temperatura	°C	20	23

Fuente: propia

En el segundo día se analizaron los mismo parámetros de aguas residuales, en la tabla 20 se presenta los resultados obtenidos en dicho día en el cual se busca analizar en el mismo comportamiento del primer día.

Tabla 20. Parámetros de aguas residuales obtenidos en el proceso de filtración de membranas como un sistema tratamiento terciario en lagunas de oxidación de Madrid Echavarría segundo día.

Características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales			
Parámetros*	Unidades	Entrada	Salida
Coliformes totales	NMP/100ml	2,62E+07	7,19E+06
Color	UPC	107	48
Conductividad	μS/cm a 25°C	1503	1616
DBO	mg/L	155	126
DQO	mg/L	239	199
olor	Descriptivo	50	0
pH	Unidades	7.74	7.91
Sólidos sedimentables	mL/L	25	<0,1
Sólidos suspendidos totales	mg/L	212	<20
Temperatura	°C	20	24

Fuente: propia

El último día de pruebas por medio de la planta piloto se tomaron las respectivas muestras para llevarlas a un laboratorio certificado como en cada uno de los días anteriormente mencionados. En la tabla 21 se muestra los resultados obtenidos en el tercer día.

* Los siguientes parámetros fueron analizados en el Laboratorio CIAN LTDA: color, conductividad, DBO, DQO, pH, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos, coliformes totales

Tabla 21. Parámetros de aguas residuales obtenidos en el proceso de filtración de membranas como un sistema tratamiento terciario en lagunas de oxidación de Madrid Echavarría tercer día.

Características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales			
Parámetros*	Unidades	Entrada	Salida
Coliformes totales	NMP/100ml	4,05E+07	1,039E+07
Color	UPC	80	98
Conductividad	μS/cm a 25°C	1447	1453
DBO	mg/L	143	152
DQO	mg/L	227	237
olor	Descriptivo	50	25
pH		6,92	7,37
Sólidos sedimentables	mL/L	4	0,3
Sólidos suspendidos totales	mg/L	176	29
Temperatura	°C	19	22

Fuente: propia

En la tabla 22 se muestra el resumen de los resultados obtenidos en los 3 días de ensayos de laboratorios, demostrando de esta forma las eficiencias logradas en el tratamiento de filtración por membranas y tomando como referencia solo tres parámetros: coliformes totales, sólidos sedimentables y sólidos suspendidos totales.

Tabla 22. Tabla resumen de resultados

Tabla resumen de los resultados obtenidos PTAR Echavarría	
Primer día	
Parámetro	Eficiencia (%)
Coliformes totales	17,35%
Sólidos sedimentables	94,44%
Sólidos suspendidos totales	55,00%
Segundo día	
Coliformes totales	72,56%
Sólidos sedimentables	99,60%
Sólidos suspendidos totales	90,57%
Tercer día	
Coliformes totales	74,35%
Sólidos sedimentables	92,50%
Sólidos suspendidos totales	83,52%

Fuente: propia

* Los siguientes parámetros fueron analizados en el Laboratorio CIAN LTDA: color, conductividad, DBO, DQO, pH, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos, coliformes totales

8.2. APLICACIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO TERCIARIO DE AGUAS RESIDUALES A TRAVÉS DE LA PLANTA PILOTO DE MEMBRANAS DE FILTRACIÓN

Para este proceso de investigación se empleó una planta piloto diseñada y construida por el investigador y un técnico con años de experiencia en el sistema de tratamiento de aguas residuales. A continuación se presenta los materiales utilizados para la construcción de la planta piloto:

- 2 bombas centrifugas.
- 2 manómetros.
- 3 tanques de fibra de vidrio de 20l
- 1 tanque de plástico de 60l
- 2 universales
- 1 base de 160 X 60 cm
- 17 codos de 90° de ½"
- 4 llaves tomas muestras
- 2 baldes de 12l.
- 3 carcasas 10" para membranas de filtración.
- 2 membranas polipropileno de microfiltración de 5µm.
- 1 membrana celulosa de microfiltración de 5µm.
- 1 membrana de carbón activado de 5µm.
- 1 membrana de cerámica de microfiltración de 0.5µm.
- 1 membranas de polipropileno de microfiltración 1µm.
- 2 flotadores de agua.

A continuación se muestra algunas figuras que ilustran los materiales empleados en el proceso de construcción de la planta piloto.

Figura 10. Membranas de celulosa de microfiltración.



Fuente: propia

Figura 11. Tanques de almacenamiento de fibra de vidrio.



Fuente: propia.

Figura 12. Bombas centrífugas empleadas en el sistema.



Fuente: propia.

Figura 13. Carcasa y membranas instaladas con su respectivo manómetro.



Fuente: propia.

Figura 14. Membrana de microfiltración de cerámica.



Fuente: propia

El proceso utilizado para la construcción de la planta piloto fue el siguiente:

1. Se instalaron los tanques de almacenamientos de agua en la base empleada para la planta piloto, para esto se emplearon algunos ángulo en acero, con el fin de sostener los tanques y no permitir que se muevan.
2. Se instalaron 2 bombas centrifugas utilizadas en el sistema de tratamiento de aguas residuales de la planta piloto, en la bomba número 2 que

suministra agua a la última membrana se coloca una base metálica para poder realizar los respectivos empates con los tanques de agua filtrada.

3. Se instalaron los filtros utilizados en el proceso de investigación en la base de 160 X 60 cm.
4. Se realizaron los respectivos empates de tuberías entre los tanques a las bombas; de las bombas a las membranas de microfiltración de tratamiento de aguas residuales, y de los filtros a los tanques, para este proceso se conectan algunos aliviaderos, con el fin de bajar la presión y utilizar un proceso de doble reutilización del agua que está pasando a través de la tubería.
5. Antes de que el agua residual llegara al proceso de filtración, se ubicaron dos manómetros, con el propósito de medir las presiones que utiliza las bombas y de esta forma observar la presión que puede tener el sistema y a su vez, conocer la mejor presión para este tipo de técnicas de membranas.
6. Por último, se proporcionaron 2 baldes de 12L para realizar procesos de pre-dosificación y dosificación de cloro en el agua residual, con el fin de realizar procesos de desinfectar el agua residual y ayudar con el proceso de remoción de bacterias y cambio de color.

Como resultado final, obtenemos la planta piloto de membranas de filtración empleada con sistema de aguas residuales de tratamiento terciario, con el propósito de lograr un agua de mejor calidad y cumpla con lo establecido por las normas nacionales e internacionales sobre el proceso de vertimiento a los cuerpos de agua como son ríos, quebradas y lagunas. En la figura 15 se ilustra el producto final de este procedimiento.

En anexos 1 se encuentran los planos de planta y longitudinal de la planta piloto, en cual se establecen las conexiones más importantes del mecanismo de filtración, a su vez, se explica en los planos el flujo del agua a través de la planta piloto.

Figura 15. Planta piloto de membranas de filtración



Fuente: propia

En este proceso de investigación se comprobaron los diferentes parámetros de aguas residuales con el propósito de analizar el comportamiento de las aguas residuales en un sistema de membranas de filtración, por este motivo se realizaron 3 pruebas con diferentes tipos de aguas, con el propósito de observar el comportamiento de las membranas sometidas a diferentes tipos de aguas. En agua potable es utilizado este comportamiento para establecer que las membranas pueden soportar cualquier tipo de agua. En los primeros ensayos se emplearon 3 membranas de $5\ \mu\text{m}$.

Para los últimos ensayos se cambiaron las membranas de filtración, en la figura 17 se ilustra la membrana de cerámica de $0,5\ \mu\text{m}$ empleada para los laboratorios de un solo tipo de agua en diferentes días, con el propósito de conocer el comportamiento y la eficiencia de esta técnica como una planta convencional.

8.2.1. Laguna de oxidación del municipio de Chía

En este proceso se empleó un volumen de aguas residuales de 50L, en la cual se analizó el tiempo de retención del agua cruda a su proceso de tratamiento, por medio de un cronómetro se contabilizó el tiempo en el cual el tanque de agua tratada estuviera al lleno, el tiempo transcurrido fue de 12 min, con estos datos se calculó el caudal de este sistema de tratamiento de agua residuales:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (24)$$

$$Q = \frac{0,050 \text{ m}^3}{0,00833 \text{ d}}$$

$$Q = 6 \text{ m}^3/\text{d}$$

El caudal de permeado en el proceso de tratamiento de las lagunas de oxidación del municipio de Chía por medio de membranas de filtración es de $6 \text{ m}^3/\text{d}$, este dato se utilizó para calcular el flujo de la membrana o la carga hidráulica del sistema del tratamiento terciario. Para esto se empleó la ecuación (11), para esto se realizó el siguiente despeje:

$$Q = J_{pmt} \times S$$

$$CH = \frac{Q}{S} \quad (25)$$

S= área superficial de las membranas de filtración, ésta se calcula por medio de la longitud de la membrana por su correspondiente altura, estas membranas presentan varias envoltura, por este motivo se calculó el área de cada envoltura para obtención del área superficial de la membranas.

$$S_{pmt} = 0,155 \text{ m}^2$$

$$6 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$CH = \frac{6 \text{ m}^3/\text{d}}{0,155 \text{ m}^2}$$

$$CH = 38,71 \text{ m}^3/\text{m}^2 * \text{d}$$

Se calculó la carga hidráulica como el caudal y su relación con el área superficial de la membrana. Para conocer la velocidad a la cual viajaba el agua residual analizada en esta prueba de filtración. Se presentaron presiones de 2 Kg/cm^2 , lo cual indica la alta velocidad presente en el sistema de pulimento de aguas residuales.

En las siguientes figuras, se observa como quedaron las membranas después del proceso de filtración con este tipo de agua:

Figura 16. Membrana de carbón activado después procesar las lagunas de oxidación del municipio de Chía.



Fuente: propia.

Después de haber realizado el proceso de filtración, esta membrana terminó de un color verde claro, en el cual se observa la retención de sedimentos y partículas disueltas en el agua. A su vez, la carcasa en la cual se guardaba el filtro finalizó con una comulación de materia en la parte inferior de esta, en la figura 17 se presenta este tipo de retención en estuche.

Figura 17. Carcasa de la membrana de carbón activada después de procesar el agua residual.



Fuente: propia

En la figura 18 se presenta su comportamiento de la membrana de 5 μm , al mismo tiempo se aclara que la membrana de polipropileno terminó en las mismas condiciones con este tipo de agua más la remoción anterior.

Figura 18. Membranas de microfiltración de celulosa y polipropileno de 5 μm , después de haber sido sometidas al primer tipo de agua.



Fuente: propia

8.2.2. Lagunas de oxidación de Madrid 1

En este proceso de remoción se aplicó un volumen de agua residual de 40L y se aplicó un tiempo de retención más corto que utilizado en el proceso de Chía, este fue de 5.18 minutos, para esto se utilizó la ecuación 24 para conocer el caudal de permeado del sistema de tratamiento terciario. A continuación se aplica los cálculos realizados para la obtención de los parámetros hidráulicos:

$$Q = \frac{0,040 \text{ m}^3}{0,003597d}$$

$$Q = 11,12 \text{ m}^3/d$$

$$S_{pmt} = 0,155\text{m}^2$$

$$CH = \frac{11,12 \text{ m}^3/d}{0,155 \text{ m}^2}$$

$$CH = 71,74 \text{ m}^3/\text{m}^2 * d$$

A continuación se presentan las siguientes figuras 19 y 20, en las cuales se observa como quedaron las membranas después del proceso de filtración con este tipo de agua:

Figura 19. Membrana de carbón activado después procesar las lagunas de oxidación del municipio de Madrid.



Fuente: propia.

