

Revisión de opciones tecnológicas de filtración por membrana para el tratamiento de aguas grises claras con fines de reúso residencial.

María José González Arias y Silvia Fernanda Quintero Santana

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniera Civil

Director

Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

PhD. Ingeniería sanitaria y ambiental

Codirectora

Daniela Cristina Rey Romero

MSc. Planificación y desarrollo de recursos hidráulicos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

Agradezco principalmente a Dios.

A mis padres Marleny y Germán David, por todo el esfuerzo, la confianza, el amor y el apoyo que me han brindado.

A mi nono Roque Mario, por aconsejarme y apoyarme para alcanzar este gran sueño.

A mis tías Nelly y Laura por su generosidad y comprensión.

A toda mi familia, por ayudarme y acompañarme en este proceso.

A mis amigos y compañeros por su apoyo incondicional.

A todos los que hicieron parte de mi formación académica, muchas gracias.

María José González Arias

Quiero dar especial agradecimiento a mis padres, por su esfuerzo y constancia en brindarme oportunidades de crecer y lograr mis metas.

A todos los profesores que me transmitieron un poco de su conocimiento en el área de la ingeniería.

A la Universidad Industrial de Santander por acogerme durante mi proceso académico.

Por último, gracias a mi compañera por todo el empeño puesto en la realización de este proyecto.

Silvia Fernanda Quintero Santana

Contenido

Introducción	10
1. Marco de referencia.....	13
1.1 Aguas grises	13
1.1.1 Características de las aguas grises	14
1.2 Sistemas de tratamiento de las aguas grises	15
1.2.1 Tecnologías de filtración por membranas	16
1.3 Normativa para reúso de AG	17
2. Metodología	20
2.1 Revisión de literatura	20
2.1.1 Búsqueda bibliográfica	20
2.1.2 Extracción y gestión de los datos	22
2.1.3 Análisis de datos	23
2.1.4 Selección de tecnología de membrana como tratamiento de filtración de AG	23
2.1.5 Selección del tren de tratamiento	25
2.1.6 Definición de las condiciones para la puesta en marcha y operación del sistema de tratamiento	26
3. Resultados y discusión	26
3.1 Evolución y estado actual de las investigaciones.....	26
3.2 Factores técnicos y económicos de tecnología de filtración por membrana.....	28

3.2.1 Características de las aguas grises	28
3.2.1 Sistemas de tratamiento	34
3.2.2.1 Tecnologías de membrana	34
3.2.2.2 Tecnologías acopladas	42
3.2.2 Trenes de tratamiento	44
3.2.4 Condiciones técnicas.....	46
3.2.4.1 Usos generales.....	46
3.2.4.2 Mantenimiento	47
3.2.5 Costos.....	49
3.3 Propuesta de tren de tratamiento óptimo.....	50
3.3.3 Condiciones para puesta en marcha, operación y mantenimiento	54
4. Conclusiones	55
Referencias bibliográficas.....	57
Apéndices.....	68

Lista de Tablas

Tabla 1. Normativa internacional para reúso de AG.....	19
Tabla 2. Criterios de selección de las tecnologías de membrana	24
Tabla 3. Características de AG de acuerdo con fuente doméstica	32
Tabla 4 Porcentajes promedio de eficiencia en remoción de contaminantes.....	34
Tabla 5. Sistemas de tratamiento estudiados de la revisión de literatura.....	45
Tabla 6. Costo de membranas	50
Tabla 7. Calificación de tecnología de membrana	51

Lista de Figuras

Figura 1. Esquema del proceso de selección de documentos.	22
Figura 2. Esquema del tren de tratamiento propuesto.....	26
Figura 3. Evolución y estado actual de las investigaciones.	27
Figura 4. Porcentaje de artículos por continente.....	28
Figura 5. Fuentes de agua gris provenientes de 40 investigaciones.	30
Figura 6. Distribución porcentual de estudios por tipo de membrana	35
Figura 7. Membrana de microfiltración	37
Figura 8. Membrana de ultrafiltración	38
Figura 9. Membrana de nanofiltración.....	39
Figura 10. Membrana de ósmosis inversa.....	40
Figura 11 Biorreactor de membrana	42
Figura 12. Frecuencia del uso de agua gris tratada en 40 investigaciones	47
Figura 13. Primer tren de tratamiento propuesto	52
Figura 14. Segundo tren de tratamiento propuesto	52
Figura 15. Esquema primer tren de tratamiento propuesto.....	53
Figura 16. Esquema segundo tren de tratamiento propuesto	54

