

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

Darío Roncancio Parra, Estudiante de Ingeniería civil.

Universidad La Gran Colombia, Colombia, drp1478@gmail.com

Asesores: I.C. Héctor Fabio Arcila Torres, Lic. Laura Milena Cala Cristancho

Universidad La Gran Colombia, Colombia. hector.arcila@ugc.edu.co, laura.cala@ugc.edu.co

Resumen- En Colombia el 70% de las aguas residuales no son tratadas, lo cual indica el aumento de la contaminación en las aguas superficiales del país. Las membranas de filtración son la técnica de tratamiento empleada en los procesos de pulimiento de las aguas residuales, con el fin de buscar la reutilización de este líquido. Por este motivo se realizó el estudio de la aplicación de un sistema de tratamiento terciario para las plantas de tratamiento de aguas residuales, con el propósito de obtener agua de buena calidad. Se construyó una planta piloto con membranas de microfiltración variando los tamaños de poros como sistema de tratamiento terciario y se analizaron muestras de cuatro Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) a la entrada y salida de la planta piloto según los parámetros establecidos por la Resolución 0631 del 2015: coliformes, sólidos suspendidos totales SST y sólidos sedimentables SSD; además, se determinaron los parámetros de: conductividad, color, demanda bioquímica de oxígeno DBO, demanda química de oxígeno DQO, olor, pH, sólidos disueltos totales SDT, turbiedad y temperatura. Los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio determinaron que las membranas de microfiltración no son un sistema óptimo para este tipo de aguas residuales, aunque éste retuvo una gran cantidad de sólidos presentes en el agua, no implica que esta técnica cumpla con el objetivo principal de un tratamiento terciario. Es recomendable aplicar este sistema de tratamiento en una PTAR de un municipio y realizar las respectivas pruebas en el sitio, variando los sistemas de filtrado y determinar cuál es más óptimo para cada Planta.

Palabras claves: tratamiento terciario, aguas residuales, parámetros, membranas, planta piloto.

Abstract- In Colombia 70% of sewage is not treated, indicating the increasing pollution in surface waters. Filtration membranes are used treatment technique polishing processes of wastewater, in order to search for reuse this liquid. Therefore, the study of the application of a system for tertiary treatment plants wastewater treatment, in order to obtain good water was performed. A pilot plant was constructed with microfiltration membranes with varying pore sizes as tertiary treatment system and samples of four plants Wastewater Treatment Plant (WWTP) at the entrance and exit of the pilot plant for the resolution were analyzed according to the parameters set 0631 2015: coliform, total suspended solids SSD SST and settleable solids; Additional parameters were determined: conductivity, color, BOD biochemical oxygen demand, chemical oxygen demand COD, smell, pH, total dissolved solids TDS, turbidity and temperature. The results obtained in laboratory tests determined that microfiltration membranes are far from ideal for this type of wastewater, although it retained a large amount of solids present in the water does not imply that this technique meets

the main objective of a tertiary treatment. It is recommended to apply this system of treatment in a WWTP in a municipality, perform the respective tests on the site, varying filtration systems, and determine which is most optimal for each plant.

Key Words: tertiary treatment, wastewater parameters, membranes, pilot plant.

I. INTRODUCCIÓN

El aumento de la contaminación en los cuerpos hídricos en el país se ha dado por falta de tratamiento eficiente de las aguas residuales. De acuerdo con el presidente de Andesco, solamente el 30% de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (en adelante PTAR) se encuentra en funcionamiento, pero no se encuentra en procesos adecuados. En ocasiones este tipo de agua residual es utilizada para irrigar cultivos, provocando de esta manera que los organismos patógenos deterioren los procesos agrícolas y ocasionen problemas para la sociedad colombiana [1]. Aunque el país ha invertido en nuevos proyectos como es el caso del proyecto Canoas en la ciudad de Bogotá D.C., no se aplica este apoyo financiero en las plantas actualmente en operación para completar su tratamiento, por ende, mientras se construyen estos proyectos la contaminación de los ríos y quebradas del país va en aumento.

Las membranas de filtración son un sistema de tratamiento de agua potable, que es normalmente utilizado para la remoción de sales y sólidos disueltos. En algunas plantas de tratamiento de aguas residuales se ha implementado este sistema como mecanismo de pulimiento a este tipo de agua, logrando reutilizar este tipo de agua para algunos usos básicos humanos, en los casos donde se encuentra algunas regiones con escases de agua y este es el único sistema que se encuentra funcionando.