Después de realizar el proceso de filtración con las aguas residuales de Madrid y con el proceso que llevaba anteriormente con Chía, el cartucho presentó un color verde oscuro, comparado con el proceso del primer municipio, se observa un

notable cambio y puesto que en los resultados obtenidos en los parámetros, se obtiene que esta membrana de carbón activado no está soportando más cargas de residuos transportados por estas aguas negras, pero igualmente se empleará el mismo cartucho para una dosis más.

Figura 20. Membranas de microfiltración de celulosa de 5 μm , después de haber sido sometidas al segundo tipo de agua.



Fuente: propia.

De este tipo de aguas se tomaron una serie de imágenes a la entrada de la planta piloto y a salida en la cual se presenta un cambio de color notable, pero en el parámetro de color verdadero se obtiene el caso contrario, en el cual este dato aumenta de una manera drástica. En la figura 21 y 22 se presenta el tipo agua utilizada en el laboratorio:

Figura 21. Agua residual del vertimiento de la laguna de oxidación de Madrid 1.



Fuente: propia

Figura 22. Agua residual a la salida de la planta piloto de membranas de filtración.



Fuente: propia

8.2.3. Lagunas de oxidación de Madrid 2

El volumen empleado para este proceso de laboratorio fue de 40L con un tiempo de retención fue de 25.53 min, con este tiempo hidráulico se obtuvo un mejor proceso de filtrado que obtenido anteriormente, los cálculos de los parámetros hidráulicos obtenidos:

$$Q = \frac{0,040 \text{ m}^3}{0,01773d}$$

$$Q = 2,25 \text{ m}^3/d$$

$$S_{pmt} = 0,155\text{m}^2$$

$$CH = \frac{2,25 \text{ m}^3/d}{0,155 \text{ m}^2}$$

$$CH = 14,51 \text{ m}^3/\text{m}^2 * d$$

A continuación se ilustra las figuras 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, que ilustran el procedimiento de las membranas de filtración, en el cual se presenta el agua cruda, agua tratada, las membranas después del proceso, con algunas fotografías de las carcassas en las cuales guardan éstas.

Figura 23. Agua residual del vertimiento de la laguna de oxidación de Madrid 2.



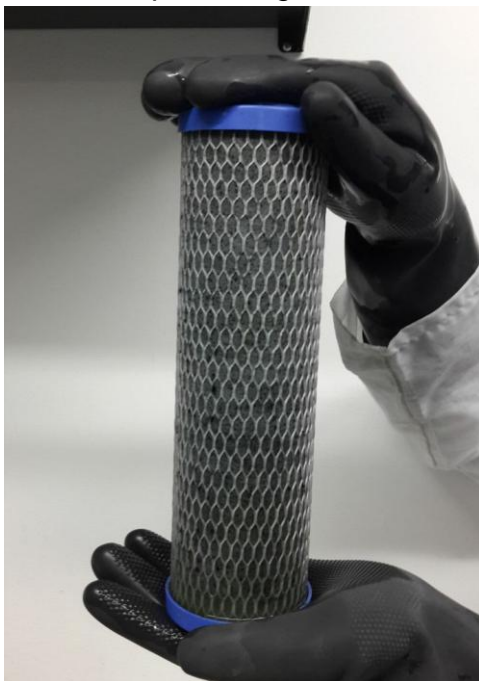
Fuente: propia

Figura 24. Agua residual a la salida de la planta piloto de membranas de filtración.



Fuente: propia

Figura 25. Membrana de carbón activado después de 3 pruebas con diferentes tipos de aguas.



Fuente: propia

Figura 26. Carcasa de la membrana de carbón activado después de procesar diferentes tipos de aguas residuales.



Fuente: propia

Figura 27. Membrana de celulosa después de 3 pruebas con diferentes tipos de aguas.



Fuente: propia

Figura 28. Carcasa de la membrana de celulosa después de procesar diferentes tipos de aguas residuales.



Fuente: propia

Figura 29. Membrana de polipropileno de $5\mu\text{m}$ después de 3 pruebas con diferentes tipos de aguas.



Fuente: propia

Figura 30. Carcasa de la membrana de polipropileno después de procesar diferentes tipos de aguas residuales.



Fuente: propia

De acuerdo con las figuras anteriores, después de haber sido sometidas las membranas a tres diferentes fuentes receptoras de agua, se nota el cambio que producen desde el punto de vista organoléptico, de igual forma esta membranas

estuvieron sometidas a grandes cantidades de concentraciones de sólidos y materia orgánica, lo cual produce el color actual de estas membranas y el notable cambio frente a su posición inicial.

8.2.4. Planta de tratamiento de aguas residuales Echavarría (Madrid 3)

Para este último proceso se cambiaron las membranas con el fin de realizar pruebas con un solo tipo de agua residual, tomado desde la PTAR Echavarría ubicada en el municipio de Madrid. En la figura 31 se observa el cambio de cartuchos de membranas de filtración.

Estos ensayos se realizaron en días diferentes, por este motivo se dividirá los cálculos por días.

Figura 31. Planta piloto de membranas de filtración (nuevos cartuchos)



Fuente: propia

Estos ensayos se realizaron en días diferentes, por este motivo se dividirá los cálculos por días.

8.2.4.1. Primer día

Por medio de los ensayos de laboratorios anteriormente realizados, se encontró que a mayor tiempo de retención hidráulico se logra un mejor proceso de retención por medio de las membranas, por este motivo se buscaron tiempos de retención entre los 15 minutos y 25 minutos. Este día se logró un tiempo hidráulico de 22 minutos con 27.82 segundos con un volumen tratado de 31L, tomando el procedimiento anterior, se calcularon los mismos factores como son: el caudal, la carga hidráulica y área de permeado.

A continuación se presenta la tabla 23, en la cual se registran los resultados de los parámetros hidráulicos del primer día de filtración con un mismo tipo de agua. Tomando las ecuaciones (25) y (26) de los procedimientos anteriores para la obtención del flujo de permeado y la carga hidráulica. Y en la tabla 24 y figura 32 se adjuntan las medidas de las membranas utilizadas para este último proceso de filtración, con la cual se calculó el área de permeado del sistema.

Tabla 23. Parámetros hidráulicos obtenidos en el primer día.

Parámetro hidráulicos en el primer día		
Parámetro	unidades	valor
Tiempo total	día	0,016
Primera etapa		
Volumen	m ³	0,031
Presión	kg/cm ²	0,2
Tiempo 1° etapa	día	0,011
Caudal permeado 1° etapa	m ³ /día	2,711
Área superficial (dos primeras membranas)	m ²	0,155
Carga hidráulica 1° etapa	m ³ /día*m ²	17,49
Segundo etapa		
Área superficial (tercera membrana)	m ²	0,053
Volumen	m ³	0,017
Presión	kg/cm ²	2,500
Tiempo	día	0,004
Caudal Permeado 2° etapa	m ³ /d	4,080
Carga hidráulica 2° etapa	m ³ /día*m ²	76,39

Fuente: propia

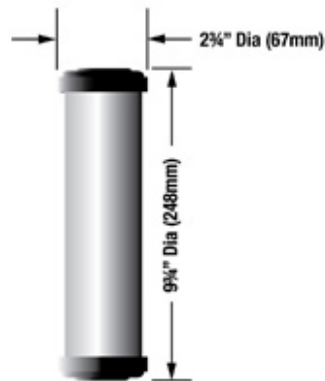
Tabla 24. Medidas de las membranas de polipropileno de 1 μm y 5 μm .

Modelo	Referencia	Tamaño	Tamaño del poro	presión@flujo
P1	155225-43	2.38" x 9.88"	1 micrón	0,6 psi @ 5gpm
P2	155014-43	2.38" x 9.88"	5 micrones	0,2 psi @ 5gpm

Fuente: PENTAIR. Pentek P series spun- bonded polypropylene cartridges. Milwaukee. PENTAIR, 2014. En línea: <

<http://waterpurification.pentair.com/Files/KnowledgeBase/ItemDownload/en/310060-pentek-pseries-specsheet-ap14.pdf> > [Citado en 05 de Abril del 2015]

Figura 32. Medidas de la membrana de cerámica de 0,5 μm .



Fuente: DOULTON. Filter candles and cartridges. Newcastle, DOULTON. En línea < <https://www.faireyceramics.com/product-portfolio/products/ceramic-filter-candles> > [citado en 05 de abril del 2015]

Por medio de la figura 33 se realizó una comparación con el propósito de conocer el comportamiento de las membranas en el primer día, teniendo en cuenta que estas membranas se encontraban sin ningún uso hasta ese día, se realiza la correspondiente comparación con la figura 31.

Figura 33. Comparación de las membranas al inicio y al final del primer día.



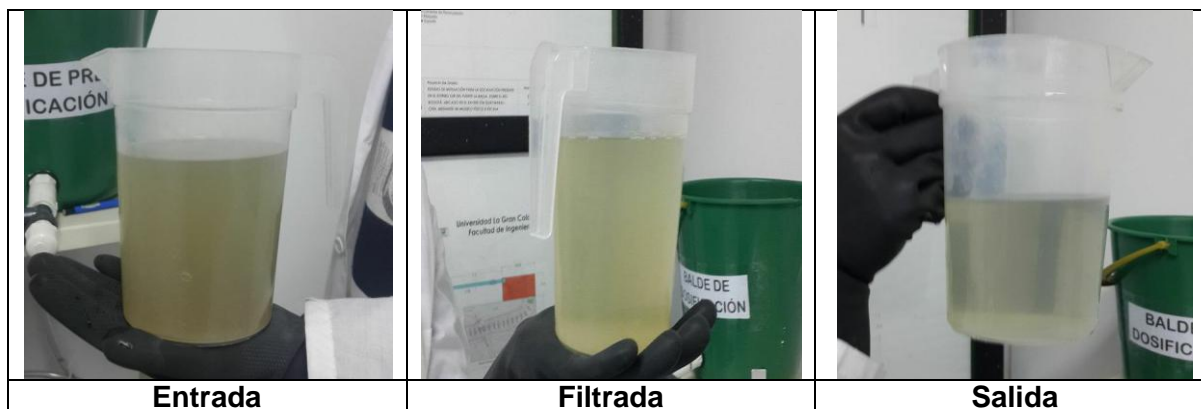
Membranas en la etapa inicial del primer día

Membranas etapa final del primer día

Fuente: propia.

A continuación en la figura 34, se ilustra el proceso del agua a la entrada de la planta, en el proceso de filtración y a la salida de ésta.

Figura 34. Comparación del agua residual a la entrada, en la mitad del proceso y a la salida de la planta piloto.



Fuente: propia

A través de todo este proceso, se evidencian varios cambios en el color del agua residual, el primer cambio se nota en la variación de la densidad y luego en el proceso clarificación del agua residual.

En las figuras 35 y 36 en las que se ilustran los tanques de almacenamiento, recibiendo toda esta cantidad de agua residual procesada en un tratamiento terciario. Cabe aclarar que las muestras empleadas para el laboratorio fueron tomadas desde el vertimiento de la tubería el cual va depositar al tanque, pero en ningún momento se tomaron muestras del tanque, puesto que éstos han sido sometidos a variar tipos de aguas y pueden alterar el comportamiento del agua residual.

Figura 38. Tanques de agua filtrada.



Fuente: propia

Figura 36. Tanque de agua tratada



Fuente: propia

8.2.4.2. Segundo día

En el segundo día se mantuvo el mismo comportamiento del primer día, en el cual se buscaron tiempos de retención muy elevados, se trabajó con el mismo volumen el cual fue de 31L y se logró mantener el mismo margen de presión, el cual en la prueba anterior fue de 2 Kg/cm². Antes de procesar el agua residual se tomaron algunas imágenes en las cuales se observa la planta piloto antes de verter la segunda muestra y comenzar el respectivo laboratorio. En la figura 37 se presenta la planta piloto en el segundo día.