Lista de Apéndices

Apéndice A. Mapa general de revisión sistemática de literatura	68
Apéndice B. Artículos seleccionados en la revisión de literatura.	69
Apéndice C. Aspectos económicos y de mantenimiento de acuerdo con la tecnología de membrana estudiada.....	76
Apéndice D. Fuente de AG, escalado, tipo de flujo y trenes de tratamiento encontrados en la revisión de literatura.	88
Apéndice E. Fórmulas para fabricación de AG sintéticas.....	102
Apéndice F. Dimensionamiento del primer tren de tratamiento a escala de laboratorio	104
Apéndice G. Dimensionamiento del segundo tren de tratamiento a escala de laboratorio ..	106

Resumen

Título: Revisión de opciones tecnológicas de filtración por membrana para el tratamiento de aguas grises claras con fines de reúso residencial*

Autoras: María José González Arias y Silvia Fernanda Quintero Santana **

Palabras clave: Tecnología de membrana, Tratamiento de aguas grises, Filtración, Residencial, Reúso.

Descripción:

La tecnología de la filtración por membrana presenta un alto potencial para reemplazar o complementar el proceso de filtración tradicional implementado en un sistema de tratamiento de aguas grises, debido a la alta calidad fisicoquímica y microbiológica obtenida. Este estudio analiza la aplicabilidad de las tecnologías de membrana como etapa de filtración para un sistema de tratamiento de aguas grises a nivel residencial; para ello se parte de una revisión de literatura que permitió identificar las tecnologías de membrana más implementadas a nivel mundial. Posterior a esta revisión, se seleccionó la membrana de ultrafiltración como la tecnología con mayor potencial para tratamiento de aguas grises claras, considerando los factores técnicos y económicos encontrados en la literatura y las referencias proporcionadas por fabricantes. Como resultado se proponen dos trenes de tratamiento, el primer tren compuesto por una etapa de prefiltración con material de fieltro o poliéster prensado, seguido por una membrana de ultrafiltración y un sistema de cloración; el segundo tren compuesto por un tanque sedimentador, una membrana de ultrafiltración y un sistema de cloración. Finalmente, se presenta un protocolo junto con unas recomendaciones para la puesta en marcha, operación, mantenimiento y monitoreo de los dos prototipos para una escala de laboratorio.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña PhD. Ingeniería sanitaria y ambiental- Codirectora: Daniela Cristina Rey Romero MSc. Planificación y desarrollo de recursos hidráulicos.

Abstract

Title: Review of membrane filtration technology options for light greywater treatment for residential reuse purposes*

Authors: María José González Arias y Silvia Fernanda Quintero Santana **

Keywords: Membrane technology, Greywater treatment, Filtration, Residential, Reuse.

Description:

Membrane filtration technology has a high potential to replace or complement the traditional filtration process implemented in a greywater treatment system, due to the high physicochemical and microbiological quality obtained. This study analyses the applicability of membrane technologies as a filtration stage for a residential greywater treatment system; this is a part of a literature review that allowed to identify the most implemented membrane technologies worldwide. After this review, the ultrafiltration membrane was selected as the technology with the greatest potential for light greywater treatment, considering the technical and economic factors found in the literature and references provided by manufacturers. As a result, two treatment trains are proposed, the first train composed of a prefiltration stage with a material of felt or pressed polyester, followed by an ultrafiltration membrane and a chlorination system; the second train composed of a sediment tank, an ultrafiltration membrane and a chlorination system. Finally, a protocol is presented along with some recommendations for the commissioning, operation, maintenance and monitoring of the two prototypes for a lab scale.