El propósito de la investigación fue estudiar si la aplicación de las membranas de microfiltración es un sistema óptimo para las PTAR de los municipios colombianos con el fin de reutilizar estas aguas y detener en cierta manera la contaminación de los cuerpos hídricos nacionales y de los cultivos agrícolas. El estudio se basó en determinar las características por medio de ensayos de laboratorio de las propiedades físicas, químicas y biológicas de las aguas

residuales analizadas, empleando como instrumento una planta piloto construida dentro de la investigación.

A continuación se explica brevemente los materiales y métodos aplicados en la investigación, los cuales consisten en la descripción de las características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales y la teoría básica de estos sistemas de filtración. La descripción de la planta de piloto construida para este estudio de membranas de filtración y la descripción de las membranas empleadas para los laboratorios. En los resultados, se presentan los valores obtenidos a través de los laboratorios empleados.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Características de las aguas residuales

Por medio de los parámetros de aguas residuales se conoce la eficiencia de las plantas de tratamiento de este tipo de aguas, en este caso el desarrollo de las técnicas de filtración por membranas. A continuación se explican las características analizadas a través de los ensayos de laboratorio.

1) Características físicas:

Entre los parámetros analizados a través del desarrollo de la investigación, se determinaron los siguientes: sólidos suspendidos, sólidos sedimentables, color, conductividad, densidad, temperatura y olor. A continuación se explica cada una de estas características:

Sólidos Suspendidos (SS): 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. Esta filtración se hace en crisoles de Gooch que se utilizan como medio filtrante el asbesto o la fibra de vidrio [2]

Sólidos Sedimentables (SSD): la determinación de los sólidos sedimentables es de gran importancia en el tratamiento de las Aguas Residuales Domésticas al permitir la determinación de la eficiencia de los procesos de sedimentación. A diferencia de los demás sólidos que se presentan unidades en mg/L, este parámetro se mide en unidades de mL/L. Es la cantidad de materia que sedimenta de una muestra en periodo de tiempo [3].

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 1µm, mientras que los SD que se encuentran compuestos por materia orgánica, inorgánica e iones, estos se encuentran entre tamaños de partículas menores de 0.001µm. Para este proceso de eliminación se aplican técnicas de filtración por membrana en los sistemas de tratamiento terciarios de agua residual [2].

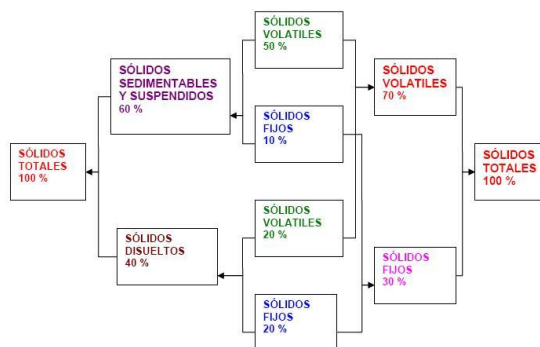


Fig 1. Porcentaje de la composición de los sólidos presente en las aguas residuales. Fuente: [4]

Olor: 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 [5].

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 [5].

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 negras, mientras que el *color verdadero* es por causa de las sustancias disueltas y coloidales presente en éstas [6].

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 [5].

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 e 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 da en unidades nefelométrías de turbiedad (NTU) [6].

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. Entre los parámetros analizados en este proceso de investigación fueron: DBO, DQO, pH. A continuación se explica cada uno de estos parámetros:

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO). La DBO se define como la cantidad de oxígeno requerida por las bacterias en el proceso de estabilización de la materia orgánica descomponible bajo condiciones anaeróbicas. 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 [6].

Demanda Química de Oxígeno (DQO): la DQO es una prueba ampliamente utilizada para determinar el contenido de materia orgánica de las aguas residuales.

pH. El intervalo adecuado de pH para la 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 [6].

3) Características biológicas:

A través de este proceso de investigación, solo se analizó el parámetro de coliformes totales. A continuación se define el parámetro mencionado:

Coliformes totales: se definen como todas las bacterias Gram negativas en forma bacilar que fermenta las lactosas a temperatura de 35 a 37°C, produciendo ácido y gas (CO₂) en 24 horas [7] [8].