Figura 37. Planta piloto el segundo día de filtración un mismo tipo de agua residual.



Fuente: propia

A continuación en la tabla 25 se presentan los respectivos cálculos obtenidos de los parámetros hidráulicos del comportamiento que mantuvo la planta piloto en este proceso de filtración, el tiempo de retención hidráulico a comparación del primer día aumentó alrededor de un minuto. El tiempo obtenido es de 23 minutos con 15,80 segundos.

Tabla 25. Parámetros hidráulicos obtenidos en el segundo día.

Parámetro hidráulicos en el segundo día		
Parámetro	unidades	valor
tiempo total	día	0,016
Primera etapa		
Volumen	m ³	0,031
Presión	kg/cm ²	0,2
Tiempo 1° etapa	día	0,012
Caudal permeado 1° etapa	m ³ /día	2,611
Área superficial (dos primeras membranas)	m ²	0,155
Carga hidráulica 1° etapa	m ³ /día*m ²	16,85
segundo etapa		
Área superficial (tercera membrana)	m ²	0,053
Volumen	m ³	0,017
Presión	kg/cm ²	2,500
Tiempo	día	0,004
Caudal Permeado 2°etapa	m ³ /d	4,015
Carga hidráulica 2° etapa	m ³ /día*m ²	75,18

Fuente: propia

El cambio de las membranas en el segundo día fue notable, puesto que se observan saturados los filtros con las aguas residuales, pero de igual manera se mantuvo el mismo color a la salida de este tipo de agua. A continuación se muestra una comparación de las membranas al inicio y al final del segundo día de ensayos de laboratorio en la figura 38.

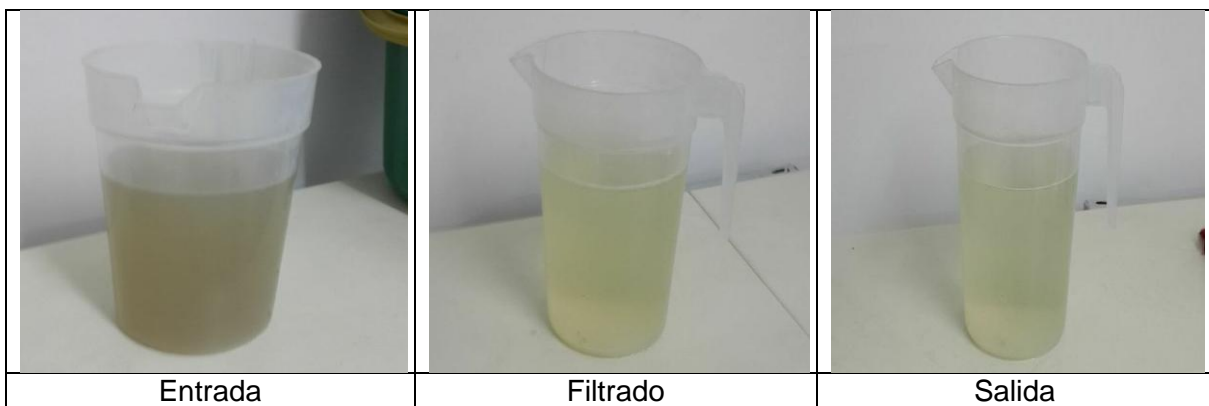
Figura 38. Comparación de las membranas de filtración a la entrada y a salida del segundo día.



Fuente: propia

Como se mencionó anteriormente el cambio de color desde el punto de vista organoléptico es muy notable, visualmente se obtuvo el mismo color de agua residual a la salida de la planta piloto en el segundo día como en el primer día. A continuación se demuestra el comportamiento del agua residual desde su entrada hasta la salida de la planta piloto en la figura 39.

Figura 39. Comparación de aguas residuales desde la entrada del planta piloto hasta la salida en el segundo día.



Fuente: propia

8.2.4.3. Tercer día.

En el último día de ensayo de laboratorio, se mantuvo las mismas condiciones del volumen pero a su vez se aumentó de igual forma el tiempo de retención hidráulico del sistema, en cada uno de los día, en la primera etapa se mantuvo una presión muy baja en la cual se lograra disminuir la mayor cantidad de sólidos y materia orgánica presente en esta agua residual.

El tiempo de retención hidráulico empleado en esta prueba de laboratorio fue de 24 minutos con 5,82 segundos, siendo un tiempo de retención más alto de todos los laboratorios. En la tabla 24 en la cual se presenta los parámetros hidráulicos del tercer día.

Figura 40. Planta piloto el tercer día de filtración un mismo tipo de agua residual.



Fuente. Propia

Tabla 26. Parámetros hidráulicos obtenidos en el tercer día.

Parámetro hidráulicos en el tercer día		
Parámetro	unidades	valor
Tiempo total	día	0,017
Primera etapa		
Volumen	m ³	0,031
Presión	kg/cm ²	0,2
Tiempo 1° etapa	día	0,012
Caudal permeado 1° etapa	m ³ /día	2,611

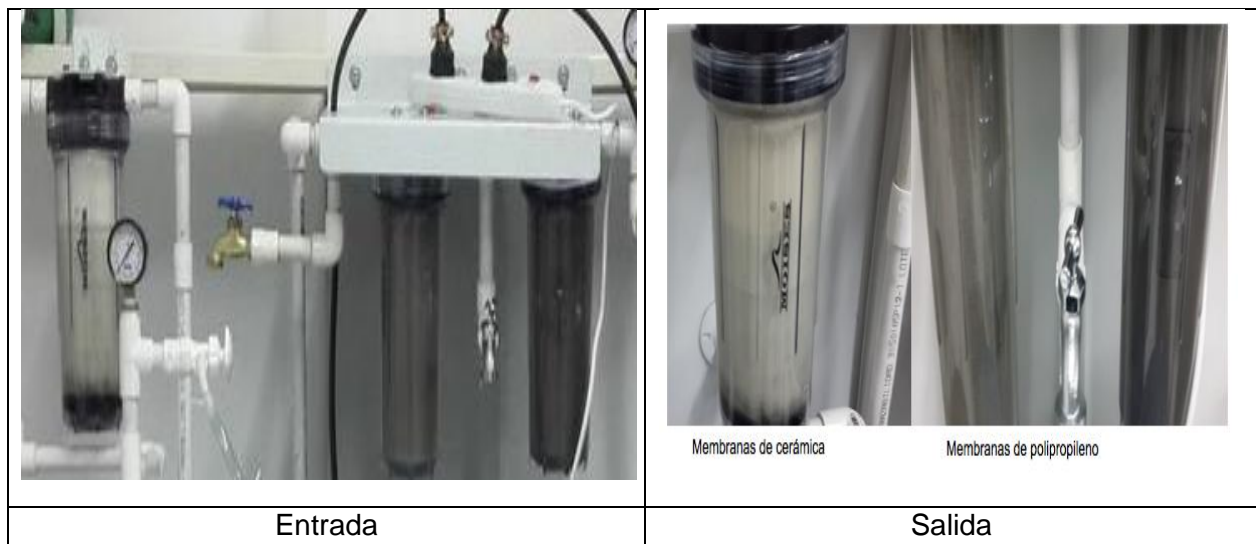
Tabla 26. (Continuación)

Área superficial (dos primeras membranas)	m ²	0,155
Carga hidráulica 1° etapa	m ³ /día*m ²	16,85
segundo etapa		
Área superficial (tercera membrana)	m ²	0,053
Volumen	m ³	0,017
Presión	kg/cm ²	1,800
Tiempo	día	0,005
Caudal Permeado 2°etapa	m ³ /d	3,497
Carga hidráulica 2° etapa	m ³ /día*m ²	65,48

Fuente: propia

Las membranas presentaron varios cambios desde su primer día hasta su último día de funcionamiento, en el cual se observa el cambio de color ocasionado por los sólidos suspendidos en el agua y la materia orgánica que esta tenía a su inicio, pero lo más importante es que nunca se perdió el cambio de color a la salida, puesto que visualmente, este tipo de agua mostro el mismo color en todos los vertimientos de la planta piloto. En la figura 41 se ilustra la comparación de las membranas al inicio y al final de la prueba de laboratorio realizada en el tercer día.

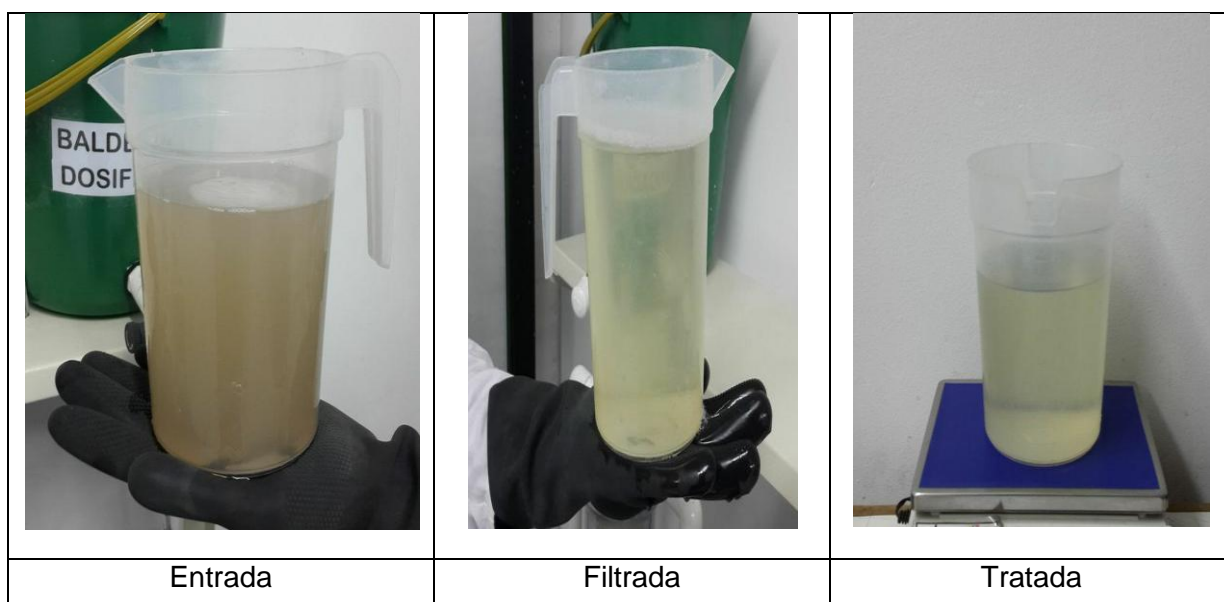
Figura 41. Comparación de las membranas al inicio y al final de los ensayos de laboratorios del tercer día.



Fuente: propia

A su vez se realizó la comparación del agua residual tratada a través de las membranas de filtración, en la figura 42, se observa este comportamiento de las aguas residuales.

Figura 42. Comparación de aguas residuales desde la entrada del planta piloto hasta la salida en el tercer día.



Fuente: propia

8.3. COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA EL VERTIMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES DESDE LO ESTABLECIDO POR LAS NORMATIVA COLOMBIANA.

Con los resultados obtenidos después de realizar las pruebas de laboratorio, se analizó el comportamiento de las aguas residuales de la PTAR Echavarría con la norma nacional con el cual se analizaron solo 3 parámetros, entre estos se encuentra los sólidos sedimentables y los sólidos suspendidos en las aguas residuales. Se desarrolló una matriz (tabla 27) en la cual se describe si cumple.