* Degree Work

** Physic mechanical engineering Faculty. School of Civil Engineering. Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña PhD. Ingeniería sanitaria y ambiental- Codirectora: Daniela Cristina Rey Romero MSc. Planificación y desarrollo de recursos hidráulicos.

Introducción

La escasez de agua afecta a más del 40% de la población mundial, esto debido al desaprovechamiento del recurso hídrico, la explosión demográfica y contaminación del agua (FAO Organizaci, 2013). El último informe sobre el desarrollo de los recursos hídricos presenta las consecuencias del cambio climático y cómo afecta la consecución del sexto Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) (UNESCO, 2020). Por esto, el 80% de los países del mundo han buscado alternativas de abastecimiento de agua que se caractericen por tener un enfoque viable y sostenible de las técnicas de conservación del agua. Entre estas alternativas destaca la implementación de sistemas descentralizados de tratamiento para el reúso de aguas grises (AG) (Al-Ghazawi et al., 2018). En esa dirección, países como Estados Unidos y Australia han emitido reglamentos y normas para el tratamiento y posterior reutilización de AG, estableciendo los requisitos técnicos para una gestión sostenible (Mara & Kramer, 2008).

En los últimos 100 años varios países se han interesado en buscar nuevas tecnologías o mejorar las ya existentes, para la producción de agua reutilizada de alta calidad con fines de riego y actividades domésticas que no requieran uso de agua potable (Amerasinghe et al., 2013). Entre los posibles reúsos a nivel domiciliario se destacan: descarga de inodoro, lavado de pisos, jardinería, lavado de autos y lavandería (Vuppaladadiyam et al., 2019). No obstante, existen varias limitaciones para aplicar estos sistemas de tratamiento, como la disponibilidad de espacio, el costo de operación y mantenimiento, la complejidad de operación, la efectividad y calidad requerida (Sathe & Munavalli, 2019), por lo cual es indispensable identificar y analizar las tecnologías más adecuadas según el contexto social, económico y cultural del lugar donde se desee implementar.

Las AG se caracterizan por contener grandes cantidades de químicos, nutrientes y minerales; según esta caracterización se seleccionan los trenes de tratamiento óptimos para la remoción de contaminantes. Estos trenes pueden combinar tecnologías físicas, químicas y biológicas (Ghaitidak & Yadav, 2013). Dependiendo de la fuente de suministro de AG, estilo de vida de los habitantes del hogar, nivel de ocupación y uso de productos químicos varía el nivel de contaminantes presente en el efluente (Sabino De Gisi et al., 2016).

La reutilización de agua gris tratada permite usar de forma eficiente el recurso hídrico. La implementación de trenes de tratamiento es una solución novedosa para combatir la escasez del agua y disminuir impacto ambiental debido a la contaminación de vías fluviales con aguas residuales no tratadas. Esta implementación en las viviendas no solo resulta ventajosa a nivel ambiental, sino que es factible a nivel económico, dando cierta rentabilidad a las comunidades (Yoonus et al., 2020). Se estima que el reúso de AG permite ahorrar entre el 50 y 80% del consumo total de agua (Vuppaladadiyam et al., 2019).

Teniendo en cuenta el desarrollo de tecnologías como la filtración con membranas, diversas investigaciones han evaluado estas tecnologías para el tratamiento de AG; entre estas experiencias se destaca la revisión de 12 casos de estudio de tecnologías para tratamiento de AG en residencias (Sabino De Gisi et al., 2016) y el estudio de tecnologías de membrana para reúso en descarga de sanitario (Hills et al., 2001; Kumar Khuntia et al., 2019; Ren et al., 2020). Estas investigaciones muestran la importancia de realizar estudios a diferentes escalas para la evaluación de dichas tecnologías. Por ello, es fundamental identificar su potencial en el contexto de países en desarrollo como Colombia. Para tal efecto, se analizarán las experiencias documentadas de su aplicación en otros contextos y plantearán las condiciones para su experimentación en el contexto de la Universidad Industrial de Santander (UIS).