B. Teoría y descripción de las membranas

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 [9].

1) **Configuraciones del módulo.** La unidad de operación en la que se disponen las membranas para su utilización 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.

2) **Clasificación de acuerdo a su naturaleza.** Las membranas sintéticas pueden realizarse a partir de un gran número de diferentes materiales: orgánicos (polímeros) o inorgánicos (metales, cerámica, vidrio, entre otros).

3) **Clasificación según su geometría.** Las membranas pueden prepararse en dos formas geométricas: plana y cilíndrica.

4) **Microfiltración (MF).** La microfiltración es el proceso más antiguo de las técnicas de filtración por membranas. Es el proceso más “libre”, puesto que, este proceso no requiere de pre-tratamiento de filtración, teniendo en cuenta que el tamaño de sus poros se encuentran entre 0,05µm a 5µm. A consecuencia de su tamaño se utiliza especialmente para la eliminación de partículas, microbios y se puede manipular a través de presiones ultra bajas [9] [10] [11].

Entre sus aplicaciones, 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.

5) **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 [9] [10] [11].

6) **Ósmosis Inversa (OI) y Nanofiltración (NF):** La Ósmosis Inversa es capaz de rechazar contaminantes o partículas, con diámetros tan pequeños como 0,0001µm, mientras que la nanofiltración puede rechazar contaminantes tan pequeñas como de 0,001µm. 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 [9] [10] [11].

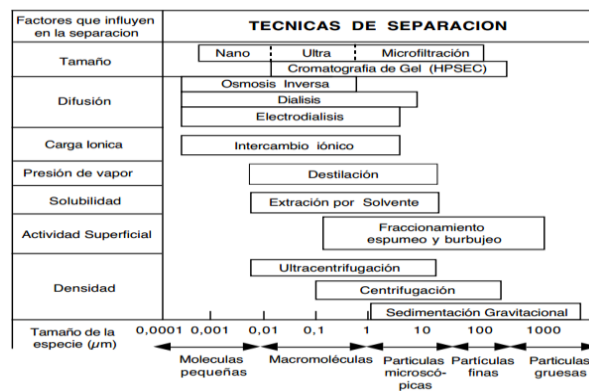


Fig 2. Diagrama de un elemento de membrana de OI de fina fibra hueca. Fuente: [9]

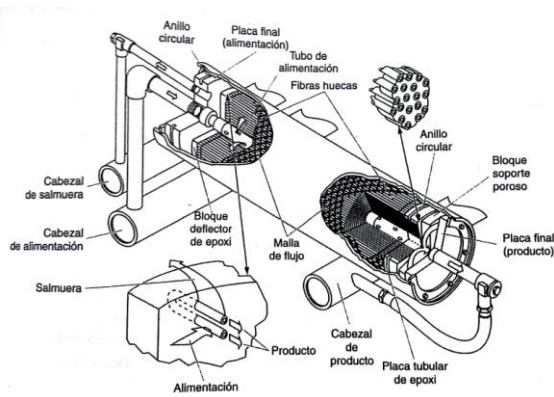


Fig 3. Clasificación de las técnicas de separación con base en el tamaño de las especies a filtrar y a factores operacionales. Fuente: [12]

7) **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.

8) **Recuperación de las aguas residuales:** Se han anulado un gran número de aplicaciones para recuperación de aguas residuales. Éstas, normalmente pertenecen 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 [9].

C. Planta piloto

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.

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

1. Se instalaron los tanques de almacenamiento para el agua residual.
2. Se instalaron 2 bombas centrífugas utilizadas en el sistema de tratamiento de aguas residuales de la planta piloto.
3. Se instalaron los filtros utilizados en el proceso de investigación en la base de 160 X 60 cm.
4. 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.
5. 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 remoción de bacterias y cambio de color.

Como resultado final, se obtuvo 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 que 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 4 se presenta el producto final de este procedimiento.



Fig 4. Planta piloto de membranas de filtración (nuevos cartuchos).