Tabla 27. Comparación de la normativa nacional con los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio de la PTAR Echavarría

Comparación de la normativa colombiana con los resultados obtenidos en la planta piloto			
Parámetros	Resultados a la salida	Normativa	Evaluación
Primer día			
Coliformes totales (NMP)	1,05E+06	1000	No cumple
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	27	70	cumple
Sólidos sedimentables (mL/L)	<0,1	5	cumple
Segundo día			
Coliformes totales (NMP)	7,19E+06	1000	No cumple
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	<20	70	cumple
Sólidos sedimentables (mL/L)	<0,1	5	cumple
Tercer día			
Coliformes totales (NMP)	1,039E+07	1000	No cumple
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	29	70	cumple
Sólidos sedimentables (mL/L)	0,3	5	cumple

Fuente: propia

Esta comparación se realizó tomando los valores máximos establecidos por la resolución 0631 de 2015.

9. ANÁLISIS DE RESULTADOS

9.1. DETERMINACIÓN A TRAVÉS DE ENSAYOS DE LABORATORIO LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES A TRAVÉS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

9.1.1. Sistema de filtración por membranas empleado para tres diferentes vertimientos

9.1.1.1. Laguna de oxidación del municipio de Chía

De acuerdo con los resultados obtenidos con la muestra de la laguna de oxidación de Chía, se presentaron factores positivos y factores negativos. Al realizar esta prueba con un tiempo de 12 minutos, se logró obtener una remoción de coliformes totales de un 100%, una remoción de olor y color alrededor del 50%, sin embargo los parámetros como la turbiedad, DBO, DQO, sólidos disueltos, arrojaron porcentajes demasiado altos, que no son permitidos por la norma Colombia como usuario nuevo*, la cual permite una remoción de éstos del 20%.

Es importante aclarar que los datos de entrada de la planta piloto, en todos sus parámetros analizados son demasiado altos, tanto así que hasta éste mismo no cumple con la norma colombiana. Esta laguna mostraba presencia de olor desagradable a la salida de esta planta, lo cual permite inferir que ésta no está siendo bien tratada por la entidad encargada, y su color era negro; desde el punto organoléptico, este tipo de agua que fue empleada para los laboratorios correspondientes no cumple como un tratamiento secundario.

Las membranas de filtración empleadas para este laboratorio, lograron una remoción de coliformes totales eficiente, pero ésta presentó una ayuda de hipoclorito de sodio con un 17% de cloro, tanto a la entrada de la planta piloto como a la salida de ésta, lo cual indica que no se evaluaron las propiedades de las membranas sobre el porcentaje de retención de este parámetro, puesto que, se eliminaron los microorganismos con dicha sustancia y no por medio de la remoción de la técnica de filtración.

El principio general de esta prueba es conocer la presión y el tiempo de retención hidráulico más adecuado para realizar ensayos (ensayos de laboratorio con las

* Es aquel cuya actividad se inicie después de la fecha de entrada en vigencia del presente Decreto 1594/84

muestras de la PTAR Echavarría) con un solo tipo de agua, y conocer desde un primer ángulo el mejor mecanismo para remoción de aguas residuales, puesto que en agua potable se emplean tiempos de retención muy altos en los cuales se logra remover las pequeñas partículas que estas puedan presentar, pero en aguas residuales se observa una gran cantidad de sólidos suspendidos y materia orgánica; en especial con esta muestra en la cual no cumple como un tratamiento secundario de agua residuales. Como esta prueba fue realizada con membranas nuevas y según los resultados obtenidos del laboratorio certificado por el IDEAM, este tratamiento para esta laguna de oxidación del municipio de Chía no es apto como un tratamiento de pulimiento de aguas residuales.

De acuerdo con los resultados obtenidos a la entrada y salida de la planta piloto, otorgados por el laboratorio ANALQUIM certificado por el IDEAM, el parámetro de la DBO presentó una remoción muy baja, la cual no supera un porcentaje del 30%, lo anterior demuestra que en este proceso, el líquido logró aumentar la cantidad mínima de oxígeno disuelto requerido por los microorganismos; en el caso de la DQO, este parámetro no mostró un porcentaje de remoción, por el contrario, aumento su cantidad frente a su valor de entrada, como si se presentara una reacción en el agua que aumento la materia orgánica biodegradable en el proceso de remoción, esto puede ser ocasionado por las dosis de hipoclorito de sodio adicionada tanto a la entrada como a la salida de la planta piloto.

Los parámetros de temperatura, color turbiedad, color, olor y sólidos disueltos, no presentaron balances muy favorables con esta técnica de filtración. La temperatura se mantuvo constante a la entrada y a la salida de la planta piloto y se encuentra entre los rangos permitidos por la normativa. El olor fue medido de forma organoléptica siguiendo la clasificación del acueducto de Bogotá. A la salida de la laguna de oxidación del municipio de Chía, se arrojó un olor molesto (50), después de ser procesada la muestra por las membranas de filtración se obtuvo un olor permisible (25), logrando una eficiencia del 50%.

Los sólidos disueltos en esta muestra estaban en una concentración de 518 mg/L, después de realizar el proceso de remoción por medio de las membranas se logró remover una dosis muy pequeña obteniendo una concentración de 490 mg/L, teniendo una eficiencia de este parámetro de 5,4%. Lo más probable es que al aplicar un mecanismo de filtración con un menor tamaño de poro, se podría remover con mayor eficiencia este parámetro, pero no se conoce con exactitud si un tratamiento de nanofiltración u osmosis inversa soportaría las cargas tan grandes presentes en las aguas residuales. Los últimos parámetros analizados fueron el color y la turbiedad, las cuales presentaron remoción con una baja

eficiencia, en el caso del color, el agua residual de Chía entró con 17 UPC (Unidades de Platino de Cobalto) y a su salida de obtuvo valor de 9 UPC, logrando una eficiencia de 49,06%. En el caso de la turbiedad se logró remoción, pero al igual que la DBO, color, los sólidos, no cumplen como un usuario nuevo, puesto que este solo logra un valor de eficiencia del 29% lo cual no garantiza valores favorables aplicando como tratamiento esta membrana de filtración.

9.1.1.2. Laguna de oxidación de Madrid 1

Analizando los factores de la segunda muestra utilizando el mismo sistema de filtración por membranas en las lagunas de oxidación de Chía, pero con un tiempo de retención más corto, se obtuvieron resultados desfavorables, puesto que en vez de realizar un proceso de remoción de sustancias presentes en el agua, se ejecutó todo lo contrario, los parámetros a la salida de la planta piloto aumentaron y de esta forma sometieron a una sobrecarga a las membranas.

En los resultados de la laguna de oxidación de Chía, se presentó una remoción de coliformes del 100%, en esta ocasión empleó un tiempo de retención de 5 min, que ocasionó un aumento en este parámetro biológico, que tiene un valor de $1,68 \times 10^7$ NMP/100mL a la entrada de la planta piloto y a la salida de $1,98 \times 10^7$ NMP/100mL, según los resultados del laboratorio ANALQUIM. Los coliformes se ven afectados por el tiempo de retención hidráulico el cual fue demasiado corto para el proceso de pulimiento. Otro factor fue la concentración algal, puesto que, esta agua entró con un color verdoso proveniente de algún tipo de alga presente en el sistema de la laguna y en el proceso de tratamiento por medio de las membranas el agua reacciono, ocasionando el aumento de este parámetro.

Desde el punto de vista de los parámetros químicos, no se obtuvieron datos positivos, en especial en el porcentaje de la DBO, la cual presentó un aumento del 50% frente al valor que entró a la planta piloto, este valor fue de 232 mg/L y a la salida de la máquina se obtuvo un valor de 349 mg/L. Como se mencionó anteriormente, en el caso de la DBO, no se logró el aumento del oxígeno disuelto en el agua para lograr por lo menos una disminución de este parámetro presente en las aguas residuales, cabe aclarar que el proceso realizado en el laboratorio pertenece a un proceso anaeróbico.

En el caso particular de la DQO, el aumento presentado del parámetro anterior logra ser causante de que esta característica aumente su valor a la salida, a su

vez, como se mostró anteriormente, en el transcurso del paso por las membranas se debió haber dado una reacción de compuestos inorgánicos presentes como es el caso de sulfuros y nitratos, logran el aumento de una Demanda de Química de Oxígeno inorgánica, logrando en el proceso de filtración un aumento notable de este parámetro.

Los sólidos disueltos y la conductividad específica, fueron unos de los pocos parámetros que presentaron disminución respectiva sus valores iniciales a través del proceso de filtración por membranas. Estos parámetros tienen un comportamiento muy similar. La conductividad aumenta y disminuye su valor frente a la remoción de sales y sólidos disueltos en el agua. Por medio del proceso de filtrado, se logró la remoción de 3,85% de conductividad y en los sólidos se presentó un porcentaje de remoción de 8,70%. Esto nos indica que al disminuir una parte de estas partículas presentes en las aguas residuales, se logró remover y disminuir el valor de la conductividad, pero ninguno de estos valores presenta valores muy altos que compruebe la efectividad de las membranas de microfiltración. Empleando un sistema de nanofiltración se lograría remover una gran parte de sales y sólidos disueltos logrando una disminución del valor de la conductividad, para que esto sea posible, primero se debe presentar un agua residual con menor cantidad de materia o sustancias presentes en ésta.

Entre los parámetros físicos analizados en esta fase de investigación, se midió la densidad tanto a la entrada y a la salida de la planta piloto, con el propósito de conocer la cantidad de sustancias presentes en las aguas residuales. Se logró disminuir el valor de este frente el dato inicial a la entrada de la planta piloto, logrando una eficiencia de 9%, lo cual explica la disminución de los sólidos disueltos presentes en el agua residual, puesto que la temperatura del agua tanto a la entrada como a la salida se mantuvo constante con un valor de 22°C, lo cual descarta el cambio de densidades por factor de la temperatura.

De las características analizadas en todo este proceso, la que más genera datos negativos fue el color presente. En algunas fotografías, se presentó el cambio de color, y de forma organoléptica se evidencia la remoción de olor, de manera visual se identificó el cambio de color, sin embargo en los resultados entregados se identificó un aumento de color a la salida de la planta piloto, afirmando la teoría de la sobredosis* aplicada a las membranas de microfiltración. A la entrada de la planta piloto se observó un valor de 6 UPC y a la salida el laboratorio dio a

*Se aplicaron varios tipos de aguas residuales a un mismo sistema de aguas residuales, causando las reacciones químicas dentro de las membranas y ocasionado el aumento de la las UPC, materia orgánica, nutrientes y algunos metales.

conocer el valor de 17 UPC, lo cual indica un aumento del 183%, lo que puede ser generado por alguna sustancia o metal presente en las membranas, puesto que estas se emplearon para la remoción de aguas residuales del municipio de Chía, ocasionado el aumento desproporcional de este parámetro físico.

Como se mencionó anteriormente, estas pruebas se realizaron con el propósito de conocer el tiempo de retención más adecuado para las pruebas de un mismo sistema de membranas empleando un mismo tipo de agua residual en diferentes días. Este tiempo hidráulico de retención tan corto, no es óptimo para aplicarlo en las siguientes pruebas, dado que no garantiza un proceso de retención adecuada, y en vez de tratar el agua residual, provoca el aumento de los parámetros a la salida, puesto que la velocidad con la cual va el agua residual en el proceso de filtrado, no es apropiada para retener la mayor cantidad de sustancias presentes en este tipo de agua, y genera que la sedimentación no sea apropiada llevando partículas con el agua de filtrado.