En Colombia, estos sistemas adquieren gran relevancia de carácter investigativo, sin embargo, aún es notoria la carencia de información. Al respecto, en el Área Metropolitana de Bucaramanga se han realizado estudios sobre la factibilidad técnica, social y económica de implementar sistemas de tratamiento y reutilización de aguas grises (Mendoza & Rincón, 2016; Zaraza & Rivera, 2015); adicionalmente, se realizó una investigación que permitió identificar las características fisicoquímicas y microbiológicas de las aguas grises (Avellaneda & Salcedo, 2019). Posteriormente, se analizó la producción de AG claras para proponer opciones tecnológicas de tratamiento de aguas grises (Álvarez & Bonilla, 2020); estas investigaciones se realizaron en el Grupo de Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH).

Dichos estudios han mostrado la pertinencia de seleccionar las tecnologías para tratamiento de aguas grises más convenientes de acuerdo con la calidad del efluente requerido. Por lo tanto, este trabajo tiene como objetivo analizar la aplicabilidad de las tecnologías de filtración por membrana y otras tecnologías complementarias para el tratamiento de aguas grises claras a nivel residencial, partiendo de una revisión de literatura para determinar los factores económicos y técnicos de las tecnologías estudiadas. Con base en estos resultados, se definirán las condiciones requeridas para la puesta en marcha, operación y monitoreo de los sistemas de tratamiento propuestos en este estudio.

1. Marco de referencia

1.1 Aguas grises

Las aguas residuales que resultan de las actividades diarias domésticas, exceptuando las provenientes del inodoro, se denominan aguas grises (AG) (B Jefferson et al., 2000) (Oteng-Peprah et al., 2018) y sus contaminantes corresponden a: grasas corporales, productos químicos, materia orgánica, un bajo contenido de materia fecal, entre otras partículas y microorganismos (Edwin et al., 2014). Se estima que las AG representan el 75% del volumen total de aguas residuales generadas en las viviendas (Ghaitidak & Yadav, 2013) y alrededor del 69% del agua consumida a nivel residencial (Oteng-Peprah et al., 2018). Desde la década de 1960 se considera fuente potencial de reutilización debido a su gran magnitud y disponibilidad (Edwin et al., 2014) (Oteng-Peprah et al., 2018).

Si las fuentes son duchas, bañeras y lavadoras, el agua residual recibe por nombre agua gris clara (AGC) (Ghaitidak & Yadav, 2013). El efluente derivado de lavavajillas, fregaderos de cocina y los desechos más contaminados de lavandería, es denominado agua gris oscura (Birks & Hills, 2007). Las investigaciones sobre tecnologías para tratamiento de aguas residuales, tienen especial interés en la recolección y reutilización de aguas grises claras debido a su bajo contenido de carga contaminante y a su alta disponibilidad (B Jefferson et al., 2000).

Es importante conocer que las aguas provenientes de la ducha son las menos contaminadas (B Jefferson et al., 2000), mientras que, datos previamente recolectados, indican que las aguas grises de la cocina son las más contaminadas (Delhiraja & Philip, 2020).

1.1.1 Características de las aguas grises

La composición del agua gris está estrechamente relacionada con el comportamiento del usuario, los productos de limpieza empleados en las tareas diarias, la calidad del suministro de agua potable y el equipamiento del hogar (Sievers & Londong, 2017). A su vez, la ocupación del hogar, el clima de la zona, los productos químicos utilizados para las tareas del hogar y el género y la edad de los habitantes, son factores que intervienen directamente en la caracterización del AG (Edwin et al., 2014) (Eriksson et al., 2002).

Usualmente las AG contienen altas concentraciones de material orgánico biodegradable, como grasas y aceites de cocina, compuestos xenobióticos y otros residuos de jabón y detergentes (Edwin et al., 2014), en ocasiones presentan compuestos microbiológicos como coliformes fecales y salmonella (Oteng-Peprah et al., 2018).