D. Fases de investigación

Se analizaron cuatro tipos de Plantas de Tratamientos de Aguas Residuales de Colombia: Laguna de oxidación de Chía, laguna de oxidación de Madrid I, laguna de oxidación Madrid II y PTAR Echavarría. Para esto se implementó un solo sistema de membranas con diferentes tipos de aguas para conocer el tiempo de retención más adecuado y la eficiencia de estas. Se analizó el comportamiento de un mismo sistema de filtrado con un mismo tipo de agua residual en muestras de diferentes días, conociendo ya el tiempo de retención que debe permanecer el agua en la planta piloto. Se desarrollaron las siguientes fases de investigación:

- 1) **Fase 1.** Determinación de las características físicas, químicas y biológicas de las muestras de las aguas residuales obtenidas a través de ensayos de laboratorio.
- 2) **Fase 2.** Aplicación del sistema de tratamiento terciario de los cuatro tipos de aguas residuales a través de la planta piloto de membranas de filtración.
- 3) **Fase 3.** Comparación de los parámetros de la calidad del agua para el vertimiento de las aguas residuales desde lo establecido por la normativa colombiana.

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.

III. RESULTADOS

A. Laguna de Oxidación de Chía

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 (microfiltración), con el propósito de analizar la eficiencia y el comportamiento de estas membranas de filtración.

Para este ensayo de laboratorio se aplicó un tiempo de retención hidráulico de 12 minutos para procesar 50L de agua residual captada de la laguna correspondiente, de acuerdo con la entidad encargada de esta laguna, este proceso cumple como un tratamiento secundario, lo cual permitió que las membranas se utilizaran con un sistema terciario o de

pulimiento, cumpliendo con las condiciones de aplicación de esta técnica.

A continuación se ilustra en la tabla I el comportamiento que se obtuvo al procesar el agua de las lagunas de oxidación del municipio de Chía.

TABLA I

PARÁMETROS DE AGUAS RESIDUALES OBTENIDOS EN EL PROCESO DE FILTRACIÓN DE MEMBRANAS COMO UN SISTEMA TRATAMIENTO TERCIARIO EN LAGUNAS DE OXIDACIÓN DE CHÍA

Características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales		
Parámetros (unidad)	Entrada	Salida
Coliformes totales (NMP/100ml)	9,10E+06	1
Color (UPC)	17	9
Conductividad eléctrica (µS/cm a 25°C)	850	878
DBO (mg/l O2)	206	155
DQO (mg/l O2)	290	310
Sólidos disueltos totales (mg/l)	518	490
turbiedad (UNT)	42,8	30
pH*	7,2	7,8
Olor (Descripción)**	50	25
Temperatura (°C)*	19	19

Los resultados obtenidos en la laguna de oxidación del municipio de Chía, arrojaron aumentos en el parámetro de la Demanda Química de Oxígeno, las razones probables del aumento de éste puede ser: en primer lugar, que las membranas pudieran haber soltado una parte de su materia provocando el aumento del parámetro; en segundo lugar, es la reacción del agua en el proceso de filtración de algunos compuestos como son nitritos, nitratos, carbón, fosforo, entre otros. Los coliformes se removieron en su totalidad, sin embargo esto fue provocado por aplicación de una sustancia lo cual provoco la desinfección, logrando la remoción de éstos.

B. 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 buscó observar el comportamiento de las membranas a través de diferentes fuentes receptoras. Se analizaron los mismos parámetros empleados en Chía con las mismas condiciones. La única diferencia de este ensayo frente al anterior fue el tiempo de retención el cual es de 5 minutos y el volumen de agua residual captada es de 40L. En la tabla II se observa los resultados obtenidos de las muestras de laboratorios.

A través de los ensayos de laboratorio realizados en la muestra de la laguna de oxidación de Madrid 1, se notó un aumento en casi la totalidad de sus parámetros. Esto es ocasionado por la

** 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.

sobrecarga que presentaba las membranas previamente utilizada para la muestra del municipio de Chía, a su vez, el tiempo empleado para esta prueba fue demasiado corto, lo cual no permitió que las partículas en el agua logran disminuir su porcentaje de concentración y que algunos compuestos no logran ser retenidos por el filtro.