9.1.1.3. Laguna de oxidación Madrid 2

De las tres lagunas oxidación analizadas para la aplicación de un tratamiento terciario de aguas residuales, esta agua se encontraba en el peor estado de todas las muestra analizadas hasta el momento, puesto que se encontraba con sólidos suspendidos presentes desde el criterio organoléptico, un color del agua residual visualmente de identifico vino tinto, provocado por un alga presente en el sistema de tratamiento, de acuerdo con el operario de la planta; la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca lo que provocó ese color a la salida de la laguna. El olor que presentaba esta agua residual a la salida de la laguna, se describe como un olor ofensivo en la cual se da un valor de 75. Observando los parámetros analizados en esta prueba, se presentaron los datos más altos entre las tres lagunas analizadas.

Entre los parámetros biológicos, los coliformes totales, presentan el mismo caso que en la PTAR 1 del municipio de Madrid, observando el aumento de manera considerable este valor en un 20%, lo que demuestra que estas membranas se sobrecargaron al aplicar varios tipos de agua, ocasionando el aumento de los valores de la características analizadas en cada una de la pruebas realizadas. Este factor importante que produce el aumento de esta variable, es la concentración algal presente en el agua, como se mencionó, esa agua residual proveniente de la laguna de oxidación, mostró un color vino tinto producido por una alga, este factor debió haber presentado una reacción con algunos

compuestos presentes en las aguas residuales, logrando de esta forma el aumento de éste.

El parámetro que más ocasionó problemas fue el color verdadero de las aguas residuales, como se ha explicado en cada uno de los casos, de manera organolépticamente se notaron ciertos cambios de color en las muestras analizadas a la entrada y a salida. De acuerdo con los resultados otorgados por ANALQUIM, los resultados de color a la entrada de la planta piloto son de 7 UPC y a la salida de ésta se obtuvo un valor de 18 UPC, ocasionando un aumento en este parámetro de un 157%. Como se explicó anteriormente, la procedencia de un metal o alguna reacción de sulfatos, nitritos o nitratos presente en el agua genera el aumento del color verdadero, de tal forma, el proceso de filtrado no está logrando remover este parámetro.

En cuanto el análisis de los parámetros químicos, se presentó un mejor comportamiento, frente a la muestra anteriormente mencionada, en esta ocasión se empleó un tiempo de retención de 25 minutos, en el cual el parámetro de la DBO muestra una remoción, se debe aclarar que este es el tercer tipo de agua residual sometido a las membranas de filtración, en el que se espera que estas no retenga más concentraciones presentes en el agua, pero al emplear este tiempo de retención se encontró un porcentaje minúsculo de remoción, pero se aplicó un sistema de rechazo. El valor de la DBO a la entrada fue de 394 mg/L, esta concentración es muy alta, lo cual indica la falta de mantenimiento en la laguna de oxidación y la ausencia de control por parte de las entidades encargadas de la regulación de las PTAR. El valor de la DBO a la salida de la planta piloto de membranas de filtración es de 301 mg/L, logrando un porcentaje de eficiencia del 24%.

En esta ocasión la DQO se comportó de igual manera que la DBO, remoción un porcentaje muy pequeño de este parámetro. La Demanda Química de Oxígeno, permite conocer la materia orgánica presente en el agua, en este ensayo se alcanzó una remoción del 26%, no es porcentaje que cumpla con la norma Colombiana. Este paso se debe al tiempo de retención hidráulico presentado en el laboratorio y al aumento del oxígeno disuelto que logró la disminución de la DBO y de la misma forma logrando la disminución de la DQO presente en el agua residual.

Entre los parámetros físicos, la conductividad y los sólidos disueltos presentaron porcentajes de remoción muy similares, los cuales nos permite analizar más detenidamente que disminución de la conductividad depende de la remoción que

se realice de las sales y los sólidos disueltos en el agua. Por este motivo, se determinó que para las siguientes pruebas no se debe analizar el parámetro de sólidos disueltos totales, y con el porcentaje de conductividad conocer la remoción apropiada de sales y de este tipo de sustancia mencionadas.

De forma organolépticamente se analizó el parámetro del olor presente en el agua residual, por medio de 7 personas incluyendo al investigador, se consideró que el color a la entrada de la planta piloto se presentaba como un olor ofensivo (75), después de 25 minutos, que fue el tiempo que se demoró las membranas en filtrar toda el agua analizada en el ensayo, se determinó que a la salida se presentaron olores permisibles a los cuales se les somete un valor de 25, teniendo de esta forma remoción de este parámetro de un 65%; en este ensayo no se empleó ningún tipo de adicción de hipoclorito de sodio.

Después de realizar las pruebas con un mismo sistema de filtración, se determinó que para las siguientes pruebas es recomendable emplear un tiempo de retención lo suficientemente largo, con el fin de remover la mayor cantidad de materia presente en el agua residual. Para las siguientes pruebas el tiempo de retención hidráulico más apropiado para logara una mayor eficiencia en el sistema debe ser de 20-25 minutos.

9.1.2. Sistema de filtración por membranas empleando un mismo tipo de vertimiento

Se realizaron tres ensayos de laboratorio con un solo tipo de agua residual pero en diferentes días, esta muestra se tomó desde vertimiento de la planta de tratamiento Echavarría. Esta planta trabajó con procesos químicos y con un sistema de filtración, pero en los días de que se tomaron las muestras se encontraba en mantenimiento estas membranas. Este laboratorio es diferente a los empleados en las lagunas de oxidación, puesto que en éste se analizaron otros parámetros y se toma un rango de tiempo de retención hidráulico que no varíe entre los 22 minutos y los 25 minutos para su proceso de filtración.

Los parámetros analizados en este laboratorio fueron los siguientes: color verdadero, conductividad, DBO, DQO, coliformes totales, pH, sólidos suspendidos, sólidos sedimentables, temperatura, densidad y olor. Entre estos resultados se notaron cambios en las características de las demandas bioquímicas de oxígeno y demanda química de oxígeno, puesto que en el primer día se presentó el mismo

comportamiento que con la muestra de Chía. Entre los valores biológicos, se logró en las últimas dos pruebas un avance muy grande, en donde la eficiencia se mantuvo por encima del 70% y la conductividad en los tres ensayos aumentó frente a la muestra de entrada.

Por medio de los ensayos de laboratorio de los tres días, se presentaron varios cambios en el parámetro de la DBO, el primer día se observó un aumento considerable mientras que el factor de la DQO disminuía más de un 50%, el segundo día se muestra un comportamiento muy normal, puesto que este parámetro disminuyó, al igual que la DQO, esto indica que las membranas lograron realizar un proceso de remoción, pero este porcentaje de eficiencia no superó más del 20% frente a los dos parámetros mencionados. En el tercer día, las membranas estaban totalmente saturadas de materia y sólidos, y aunque el tiempo de retención estuvo cerca de los 25 minutos, las membranas no lograron un proceso de retención y al igual que la muestra de Madrid 1, se aumentaron estas dos características importantes de las aguas residuales. Estos factores aumentaron sus concentraciones entre un 7% y 5% frente al valor de entrada de la planta piloto de membranas de filtración.

El aumento de la DBO se debe a la ausencia de oxígeno disuelto en los procesos de filtración; como se mencionaba anteriormente, el proceso de las membranas de filtración es anaeróbico y físico. En el caso de la DQO, su aumento puede darse por las reacciones presentes en el agua por medio de los factores de compuestos orgánicos que no logran una oxidación biológica adecuada.

Una de las características más importantes fue el parámetro biológico analizado; en este caso se solicitaron pruebas de laboratorio de coliformes totales, el primer día arrojó un porcentaje de retención muy bajo el cual no logró superar más del 20%, pero en los siguientes días se obtuvo una eficiencia superior al 70%, lo cual indica que a mayor tiempo de retención se aumentó un porcentaje de remoción lo bastante alto para separación de los coliformes presentes en las aguas residuales. Estos valores aunque se encontraron entre separaciones mayores al 70%, no logran cumplir con el Decreto 1594 de 1984, que estipula que al menos para la reutilización de estas aguas debe encontrarse valores por debajo de los 20000 NMP/100ml, mientras que en las tres pruebas se encontraron valores mayores a un 1'000.000 NMP/100ml.

Los parámetros que arrojaron los mejores comportamientos en los tres ensayos realizados con la muestra de la planta de Echavarría, fueron los sólidos suspendidos y sedimentables, la única falla que mostraron, se encontró en el

primer día, puesto que la remoción de SST fue de 55%, pero en los siguientes laboratorios se observaron eficiencias mayores al 80%, lo cual garantiza el buen funcionamiento de las membranas de microfiltración como un proceso de remoción de sólidos suspendidos en las aguas residuales, puesto que con estos datos obtenidos cumplieron con la normativa nacional. Mientras tanto en los sólidos sedimentables hubo eficiencias mayores al 89%, lo cual demuestra que este medio filtrante es muy efectivo en la remoción de sólidos presentes en las aguas residuales.

En el proceso de pulimiento de aguas residuales, por medio de la filtración por membranas, los parámetros más importantes que permiten conocer el rendimiento y el agua residual pueda llegar a ser reutilizada tanto para procesos agrícolas como recreativos, son los sólidos suspendidos en el agua residual, sólidos sedimentables y los coliformes totales. Como se observó anteriormente dos de estos parámetros presentan un comportamiento esperado, pero el factor de los coliformes impide que esta agua residual pueda llegar a ser reutilizada por medio alguno de estos propósitos anteriormente mencionados.

Entre los parámetros físicos analizados, en cuanto al color, por medio de fotografías se encontró la remoción de éste, pero a través de los resultados entregados por CIAN, se presentaron Unidades de Platino de Cobalto muy altas, de valores por el orden superior de los 80, las membranas removieron una parte de ellos en los dos primeros días, sin embargo en el tercer día no se pudo cumplir con este mismo mecanismo, puesto que las membranas ya se encontraba sobrecargadas y puede presentarse algún metal que reaccione, provocado variaciones en este dato a la salida de la planta piloto. El día de mejor comportamiento y eficiencia mayor al 50% fue el segundo, cuando la primera membrana comenzaba a sobrecargarse de materia orgánica y sólidos presentes en el agua.

Se empleó la misma técnica para la medición del olor, de forma organolépticamente se midió este parámetro, el cual siempre entró con olores molestos, pero se pudo remover una gran parte de este parámetro físico, en los dos primeros se logró un olor impermisible* para el ser humano, el tercer día se obtuvo un olor permisible** de baja intensidad.

* No se percibe el olor, en lugar en cual se encuentre varias personas no se persiga el olor hasta que tenga que tomar una muestra y desde un punto muy cerca de la muestra pueda sentir el olor.

** Olor permisible, es aquel que un lugar se logra oler pero no está fuerte para alterar a la comunidad.

Entre los últimos parámetros analizados en esos tres días, el pH varió de muchas formas, en el primer día, el agua a la entrada de la planta piloto se encontraba cumpliendo con la norma colombiana, pero después del proceso de filtración mostró una disminución de unidades provocando que este valor no cumpliera, se encontró un valor de 4,57, esto puede ser causado por alguna sustancia que se encontraba en el agua y al realizar los procesos de filtración se mezcló con el agua residual y provocó esta disminución. En los demás días cumple de acuerdo con la normativa establecida por el decreto 1594.

El parámetro que se comportó de igual forma fue la conductividad específica, en los tres ensayos siempre se encontró un aumento de esta característica, lo que demuestra el aumento de sales en el proceso de filtrado por medio de las membranas.

9.2. APLICACIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO TERCIARIO DE AGUAS RESIDUALES A TRAVÉS DE LA PLANTA PILOTO DE MEMBRANAS DE FILTRACIÓN

9.2.1. Laguna de oxidación del municipio de Chía.

Después de realizada la prueba de laboratorio y conociendo los valores exactos de los parámetros analizados a través de la investigación, se estudió el comportamiento hidráulico que ofrecen las membranas de filtración, entre estos se observaron características como el caudal, el flujo de permeado, el tiempo de retención hidráulico, el área de permeado y la carga hidráulica producida por las membranas. En esta fase de investigación, se observó el comportamiento de las membranas antes y después de las pruebas realizadas, a su vez el comportamiento del agua tratada para correspondiente comparación.