Para caracterizar el AG se consideran principalmente 3 factores: (i) Factores físicos asociados a la composición de AG incluyen, entre otros, temperatura, sólidos en suspensión, conductividad eléctrica y turbidez (Oteng-Peprah et al., 2018); (ii) Factores químicos presentes en las AG provienen de los productos utilizados para la limpieza, la cocina y el aseo personal, entre los que se destacan Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), Demanda Química de Oxígeno (DQO), pH y Carbono Orgánico Total (COT) (B Jefferson et al., 2000) (Oteng-Peprah et al., 2018); (iii) Factores biológicos, ya que las AG contienen microorganismos producto del contacto corporal (Oteng-Peprah et al., 2018). Además la incorrecta manipulación de alimentos genera bacterias patógenas entéricas como *Salmonella* y *Campylobacter* (Ottoson & Stenström, 2003) (Maimon et al., 2014); también es usual hallar rastros de materia fecal, razón por la que se detecta presencia de *Escherichia coli* y virus entéricos (O'Toole et al., 2012).

Para realizar adecuadamente un proceso de tratamiento de AG es importante definir los criterios que se van a monitorear y evaluar, esto con el propósito de determinar el potencial de reúso del agua tratada y los fines a los que se podría destinar. Las investigaciones sobre reutilización de AG tienden a establecer los mismos parámetros de calidad, DBO₅, DQO, temperatura, turbidez, pH, sólidos suspendidos totales (SST), nitrógeno total (NT), fósforo (PT) y coliformes totales, entre otros (Sievers & Londong, 2017) (Delhiraja & Philip, 2020) (Kadewa et al., 2020).

1.2 Sistemas de tratamiento de las aguas grises

Existen distintos mecanismos para cada nivel del tratamiento de descontaminación de aguas grises. En el tratamiento preliminar, se realiza la separación física de los sólidos más grandes por medio de tratamientos físicos como el tamizado, desarenado y desengrasado; el tratamiento primario en el que se elimina la materia sedimentable y flotante, y parte de la DBO, esto por medio de tratamientos químicos como la coagulación, filtración, sedimentación y floculación; posteriormente, con el tratamiento secundario se elimina la materia orgánica disuelta o coloidal mediante procesos biológicos en condiciones anaerobias y/o aerobias; finalizando, se realiza el tratamiento terciario que se enfoca en la reducción final de metales pesados, DBO, contaminantes químicos específicos y la eliminación de bacterias y parásitos, esto por medio de procesos físicos, químicos y biológicos (Samayamanthula et al., 2019).

Al seleccionar el sistema de tratamiento óptimo a implementar en la reutilización de aguas grises de origen residencial, se deben considerar los siguientes factores: simplicidad en la operación, costo de inversión, operación y mantenimiento (Halalsheh et al., 2008). Otros aspectos por examinar son las fuentes de recolección de aguas grises, ya que, según las

diferentes fuentes de captación (lavamanos, ducha, lavado de ropa, lavadero y en algunos casos las provenientes del lavaplatos), varía la caracterización de aguas grises. Después de analizar y evaluar todos los aspectos que intervienen en la calidad del agua, rendimiento y posibles limitaciones se opta por el sistema más efectivo y conveniente (Halalsheh et al., 2008).

1.2.1 Tecnologías de filtración por membranas

La tecnología de membrana es un método de filtración que reemplaza y/o complementa los métodos tradicionales de separación física de partículas, toxinas, sólidos suspendidos y contaminantes, mediante el uso de barreras permeables, con poros dimensionados según la naturaleza de las partículas por eliminar (Schouppe, 2010). Algunos de los beneficios de esta tecnología son: alta calidad del filtrado, no requiere la adición de sustancias y puede diseñarse de acuerdo con las necesidades (tamaño del poro) (Mulder, 1991). Sin embargo, esta tecnología debe ser monitoreada constantemente debido a problemas de ensuciamiento de la membrana y a su vida útil corta, se estima que mínimo sea útil por 2 años, la duración puede variar dependiendo de las condiciones de operación, la frecuencia de limpieza y las características del afluente (Schouppe, 2010). Otro inconveniente de la tecnología de membranas es el alto costo de mantenimiento, ya que requiere, de acuerdo con las especificaciones del fabricante, una limpieza de forma frecuente y en algunas ocasiones manipulando productos químicos y/o filtros de retrolavado (Hourlier et al., 2010).