TABLA II

PARÁMETROS DE AGUAS RESIDUALES OBTENIDOS EN EL PROCESO DE FILTRACIÓN DE MEMBRANAS COMO UN SISTEMA TRATAMIENTO TERCIARIO EN LAGUNAS DE OXIDACIÓN DE MADRID 1

Características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales		
Parámetros (unidad)*	Entrada	Salida
Coliformes totales (NMP/100ml)	1,68E+07	1,98E+07
Color (UPC)	6	17
Conductividad eléctrica (µS/cm a 25°C)	1012	973
DBO (mg/l O2)	232	349
DQO (mg/l O2)	339	442
Sólidos disueltos totales (mg/l)	598	546
Turbiedad (UNT)	73,5	52,9
pH	8,2	7,8
Olor (Descripción)**	25	0
Temperatura (°C)	22	22

C. Laguna de Oxidación de 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 que 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 en la tabla III, los resultados obtenidos en la laguna de oxidación de Madrid 2. El tiempo de retención hidráulico aplicado en este proceso es de 25 minutos. En los tres ensayos se variaron los tiempos de retención, con el propósito de determinar el tiempo de retención más adecuado para el próximo proceso con un solo tipo de agua residual empleando el mismo sistema de membranas.

En la laguna de oxidación del municipio de Madrid # 2, se observó un notorio cambio en la reducción de los parámetros, frente a los obtenidos en Madrid 1, puesto que en los ensayos se emplearon mayores tiempos de retención para el proceso de filtración del agua, lo cual permitió que las membranas trabajaran de manera más adecuada, ocasionando la disminución de los parámetros analizados en esta pruebas, sin

* 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.

embargo los coliformes aumentaron notablemente por causa de la acumulación de materia orgánica, sólidos y de mas compuestos que presentaban las aguas residuales analizadas provocando el aumento de esta parámetro de gran importancia por remover.

TABLA III

PARÁMETROS DE AGUAS RESIDUALES OBTENIDOS EN EL PROCESO DE FILTRACIÓN DE MEMBRANAS COMO UN SISTEMA TRATAMIENTO TERCARIO EN LAGUNAS DE OXIDACIÓN DE MADRID 2

Características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales		
Parámetros (unidad)*	Entrada	Salida
Coliformes totales (NMP/100ml)	1,00E+08	1,20E+08
Color (UPC)	7	18
Conductividad eléctrica (µS/cm a 25°C)	1675	1226
DBO (mg/l O2)	394	301
DQO (mg/l O2)	486	358
Sólidos disueltos totales (mg/l)	986	734
Turbiedad (UNT)	373	99,8
pH	7,6	7,8
Olor (Descripción)**	75	25
Temperatura (°C)	19	21

Al realizar los ensayos de laboratorio se determinó que el mejor tiempo de retención hidráulico para los ensayos de laboratorio siguientes, se encuentra entre los rangos de 15 minutos y 25 minutos para un volumen de alimentación entre los 35L y 60L de muestra, de esta manera se buscó comprobar la eficiencia de la membranas seleccionadas, aplacándolas a un mismo sistema de aguas residuales.

D. Planta de tratamiento de aguas residuales Echavarría.

A través de ensayos de laboratorios, se realizaron tres pruebas en tres diferentes días tomando como fuente de captación la planta de tratamiento de aguas residuales Echavarría. El fin de este proceso fue medir la remoción de los parámetros físicos, químicos y biológicos escogidos en la investigación para su correspondiente análisis. A su vez, se midieron los parámetros hidráulicos de la investigación, con el fin, de conocer el comportamiento hidráulico que presentan estas membranas, siendo aplicado con tratamiento terciario o un pulimiento al agua residual. A continuación se presenta la tabla IV, que ilustra los resultados obtenidos después de haber procesado las aguas residuales por la planta piloto de aguas residuales.

* 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; PERMISSIBLE: 25; MOLESTO: 50; OFENSIVOS: 75; INSOPORTABLE: 100.

1) Parámetros físicos, químicos y biológicos del primer día.

De los resultados obtenidos en el primer día de ensayos con la planta piloto de aguas residuales, en encontró un comportamiento bueno de los sólidos analizados, sin embargo el parámetro de coliformes, no logró una remoción adecuada de esta característica biológica, por este motivo no se logró cumplir con el pulimiento adecuado de aguas residuales.

TABLA IV

PARÁMETROS DE AGUAS RESIDUALES OBTENIDOS EN EL PROCESO DE FILTRACIÓN DE MEMBRANAS COMO SISTEMA TRATAMIENTO TERCARIO 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
DBO	mg/L	39	137
DQO	mg/L	475	226
olor	Descriptivo	50	0
pH	Unidades	7,47	4,51
Sólidos sedimentables	mg/L	1,8	<0,1
Sólidos suspendidos totales	mL/L	60	27
Temperatura	°C	20	23

2) Parámetros físicos, químicos y biológicos del segundo día

Después del primer día de ensayos, se aplicó con el mismo tipo de agua residual, el análisis de los parámetros, con el fin de conocer el comportamiento que pueden presentar las membranas después de haber sido sometidas a una primera prueba con aguas residuales. Los resultados obtenidos en el segundo día se ilustran en la tabla V.