El caudal de permeado obtenido a través de esta prueba de filtración, arrojó un valor de 6 m³/d; este valor se obtuvo al procesar 40 L de agua residual tomada de la laguna de oxidación de Chía en tiempo de retención hidráulico de 12 minutos. Como se mencionaba anteriormente, es muy importante en estas pruebas conocer el tiempo de retención hidráulico, puesto que esto indica el mejor proceso de filtración y lograr la mayor remoción de partículas presente en esta agua residual.

En las figuras mostradas en este numeral de resultados, se presentó el estado de las membranas después de la filtración realizada en el laboratorio, en el cual se observa la acumulación de sustancias procedentes de las aguas residuales, realizando la comparación de la membrana de carbón activado en su estado inicial y en su estado después del proceso de filtrado, se muestra un color verde oscuro y tomando un olor molesto; observando toda la retención que estas presentaron en el ensayo de 12 minutos. A su vez la carcasa que mantenía la membrana, se encontró en un estado de grasa y acumulación de manchas procedentes del proceso de filtración, lo cual indica la materia orgánica presente en las aguas residuales tomadas para el correspondiente laboratorio.

Las membranas de polipropileno de $5\mu\text{m}$ exhibieron un comportamiento muy diferente frente a la membrana de carbón activado, puesto que éstas solo mostraron un color amarillo después del proceso de filtrado, lo cual demuestra que la membrana de carbón activo presentó un mejor rendimiento en la remoción de partículas presente en las aguas residuales. Las carcasas de estas no muestran la misma concentración al interior de estas, frente a al estuche de la membrana anterior.

El agua tomada desde el vertimiento de la laguna de oxidación de Chía, llegó con un color negro y olor molesto, con ayuda de una dosis de hipoclorito de sodio, se logró calmar el olor presente en el agua; al mismo tiempo se mejoró el proceso de remoción de color, puesto que a salida de la planta piloto se presentaba un olor permisible y el cambio de color de forma organoléptica se tornó de color verde, lo cual indica la remoción realizada por las membranas de microfiltración y el tiempo hidráulico empleado en la prueba se encontraba dentro del rango de lo indicado para el debido proceso de filtración, utilizando una presión de 2 Kg/cm^2 en la primera etapa y una presión de $1,5\text{ Kg/cm}^2$ para la segunda etapa.

Para la obtención de flujo de permeado, se tomó el valor del caudal sobre el área de permeado; para este desarrollo se calculó el área como si fuera una tela estirada, puesto que la membrana es de módulo en espiral, la cual muestra esta geometría. La carga hidráulica obtenida en este proceso permeado es de $38.71\text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{día}$, de acuerdo a la literatura, este valor se encuentra entre un rango admisible, en algunas literaturas se presenta valores de $0.7\text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{s}$ para áreas de permeado de 20 m^2 , debido a que ellos toman el tamaño de un módulo de membrana que se encuentra como mínimo 6 cartuchos de medios filtrantes.

El parámetro más importante tomado en esta prueba de laboratorio fue el tiempo de retención hidráulico, porque con este dato se realiza el análisis para conocer el

mejor tiempo empleado para las pruebas de membranas que trabajaron con un solo tipo de agua residual.

9.2.2. Lagunas de oxidación de Madrid 1

Las membranas de microfiltración utilizadas para el laboratorio de Chía, se emplearon para los ensayos de laboratorio de la laguna de oxidación de Madrid 1, en este caso se empleó un tiempo de retención más corto, al igual que en el ensayo anterior se estudian los parámetros hidráulicos anteriormente mencionados. El agua residual, de forma organoléptica se tornaba de mejor comportamiento que el vertimiento presentado por la laguna anterior, pero como se observó en los resultados de laboratorio se observó más concentración de sustancias que la muestra anterior, y al emplear este tiempo no se logró la remoción, en vez de estos hubo un aumento de los parámetros, aunque en las figuras se ilustró un agua más clara de forma organoléptica y menos contaminada que la tomada desde el punto de vertimiento.

El caudal permeado que se obtuvo en este ensayo de laboratorio es de 11,12 m³/d, este parámetro resultó al procesar por las membranas de filtración un volumen de 40L y un tiempo de retención hidráulico de 5 minutos, aunque de acuerdo con las figuras mostradas en la investigación sobre este vertimiento, se nota el cambio de color y la disminución de partículas que se encontraban suspendidas en el agua residual a la entrada de la planta piloto.

En las figuras de la unidad anterior, se observan ciertos cambios en el color del agua residual tomada desde la laguna de oxidación de Madrid 1 y a la salida de la planta piloto. Entre estos cambios, se mostró un agua de color verde con sólidos suspendidos en ella, aunque en los resultados se arrojaron un aumento en este parámetro, de forma visual se detectó una disminución en el color del agua residual analizada.

A su vez se exhibieron varios cambios en las membranas, en especial en la membrana de carbón activado en la cual se tornó un color verde oscuro después de las 2 pruebas realizadas hasta ese momento. Por causa del tiempo de retención empleado en este ensayo no se mantuvo un proceso de remoción, puesto que en cierta forma se le adiciona la remoción efectiva con la muestra de Chía, y no se realiza el proceso de filtrado. La carcasa de este filtro se tornó de

igual forma al primer ensayo de laboratorio, en la cual se evidencio materia en la parte inferior del estuche que protege la membrana de carbón activado.

En el caso de la membrana de celulosa, se observó de un color más amarillento frente a comportamiento en el primer laboratorio, de igual forma no se presenta la misma concentración de remoción que la mostrada por la membrana de carbón activado, la consecuencia de esto es que la membrana tiene el mismo diámetro de poro que el arrojado por la primera membrana, por ende la primera membrana está reteniendo toda la carga que estas dos membranas debe retener, por este motivo para la fase dos se emplearon cambios en los tamaños de los poros.

La membrana de polipropileno, mostró ciertos cambios entre éstos en la parte inferior, en la cual se torna de un color más oscuro, pero su proceso de filtrado sigue con normalidad; en este ensayo se mantuvo un tiempo de filtrado muy corto lo cual no permitió trabajar con una mayor eficiencia. En el caso de los parámetros hidráulicos restantes, se logró aumentar la carga hidráulica al siguiente valor: $71,74 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$. Esto indica el poco tiempo de retención y el aumento proporcional del estos parámetros frente a los resultados obtenidos en el primer ensayo; esto indica que las membranas de microfiltración de sedimentación no se comportan muy bien con cargas hidráulicas por encima de $35 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$

9.2.3. Lagunas de oxidación de Madrid 2

El último ensayo con las membranas de carbón activado y celulosa, se mostraron fallas, puesto que éstas ya se encontraban cargadas de materia orgánica presente en los medios filtrantes, pero a su vez se emplearon tiempos de retención altos lo cual demostró una remoción de parámetros con una eficiencia aceptable. Como se mencionó anteriormente, se saturaron las membranas lo provoco el aumento del tiempo, la bombas siguieron trabajando a una presión de $2 \text{ Kg}/\text{cm}^2$, pero se logró tomar un promedio para la obtención de tiempo de retención hidráulico, y con este parámetro lograr efectuar los últimos ensayos y obtener un mejor proceso de remoción de las sustancias presentes en las aguas residuales.

El caudal de permeado obtenido en este ensayo de laboratorio fue de $2,25 \text{ m}^3/\text{d}$, este parámetro se obtuvo al procesar 40L y al emplear un tiempo de retención hidráulico de 25 minutos. El agua residual tomada desde la laguna se oxidación de Madrid 2.

La membrana de carbón activado que se encontraba de un color verde oscuro en el proceso de filtración de Madrid 1; después de la última prueba se presentó un color muy oscuro, tornando a café, por la retención excesiva de materia y sólidos presentes en las tres muestras procesadas por estas membranas. Esta membrana se saturó lo que provocó la restricción del paso del agua a los tanques de filtración. La membrana de celulosa se tornó más amarillenta, sin embargo esta membrana a comparación de la anterior no demuestra un gran cambio, como se mencionó anteriormente; esto puede ser por utilizar membranas de 5 μm seguidas, provocando que esta membrana no estuviera funcionando de la mejor forma.

La membrana de polipropileno arroja un color muy extraño, puesto que en la parte de arriba se torna el color amarillo, pero en la parte de abajo un color negro, como si en esa parte solo haya retenido las sustancias presentes en el agua residual; pero hay varias posibilidades por las cuales se puede tornar este color, la primera es la acumulación de aire en la carcasa que no permito llenar la membrana totalmente de agua; la segunda opción es por la velocidad tan alta de sedimentación, causando que toda la materia se repose en la parte inferior de la carcasa, mostrando de esta forma el comportamiento ilustrado en la figura 35

La carga hidráulica presentó un valor de 14,51 $\text{m}^3/\text{m}^2\text{d}$, esta disminución en estos parámetros se debe al incremento del tiempo de retención hidráulico. Las carcasas de las membranas se tornaron más grasosas y con manchas negras alrededor por la acumulación de sustancias presentes en las tres aguas residuales. Estas membranas no pueden ser utilizadas para más pruebas, puesto que estos materiales no permiten ser lavados como membranas de cerámica.

9.2.4. Planta de tratamiento de aguas residuales Echavarría (Madrid 3)

9.2.4.1. Primer día

Se analizaron laboratorios con un solo tipo de agua residual, empleando un nuevo tipo de membranas de microfiltración; en este caso se emplearon membranas de polipropileno de 5 μm y 1 μm en la primera etapa de la planta piloto que corresponde el tanque de agua cruda hasta los tanques de filtración. Para esto se analizaron los parámetros desde el punto de entrada hasta los tanques mencionados anteriormente. Para la segunda etapa se analizó desde los tanques de filtrado hasta el tanque de agua tratada, el cual solo se mantiene con una

membrana de cerámica de $0,5\mu\text{m}$, lo que representa una disminución en sus poros con el fin de lograr una mejor proceso remoción por medio de las técnicas de filtración por membranas.

Para la primera etapa se observó una presión baja, con el fin, de remover la mayor cantidad de sólidos suspendidos, sólidos sedimentables y coliformes presentes en el agua residual analizada; para ésto se requirió en la primera etapa emplear tiempos de retención mayores a 16 minutos. En la segunda etapa se empleó una presión alta, puesto que, la membrana de cerámica necesita fuertes presiones para que su proceso de retención sea el indicado; por este motivo se empleó una presión de $2,5 \text{ Kg/cm}^2$, con un tiempo de retención de 6 minutos.

La forma de calcular el caudal de permeado, es tomando el volumen con que está permeando la membrana; es verdad que el proceso se alimenta con 40L, pero este volumen no es dato indicado para el precedente cálculo; por este motivo, en la etapa 1 se mostró un volumen de 31L el cual fue obtenido por las medidas de los tanque almacenamiento presentes en el ensayo de laboratorio. Con el tiempo de retención hidráulico y con el volumen de permeado, se obtuvo el caudal. Este dando un valor de $2,711 \text{ m}^3/\text{día}$. En la segunda etapa se empleó un volumen de 17L obteniendo un caudal de $4,080 \text{ m}^3/\text{día}$.