Las membranas deben caracterizarse para determinar su estructura y lograr así que la tecnología tenga un rendimiento adecuado, para esta caracterización se debe determinar el tamaño y la distribución de los poros, el volumen libre y la cristalinidad con la finalidad de definir las propiedades de separación. La tecnología de membrana se puede clasificar según

su naturaleza, en membranas biológicas o sintéticas, ambos tipos de membrana difieren en estructura y funcionalidad. Otra característica relevante es la morfología del material utilizado en la membrana, ya que el material incide en la permeabilidad y esta a su vez depende de factores como la temperatura y la interacción del solvente y el soluto con el material (Mulder, 1991).

1.3 Normativa para reúso de AG

El reúso de las aguas residuales crudas sin el tratamiento adecuado que elimine/reduzca partículas contaminantes como virus, compuestos químicos, materia orgánica, patógenos, entre otros y cumpla los requisitos de calidad puede causar efectos adversos en la salud humana y medio ambiente (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, n.d.).

De acuerdo con la Resolución 1207 del 2014 (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, n.d.) la normativa se fundamenta en lo siguiente:

- Principio de precaución
 - Principio de protección
 - Prevenir la transmisión de enfermedades
 - Criterios de calidad
- **Normativa nacional**

Desafortunadamente a la fecha no existe una normativa con los valores permitidos para reúso de AG en Colombia. El único decreto vigente es referente a las características físicas y químicas requeridas para agua potable (Ministerio de ambiente, n.d.).

– **Normativa internacional**

Las normas y directrices internacionales para la reutilización de AG tratadas, generalmente contienen limitaciones en términos de uso y parámetros de calidad (Daniele Cecconet et al., 2019; Ren et al., 2020) como se muestra en la Tabla 1, donde se muestran los valores estándar para reúso de aguas grises de acuerdo con su aplicación a nivel residencial.

Tabla 1

Normativa internacional para reúso de AG.

País	DBO₅ (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	pH	Turbidez (NTU)	Microorganismos (CFU 100m/L)	Cloro residual (mg/L)	Usos
USA	< 10	-	-	6-9	< 2	Coliformes fecales N.D	> 1	Descarga de sanitario
Canadá	< 20	-	< 20	-	<5	E. coli < 200	> 0.5	Descarga de sanitario
Alemania	< 5	-	-	-	-	Coliformes totales < 100	-	Agua de servicio
Japón	< 20	-	-	5.8-8.6	-	Coliformes totales < 1000	-	Descarga de sanitario
Italia	< 20	< 100	< 10	6-9	-	E. coli < 10	-	Descarga de sanitario
Corea del sur	< 10	-	-	5.8-8.5	< 2	E. coli N.D	> 0.2 mL/L	Descarga de sanitario
Israel	< 10	< 100	< 10	-	-	Coliformes totales < 1	-	Sin restricción
China	< 10	-	-	6-9	< 5	Coliformes totales < 3	>1	Descarga de sanitario
Reino Unido	<9.5	-	< 10	5-9.5	< 10	Coliformes fecales < 1000	<2	Descarga de sanitario

Adaptado de: (D. Cecconet et al., 2019; Ren et al., 2020)

2. Metodología

2.1 Revisión de literatura

2.1.1 *Búsqueda bibliográfica*

Para la revisión de literatura se realizó una búsqueda enfocada principalmente en estudios sobre el uso y manejo de la filtración por membrana y otras tecnologías de tratamiento de aguas grises claras (AGC) para un contexto residencial. Adicionalmente se recopiló información con respecto a la calidad y a los posibles usos del efluente obtenido del tren de tratamiento. Se buscaron artículos y otros documentos científicos y técnicos en las bases de datos proporcionados por la Universidad Industrial de Santander. Las plataformas empleadas fueron: Scopus, Web of Science y Springer. Se realizó la búsqueda de los artículos científicos mediante la combinación de las siguientes palabras clave previamente establecidas (Greywater OR Graywater OR “Grey water” OR “Gray water”) AND Membrane AND Filtration AND (Treatment OR technology OR technologies).