De los resultados obtenidos en el segundo día, se observó un comportamiento muy bueno de los sólidos suspendidos y sedimentables, los cuales presentaron porcentajes de remoción de más del 90%, a su vez los coliformes presentaron un porcentaje alto, logrando de esta manera un porcentaje de remoción mayor del 70% frente al producto tomado de la planta de tratamiento.

Al igual se presentaron porcentajes muy bajos de remoción de los parámetros químicos, pero este proceso de remoción consta de la planta de tratamiento Echavarría y no de las membranas de filtración empleadas para los ensayos de laboratorio.

** Parámetros analizados en el Laboratorio CIAN LTDA: color, conductividad, DBO, DQO, pH, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos, coliformes totales

TABLA V
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	mg/L	25	<0,1
Sólidos suspendidos totales	mL/L	212	<20
Temperatura	°C	20	24

3) Parámetros físicos, químicos y biológicos del tercer día

De los resultados obtenidos al tercer día de pruebas de laboratorio, se mantuvieron los porcentajes en los parámetros de sólidos suspendidos y sólidos disueltos, en coliformes se presentaron porcentajes por arriba de 70%. Se presentó un aumento en los parámetros de la DBO y DQO, lo cual indica una falta de oxígeno disuelto en el proceso anaeróbico de membranas para lograr estabilizar la DBO y de esta forma lograr la disminución de este parámetro. No obstante, como se mencionó anteriormente, este tipo de microfiltración no se evalúa para la remoción de materia orgánica presente en las aguas residuales, puesto que esa remoción corresponde a los procesos biológicos de las plantas de tratamiento de este tipo de aguas residuales.

TABLA VI.
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	mg/L	4	0,3
Sólidos suspendidos totales	mL/L	176	29
Temperatura	°C	19	22

* Parámetros analizados en el Laboratorio CIAN LTDA: color, conductividad, DBO, DQO, pH, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos, coliformes totales

*Parámetros analizados en el Laboratorio CIAN LTDA: color, conductividad, DBO, DQO, pH, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos, coliformes totales

Como se presentó en las tablas de los parámetros hidráulicos se mantuvo procesos similares en cada una de estas membranas, puesto que se utilizaron tiempos de retención hidráulicos similares en las tres pruebas realizadas. Lo que indica una similitud en los parámetros de la carga hidráulica presente en los ensayos con la planta piloto.

Esta planta piloto construida para el proceso de investigación proporcionó el procesamiento del agua residual obtenido como resultado un agua de similares características como se presenta en la figura 5. A su vez se presenta el comportamiento que obtuvieron las membranas después de terminar cada uno los ensayos de laboratorio, del cual se desmostaron grandes cambios, del estado inicial en el cual se encontraba. En la figura 6 se ilustra las membranas empleadas para los análisis de la Planta Tratamiento de Aguas Residuales Echavarría.

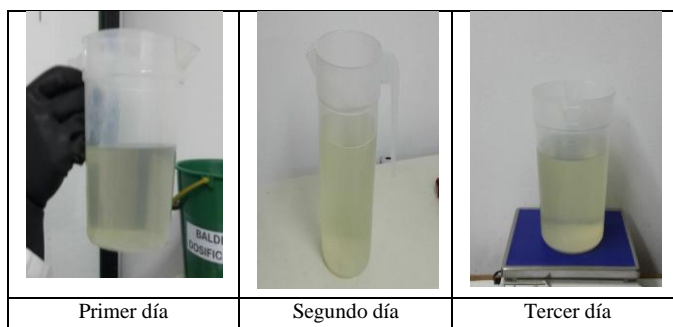


Fig 5. Agua residual tomada a la salida de la planta piloto



Fig 6. Membranas de microfiltración a culminación de cada uno de los ensayos realizados.