Uno de los datos más importantes en el proceso de cálculo de parámetros hidráulicos, es el área de superficial de la membrana; para la obtención de este dato se procedió a medir las dimensiones de la membrana, pero como si se presentara como un cilindro, si nó su longitud total como si se encontrara enrollada por la altura de éste. En la primera etapa se obtuvo un área de $0,155 \text{ m}^2$, lo cual indica que estas membranas de sedimentación son muy grandes de longitud. Cabe aclarar que de acuerdo con el comportamiento de esta membrana, presenta una configuración en espiral. Para la segunda etapa, la membrana de cerámica se realiza el mismo procedimiento obteniendo un área de $0,053\text{m}^2$, esta membrana está formada por una sola capa de membrana, la cual tiene una longitud de 19,94 cm por su respectiva altura obtenemos este dato de precedente cálculo de la carga hidráulica. Estas áreas expuestas en esta sección se emplearon para los cálculos del segundo y tercer día.

Uno de los parámetros más importante de las membranas de filtración es el flujo permeado o en este caso la carga hidráulica, este parámetro es la velocidad por la cual el agua atraviesa los poros de las membranas logrando la retención de materia presente en el agua y de esta forma lograr el proceso de filtración. De acuerdo con la literatura este tipo de agua se presenta por medio de grandes áreas de

membranas mayores en algunos casos a un metro cuadrado, pero estos cartuchos muestran áreas que están por debajo de este parámetro. El flujo de permeado se encuentra en un sistema de presión en valores entre los 100 m³/m²*día a 200 m³/m²*día. En el proceso de filtración empleado las pruebas de laboratorio se arrojaron un valor de 17,49 m³/m²*día en la primera etapa y 76,39 m³/m²*día en la segunda entrada. Lo anterior indica que el caudal que se emplea para estas membranas de filtración es muy bajo para un sistema de presión. Es importante aclarar que en la primera etapa se mantuvo una presión por debajo de 0,5 Kg/cm², lo cual no permite un tiempo de retención alta y ocasionada por ende la disminución del caudal.

Las membranas en su primer día presentaron un comportamiento normal, en comparación con las figuras del primer día al iniciar las pruebas de laboratorio; se presentaron cambios de color, como en el caso especial de la membrana de polipropileno de 5μm, el cual evidenció un color de tonalidad verde al final de la prueba de laboratorio, mientras que la siguiente membrana arrojó el mismo color blanco a través de toda prueba de laboratorio. La membrana de cerámica tuvo ciertos cambios similares a los de la primera membrana, pero la facilidad de esta membrana es su forma de lavado, puesto que solo se utiliza una lija para su correspondiente limpieza, mientras que las membranas de polipropileno no tiene la posibilidad de lavado, lo cual indica que después de empleados estos cartuchos lo más recomendable es desechar.

En el caso del agua tratada en el primer día, se evidenció un agua cristalina de color amarillo, cuando a su entrada se encontró un color verde oscuro, lo cual indica, desde el punto de vista organoléptico el cambio que presentó este tipo de agua a la entrada de la planta piloto como a la salida de ésta. A su vez se tomaron las respectivas figuras antes en el proceso y después del proceso para conocer el funcionamiento de estas membranas con una distribución de poros en disminución.

9.2.4.2. Segundo día

El comportamiento de las membranas en el segundo día, se mantuvo igual al primero, utilizando la misma presión para la primera etapa y la segunda etapa, la única variable que se mostro fue el tiempo de retención hidráulico que aumento en sus dos etapas. Las membranas evidenciaron un cambio de color notable en el segundo día, la primera membrana se observó un color negro, la cual demostraba

la cantidad de materia orgánica y sólidos suspendidos retenidos, mientras que la segunda membrana cambió de color blanco a un color gris oscuro, observando la alteración de estas membranas después de la prueba realizada en el laboratorio. La membrana de cerámica mostró el mismo comportamiento que la prueba número 1, al ejecutarlos esta membrana arroja un color más claro.

El agua residual presentó el mismo comportamiento que en el primer día, observando de esta forma la eficacia de la membrana a través del tiempo de retención empleado en todo el ensayo, este valor es un poco más de 24 minutos, lo cual representa que estos medios filtrantes demostraron un buen trabajo para la retención de sólidos presentes en las aguas residuales.

Entre los parámetros hidráulicos calculados a través del segundo día, no se emplearon gran variación frente a los datos obtenidos en el primer día. Como se mencionaba anteriormente el único cambio que hubo fue el tiempo de retención hidráulico el cual en la primera etapa es de 17 minutos con 5 segundos, el valor del caudal es similar al de primer día, y la carga hidráulica está entre rangos similares frente al primer día de laboratorios con una misma muestra de agua. En la segunda etapa se obtuvo un tiempo de 6 minutos con 5 segundos, mostrando un valor más bajo de la carga hidráulica, sin embargo este no se encuentra por debajo del valor inicial de esta misma etapa.

9.2.4.3. Tercer día.

El último día de ensayos de laboratorios, se presentó el comportamiento más notable de las membranas, aunque ésta nunca llegó a estar saturadas; tampoco se disminuyó la presión dejando fluir el líquido analizado hacia los tanques de filtración. Este último ensayo sí arrojó un cambio en el aumento de tiempo de retención hidráulico en cada una de sus etapas, especialmente en la segunda etapa en la cual disminuyó la presión de la membrana de cerámica para conocer el comportamiento que esta podía garantizar.

El comportamiento de las membranas indica un cambio de color; la primera membrana de filtración, arrojó el mismo color obtenido en el segundo día de pruebas, pero la membrana número 2, generó en ella un color más oscuro en ella, provocado por la acumulación de sólidos suspendidos en el agua, una correspondiente comparación con la membrana empleada para los laboratorios de las lagunas de oxidación es que esta membrana mostraron cambios de color que demuestran el trabajo que estuvo realizando a través de los ensayos de laboratorio ejecutados en los 3 días, mientras que el filtro de celulosa no presentó

ningún tipo de color oscuro que demostrara su trabajo para la retención de sólidos en las aguas residuales.

La membrana de cerámica mostró el mismo comportamiento que la membrana de polipropileno en las pruebas de las lagunas de oxidación. En ésta, el último día se observó un color oscuro en su parte inferior, ocasionado por la acumulación de aire dentro del cartucho o por la sedimentación presente en el agua. En esta ocasión el filtro de cerámica actuó del mismo modo que la membrana de polipropileno, sin embargo como se muestra en fotografías, esta membrana de cerámica no mostraba aire dentro del cartucho, lo cual implica, que por las fuertes presiones provocadas en este punto, se realizan procesos de sedimentación en el agua ocasionando que este filtro se torne más oscuro en la parte inferior.

Después de algunos días se observó que dejando el cartucho con agua residual adentro de él, se presentaba el mismo color en toda su superficie de membrana y no por capas, como se observó en ese día de laboratorio, lo que indica que la sedimentación de partículas es la causante de ese cambio de color en el cartucho.

Por último, entre los parámetros hidráulicos analizados, no se presentaron variaciones de gran magnitud frente a los valores arrojados en los días anteriores, sin embargo el único factor que si cambió su valor fue la carga hidráulica en la segunda etapa, como se mencionó anteriormente, se disminuyó la presión en esta etapa provocando de esta forma que el parámetro tuviera que bajar su valor. El tiempo de retención hidráulico de esta etapa mencionada es de 7 minutos, logrando de esta forma un carga hidráulica de $65,48 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$.

9.3. COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA EL VERTIMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES DESDE LO ESTABLECIDO POR LAS NORMATIVAS INTERNACIONALES Y COLOMBIANAS.

Como se mencionaba anteriormente, los parámetros de mayor importancia en el proceso de filtración por membranas son los sólidos suspendidos, sedimentables y coliformes totales presentes en las aguas residuales, de acuerdo con el decreto 1594 de 1884, la ley 3930 del 2010; se cumplen satisfactoriamente con el área de sólidos, cumpliendo con la normativa colombiana. Sin embargo el parámetro que nos indica el comportamiento de reutilización de este tipo de aguas residuales para el uso agrícola y recreativo son los coliformes totales, los cuales a través del

estudio microbiológico realizado por el laboratorio certificado por el IDEAM, no cumple con la normativa vigente colombiana, puesto que para las aguas residuales/ se pide por lo mínimo 1000 NMP/100ml, y a pesar que la planta piloto presentó porcentajes de remoción de un 70% hacia arriba no alcanza a cumplir con la normativa, debido a que estos valores se encuentra en el margen de 1×10^6 NMP/100ml.

Por lo anterior, este tipo de agua residual después de los ensayos realizados por medio de un medio filtrante, a través de las membranas de filtración, no logran cumplir como un tipo un sistema de tratamiento reutilizable de agua residual en las plantas analizadas.

10. CONCLUSIONES

Por medio de los procesos de filtración realizados por las membranas de microfiltración, se lograron porcentajes de remoción altos en los parámetros fundamentales como son los sólidos suspendidos, sólidos sedimentables y coliformes totales, logrando cumplir con el decreto 1594 del 1984 y el decreto 3930 del 2010 de manera satisfactoria frente a las dos primeras características mencionadas, pero el factor más importante, para conocer el verdadero funcionamiento de esta técnicas como pulimiento a las aguas residuales, no cumplió con la normativa vigente, puesto que los coliformes nos permiten conocer este tipo de reutilización tanto para uso agrícola, para uso recreativo y en debido caso al consumo doméstico, lo que deja claro que el fundamento principal de las membranas y de los procesos de tratamiento terciarios es la reutilización de este líquido con el fin de beneficiar a la comunidad. Por ende se concluye que las membranas de microfiltración, a través de los laboratorios realizados no cumplen como un sistema de tratamiento terciario en los municipios analizados en esta investigación.

Se analizaron los comportamientos de los parámetros seleccionados a través de los diversos ensayos de laboratorio empleando las técnicas de filtración por membranas, se determinaron comportamientos de aumento y disminuciones de cada uno de estas características mencionadas en los resultados, destacando el comportamiento de los parámetros de la Demanda Bioquímica de Oxígeno y la Demanda Química de Oxígeno. De acuerdo con la literatura, estos parámetros deben arrojar comportamientos muy similares, lo que indica que estos parámetros aumentan y disminuyen juntos, pero en este proceso anaeróbico y físico se mostraron casos totalmente contrarios. El primer caso se exhibió en las lagunas de oxidación del municipio de Chía, en la cual a la salida de la planta piloto de las membranas de filtración, se obtuvo una disminución del valor de la DBO, sin embargo el valor de la DQO aumento. El segundo caso, en el primer día de los ensayos con la muestra de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de Echavarría en el municipio de Madrid, se demostró el caso contrario, esto significa, que hubo un aumento de la DBO a la salida y una disminución de la DQO, esto concluye, que por medio de proceso de filtrado, se obtuvieron reacciones químicas que lograron variar estos parámetros, logrando aumento y disminución del oxígeno disuelto en el agua residual y reacciones químicas de algunos compuestos como pueden ser cloruros, nitritos, nitratos y sulfatos presentes en este tipo líquido. En el caso de Chía se debe su aumento a

los cloruros presentes en el agua, puesto que, se aplicó una dosis de hipoclorito a la entrada y a la salida de la planta piloto de membranas de microfiltración.

En el comportamiento de las membranas a través de los ensayos realizados por medio de las muestras asumidas en el estudio, mostró la retención de sólidos presentes en el agua residual por medio de estos medios filtrantes, lo cual expone la labor de los cartuchos a través de cada una de las pruebas realizadas. De forma organoléptica se presentó un cambio de color en cada una de las muestras procesadas por la planta piloto, cumpliendo de esta forma la remoción de sólidos, materia orgánica, coliformes, conductividad, pH, olor, lo que produjo que las membranas se cargaran totalmente de materia suspendida en los poros de los cartuchos.