De esta búsqueda, se obtuvieron 255 artículos en total, los cuales fueron agrupados en una base de datos en el programa Excel para facilitar el proceso de filtración y selección de los artículos que proporcionen la información requerida sobre la tecnología de membrana y así descartar los documentos que no sean relevantes para esta revisión. Para el proceso de filtración se consideraron los siguientes criterios:

(i) Filtro por título: Se consideraron los documentos cuyo título tenía relación con las tecnologías de tratamiento de aguas grises, especialmente con la filtración por membrana. Se seleccionaron 104 títulos que potencialmente podían aportar a la revisión.

(ii) Filtro por resumen: A los documentos elegidos según su título, se realizó la lectura de su respectivo resumen y se filtraron los documentos cuyo resumen contenía

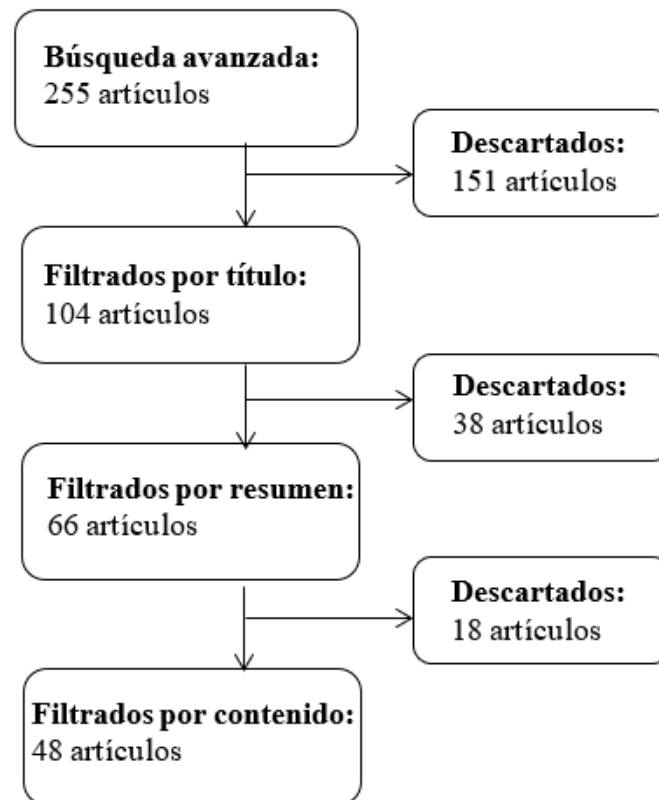
información sobre la operación o monitoreo de las tecnologías para tratamiento de aguas grises. Además, se descartaron aquellos documentos enfocados en fábricas, barcos, plantas de tratamiento y con fines agrícolas. Posterior a este filtro se identificaron 66 artículos que cumplen con este criterio.

(iii) Filtro por contenido: Por último, se revisaron los documentos que cumplían con los anteriores requisitos y se descartaron aquellos que no brindaban suficiente información sobre la tecnología descrita. Para la elección final se tuvo en cuenta las tecnologías que contaban con datos referentes a la calidad del afluente y efluente. En total se seleccionaron 48 artículos cuyo contenido aportaba a esta revisión.

Adicionalmente se revisó el año de publicación de los artículos (2001-2021), con el fin de seleccionar aquellos documentos recientes. Se utilizó el software Mendeley para gestionar las referencias de los documentos seleccionados. La Figura 1 muestra el esquema del proceso de selección y representa el número de artículos filtrados y descartados de acuerdo con el criterio analizado.

Figura 1.