4) Comparación de los parámetros de la calidad del agua para el vertimiento de las aguas residuales desde lo establecido por la 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 bajo lo especificado en la norma nacional específicamente la resolución 0631 de 2015 [13], con el cual se analizaron solo 3 parámetros, entre estos se encuentran los sólidos sedimentables y los sólidos suspendidos en las aguas residuales. Se desarrolló una matriz (tabla VII) en la cual se describe si cumple.

IV. CONCLUSIONES

TABLA VII
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

5) Eficiencia del sistema tratamiento empleado para la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

En la tabla VIII 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.

Aunque se presentaron porcentajes por arriba del 70%, de acuerdo con los criterios de la normativa analizada los coliformes no cumple, lo cual no permite que esta agua se pueda reutilizar, indicando que este tratamiento no es efectivo para los sistemas de tratamiento de aguas residuales en Colombia.

TABLA VIII
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%

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, permitiendo cumplir con el decreto 1594 del 1984 [14] y la resolución 0631 del 2015 de manera satisfactoria frente a los dos primeros parámetros mencionados; sin embargo 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 permiten conocer este tipo de reutilización tanto para uso agrícola como para el uso recreativo y en debido caso al consumo doméstico, lo cual 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 cumple como un sistema de tratamiento terciario en los municipios analizados a través de este estudio.

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 cumpla con la normativa colombiana 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 cumpliendo con la normativa nacional vigente. Sin embargo, el objetivo principal de un tratamiento terciario es obtener aguas para procesos de reutilización, pero el hecho que las membranas retengan sólidos no quiere decir que el agua se pueda reutilizar.

V. RECOMENDACIONES

Emplear el sistema de microfiltración como un sistema de pre-tratamiento de filtración, ejecutando un medio filtrante de ultrafiltración para la remoción más efectiva de los coliformes presentes en el agua.

Realizar este tipo de aplicación con varios municipios colombianos, medir cada uno de los factores y determinar que 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.

Aplicar esta investigación en una PTAR real en la cual se compruebe el comportamiento y la eficiencia de las membranas durante 24 horas, con el fin de conocer cuál de los

cuatro tipos de membranas indicadas en el estudio es más adecuado para los municipios colombianos.

REFERENCIAS

- [1] RCNRadio, «RCN Radio,» 27 noviembre 2012. [En línea]. Available: <http://www.rcnradio.com/noticias/el-70-de-aguas-residuales-de-colombia-no-se-trata-y-se-usa-para-cultivos-35263>. [Último acceso: 10 mayo 2015].
- [2] Á. Orozco Jaramillo y Á. Salazar Arias, Tratamiento biológico de aguas residuales, Medellín: Universidad de Antioquia, 1987.
- [3] J. A. Romero Rojas, Tratamiento de aguas residuales: Teoría y principios de diseño, Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 1999.
- [4] UNAD, «Lección 2. Características de las aguas residuales,» Universidad Abierta y a Distancia, [En línea]. Available: http://datateca.unad.edu.co/contenidos/301332/contLinea/leccin_2_caractersticas_de_las_aguas_residuales.html.
- [5] Metcalf y Eddy, Wastewater engineering treatment and reuse. International, New York: McGRAW- HILL, 2003.
- [6] R. Crites, Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones, Bogotá: McGraw Hill, 2000.
- [7] E. M. Carrillo Zapata y A. M. Lozano Caicedo, «Validación de detección de coliformes totales y fecales en agua potable utilizando Agar Chromocult,» Pontificia Universidad Javeriana, 2008, 2008.
- [8] J. A. Romero Rojas, Acuitratamiento por lagunas de estabilización, Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 1998.
- [9] J. Mallwialle, P. Odendaal y M. Wiesner, Tratamiento de agua por procesos de membrana principales, procesos y aplicaciones, Madrid: McGraw - Hill, 1998.
- [10] Metcalf y Eddy, Wastewater engineering treatment and resource recovery, New York: McGraw - Hill, 2014.
- [11] American Water Works Association, Calidad y tratamiento de agua: Manual de suministro de agua comunitaria, Madrid: McGraw- Hill, 2002.
- [12] C. Guizard, «Técnicas membranarias de filtración de líquidos,» Universidad de Los Andes, Mérida, 1999.
- [13] Resolución 0631 de 2015 sobre los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público, 2015.
- [14] Decreto 1594. Cuando a usos del agua y residuos líquidos, 1984.
- [15] UNAD, «datateca,» Unad. [En línea].