Observando los parámetros hidráulicos obtenidos por los ensayos de laboratorio con las muestras de la planta de tratamiento Echavarría, empelando tiempos de retención hidráulicos altos en su primera etapa y utilizando un volumen de alimentación de 40L, se identificaron los procesos de remoción de sólidos y la velocidad más óptima para remoción de éstos. De igual forma, el manejo de la presión fue fundamental para desarrollo de las pruebas de laboratorio, por este motivo se emplearon presiones bajas en la primera etapa ejecutando un flujo tangencial adecuado y de esta forma lograr la mayor cantidad remoción de partículas presentes en el aguas residuales, mientras que en la segunda etapa se manipulo una presión alta tornando a tiempos de retención cortos.

Observando los factores de operación y mantenimiento de las membranas de filtración frente a una laguna de maduración, se encuentra ventajas y desventajas de los cartuchos. En los procesos de operación se presenta una ventaja de las membranas frente la laguna de maduración, debido a que su proceso de instalación es mucho más sencillo y su operación puede ejecutarse en pocas horas, logrando tiempo de retención hidráulico es más corto frente al garantizado por la laguna, pero el principal problema de las membranas es la energía eléctrica, en caso tal que no haya fluido eléctrico, la operación de las membranas se detiene, al igual que se presente algún daño de la bomba principal del sistema, mientras que en el caso de la laguna no se sufre por estos procesos y este puede trabajar las 24 horas sin ningún tipo de molestias. En el proceso de mantenimiento se tiene la ventaja que las membranas se pueden cambiar cada 5 años; estas pueden ser lavadas dependiendo del tipo de material y su cambio es muy sencillo, pero las lagunas de maduración presentan la desventaja que en si algún tipo de alga se introduce en la laguna de estabilización, puede lograr la alteración de retención que presenta este sistema de tratamiento de aguas residuales.

Para concluir esta investigación, las técnicas de filtración por membranas son un sistema de pulimiento de aguas residuales no efectivo, el cual puede no garantizar la reutilización de este tipo de agua residual. Uno de los problemas principales por lo cual las membranas no lograron cumplir como un proceso de reutilización, fueron las cantidades de concentraciones altas de propiedades físicas, químicas y biológicas que presentaba las aguas residuales tomadas para el muestreo de los laboratorios ejecutados.

Se debe presentar un tratamiento secundario adecuado el cual se encuentre en buen proceso de mantenimiento para la ejecución de las membranas y de esta forma lograr un proceso de reutilización con este tipo de agua residual. Por último las membranas de microfiltración lograron remover las dosis de sólidos presentes en las aguas residuales presentando las eficiencias mayores del 80% y cumplimiento con la normativa nacional vigente, sin embargo el objetivo principal de un tratamiento terciario es tener aguas para procesos de reutilización, pero el hecho que las membranas retengan sólidos no quiere decir que el agua se pueda reutilizar.

11.RECOMENDACIONES

- Emplear el sistema de microfiltración como un sistema de pre-tratamiento de filtración, usando un medio filtrante de ultrafiltración para la remoción más efectiva de los coliformes presentes en el agua.
- Manipular un tiempo de retención más alto, disminuyendo las presiones del sistema, para lograr un mejor proceso de retención de partículas presentes en las aguas residuales.
- Utilizar como una prueba de muestreo, una planta de tratamiento de aguas residuales que cumpla con el criterio de tratamiento secundario, logrando con ésto un mejor proceso de filtración, evitando de esta forma grandes acumulaciones de materia orgánica presente en el agua.
- Realizar un estudio más a fondo de los parámetros que logra retener un sistema de filtración, proporcionando mejor información sobre los siguientes parámetros: sólidos suspendidos, coliformes totales y sólidos sedimentables, logrando de esta manera un mejor proceso de remoción y procesos de reutilización de las aguas residuales.
- Ejecutar más ensayos de laboratorio en un mismo punto de captación, con el propósito de evaluar la eficiencia verdadera de las membranas, estando sometidas a varias concentraciones desde un mismo punto.
- Realizar este tipo de aplicación con varios municipios colombianos, medir cada uno de los factores y determinar qué tipo de plantas logran cumplir para la aplicación de este sistema de tratamiento y de esta forma cumplir con el objetivo de los pulimientos, que es la reutilización de este tipo de agua residual.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALFARO GARZON, Sandra Carolina. Validación de los métodos de filtración por membrana y sustrato definido Readycult, para detención de coliformes totales y *Escherichiacoli* en aguas crudas, tratadas y potables en el acueducto de Zipaquirá. Bogotá, 2006; Tesis de grado para optar por el título de Microbióloga industrial; PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA. [En línea] <<http://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/ciencias/tesis271.pdf>>
2. ARBOLEDA VALENCIA, Jorge. Teoría y práctica de la purificación del agua. Bogotá D.C.: TACTI-K-CREATIVA, 1992.+
3. AWWA. Standard methods for the examination of water and wastewater. 14 ed. USA: American public health association, 1975.
4. AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. Calidad y tratamiento de agua manual de suministros de agua comunitaria. Madrid: McGRAW-HILL, 2002.
5. CARRILLO ZAPATA, Elisa Marcela., LOZANO CAICEDO, Aura María. Validación de detención de coliformes totales y fecales en agua potable utilizando Agar Chromocult. Bogotá, 2008; Tesis de grado para optar por el título de Microbióloga Industrial; PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA. [En línea] <<http://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/ciencias/tesis203.pdf>>
6. COLOMBIA. MINISTERIO DE AGRICULTURA. Decreto 1594 (26 de Junio del 1984). Cuanto a usos del agua y residuos líquidos. Bogotá D.C.: El ministerio, 1984. En línea <<http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=18617>>
7. COLOMBIA. MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Decreto 3930 (25 de Octubre del 2010). Cuanto a usos del agua y residuos líquidos. Bogotá D.C.: El ministerio, 2010. En línea <http://www.corpamag.gov.co/archivos/normatividad/Decreto3930_20101025.pdf>

8. CRITES, Ron., TCHOBANOGLIOUS, George. Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Bogotá: McGRAW-HILL, 2000.
9. ESPAÑA. MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE. Medios legales para la lucha contra la contaminación de las aguas subterráneas. Madrid: MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE, 1985. En línea <http://aguas.igme.es/igme/publica/libro43/pdf/lib43/2_3.pdf>
10. ESPAÑA. MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE. Manual para la gestión de vertidos. Madrid: MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, 2007. En línea <http://www.magrama.gob.es/es/agua/publicaciones/manual_para_la_gestion_de_vertidos_tcm7-28966.pdf>
11. GRAJALES GARCIA, Natalia Giomara,. PRIETO CASTAÑEDA, Alejandra. Análisis de la normatividad aplicada al vertimiento de aguas de producción en la explotación de recursos hidroccarburos en Colombia. Bucaramanga, 2012; Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero de petróleos; UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTADER. En línea <<http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/977/2/144259.pdf>>
12. GUIZARD, Christian. Tecnicas membranarias de filtracion de liquidos. 2 ed. Mérida: Universidadde de los andes, 1999. En línea <<http://www.firp.ula.ve/archivos/cuadernos/S451B.pdf>>
13. GUASTALLI, Andrea Raquel. Estudio sobre la aplicación de la tecnología de membranas para la recuperación de ácido fosfórico de las aguas de lavado en el proceso de anodizado del aluminio. Barcelona, 2006; tesis de doctorado. UNIVERSIDAD DE BARCELONA. [En línea] <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/69956/GUASTALLI_TESIS.pdf;jsessionid=BC83C308FC3074EE17E50C3CDCD74F84.tdx2?sequence=1>
14. HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto. Metodología de la investigación. 4° ed México: McGRAW-HILL, 2006.
15. MALLWVIALLE, Joel., ODENDAAL, Peter E., WIESNER, Mark R. Tratamiento de agua por procesos de membrana principales, procesos y aplicaciones. Madrid: McGraw-Hill, 1998.

16. MARTÍNEZ MARTÍNEZ, Rebeca. Descontaminación de efluentes de la industria cervecera mediante el uso de membranas UF arrolladas en espiral como barrera de seguridad. Murcia, 2010; tesis de doctorado; UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SAN ANTONIO. [en línea] <<http://repositorio.ucam.edu/jspui/bitstream/10952/59/1/Tesis%20Doctoral%20PDF.pdf>>
17. METCALF & EDDY. Ingeniería de aguas residuales, volumen I. 3 ed. Madrid: McGRAW-HILL, Ed. Tercera, 1995.
18. METCALF & EDDY. Wastewater engineering treatment and reuse. International Ed. New York: McGRAW- HILL, 2003.
19. METCALF & EDDY. Wastewater engineering treatment and resource recovery. Fifth Ed. New York: McGRAW- HILL, 2014.
20. MEXICO. SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES. NOM-003- SEMARNAT. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Ciudad de México: SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, 1997. En línea <<http://hidropluviales.com/?q=node/63#NOM03>>
21. BROCK, Thomas D. Microbiología, 2º Ed. México: PRENTICE-AL HISPANOAMERICANA, 1991
22. OROZCO JARAMILLO, Álvaro., SALAZAR ARIAS, Álvaro. Tratamiento biológico de las aguas residuales. Medellín: Universidad de Antioquia- Facultad de ingeniería, 1987.
23. PROWATER ARGENTINA. Tratamiento de agua para consumo con carbón activado. Buenos aires, documento de pdf; PROWATER ARGENTINA.
24. PROYECTOS TECNICOS Y MAQUINARIA LTDA. Descripción general del sistema de tratamiento de aguas residuales con tecnología Biolace. Bogotá; proyecto de municipal; Empresa de Acueducto y alcantarillado de Madrid.
25. RAMALHO, R.S. Tratamiento de aguas residuales. Bogotá D.C.: REVERTE, 2003.

26. ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Acuitratmiento por lagunas de estabilización. Bogota: ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA, 1998. p 38-39.
27. ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Colombia sólo trata 9% de sus aguas residuales. En: Espectador, Bogotá: (25, Sep., 2008); En línea <<http://www.elespectador.com/impreso/negocios/articuloimpreso-colombia-solo-trata-9-de-sus-aguas-residuales>>
28. ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Tratamiento de aguas residuales: teroria y principios de diseño. Bogota: ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA, 1999.
29. SANZ ESCRIBANO, David. Estudio de viabilidad de la reutilización de las aguas residuales depuradas de una planta petroquímica mediante tecnología de membrana. Valencia, 2007; tesis de maestría; UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA. [En línea] <<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12904/DESARROLLO%20DE%20UN%20SISTEMA%20DE%20OI%20PARA%20LA%20REUTILIZACI%C3%93N%20DE%20AGUAS%20RESIDUALES%20DEPURADAS%20DE%20UNA%20PLANTA%20.pdf?sequence=1>>
30. SOTTO DÍAZ, Arcadio. Aplicación de tecnología de membranas de nanofiltracion y osmosis inversa para el tratamiento de disoluciones acuosas de compuestos fenólicos y ácidos carboxílicos. Madrid, 2008; tesis de doctorado; UNIVERSIDAD REY JUAN CARLOS. [En línea] <<http://eciencia.urjc.es/bitstream/10115/4605/1/Tesis%20ARCADIO%20SOTTO%20D%C3%8DAZ.pdf>>
31. SISTEMA NACIONAL DE INFORMACIÓN AMBIENTAL. Tecnología de membranas de osmosis inversa. Santiago: SINIA. En línea <http://www.sinia.cl/1292/articles-49990_25.pdf>
32. SISTEMA NACIONAL DE INFORMACIÓN AMBIENTAL. Tecnología de membranas de ultra y microfiltración. Santiago: SINIA. En línea <http://www.sinia.cl/1292/articles-49990_26.pdf>

ANEXOS