Esquema del proceso de selección de documentos



2.1.2 Extracción y gestión de los datos

Utilizando la herramienta Xmind se elaboró un mapa conceptual con la información y los parámetros que se esperaba obtener de los documentos seleccionados (Apéndice A). Posteriormente se realizó la lectura de los 48 artículos seleccionados y mediante el software Excel se organizó la información de interés, de acuerdo con: (i) nombre del artículo, (ii) autores, (iii) año de publicación, (iv) país de publicación (Apéndice B). Adicionalmente se recopiló información específica de acuerdo con el tipo de membrana analizada como: (v) tipo de membrana, (vi) características de membrana, (vii) costos, (viii) mantenimiento (Apéndice C). Por último, en ítems tales como: (ix) afluente, (x) tipo de flujo, (xi) escala, (xii), tiempo de retención hidráulica (TRH), (xiii) tecnologías complementarias (Apéndice D).

2.1.3 *Análisis de datos*

De acuerdo con la información recolectada se realizó un análisis estadístico descriptivo sobre la evolución de los estudios a lo largo del tiempo, los parámetros seleccionados para evaluar la calidad del agua gris, las metodologías empleadas y los resultados reportados en cada estudio. La evolución de los estudios se analizó considerando los artículos con fecha de publicación entre los años 2001 – 2021, así como el lugar de estudio (Anexo B).

Después se describieron los factores técnicos y económicos de las principales tecnologías de membrana. Para esto, primero se determinaron las condiciones de operación de las tecnologías de membrana. Del mismo modo, se identificaron aquellas tecnologías que han sido utilizadas como complemento en los sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales. También se definieron los parámetros físicos, químicos y biológicos para monitoreo del afluente y efluente después de cada etapa del tren de tratamiento estudiado. Así como los rangos permitidos para reúso del AG. Adicionalmente se describieron las metodologías y/o técnicas implementadas para el mantenimiento de la tecnología de membrana y por último se realizaron cotizaciones de las principales tecnologías de membrana en las páginas de 4 fabricantes y se analizó el costo de cada membrana y su posible aplicabilidad en residencias.

2.1.4 *Selección de tecnología de membrana como tratamiento de filtración de AG*

Para seleccionar la tecnología de membrana más adecuada para un nivel residencial, primero se identificaron las fuentes de AG y la calidad del AG proveniente de cada instalación de agua doméstica. De acuerdo con las características típicas del AG descritas en los artículos estudiados se determinó que las fuentes domésticas que requieren menor

tratamiento y, por lo tanto, tienen mayor potencial de reúso son las provenientes de la ducha y el lavamanos. Adicionalmente se identificaron los usos finales del agua tratada presente en los documentos revisados, para esto se estimó la frecuencia de los usos del AG tratada, el cumplimiento de las normativas internacionales para reúso y de mayor facilidad y practicidad para aplicar en viviendas, por lo que se determinó un reúso para descarga de sanitario.

Posteriormente, las autoras de este documento realizaron una evaluación cualitativa y cuantitativa de la eficiencia en los siguientes aspectos: remoción de contaminantes, simplicidad en operación y mantenimiento y costos de inversión, operación y mantenimiento para las cinco tecnologías de membrana analizadas en este estudio. Por último, se asignaron valores, a los criterios de selección mostrados en la Tabla 2, para el criterio de remoción de contaminantes las tecnologías con mayor porcentaje de remoción tendrán mayor puntaje; las tecnologías que requieran menor complejidad en su uso tendrán mayor puntaje y en el aspecto económico, las tecnologías de menor costo tendrán mayor puntaje.

Tabla 2.

Criterios de selección de las tecnologías de membrana.

Criterio	Valores posibles
Eficiencia en remoción de materia orgánica (DBO ₅) *	1
	2
	3
Eficiencia en remoción de sólidos suspendidos totales (SST)*	1
	2
	3
Eficiencia en remoción de coliformes totales y E. coli *	1
	2
	3

Simplicidad en operación y mantenimiento	1
	2
	3
Costo de instalación, operación y mantenimiento	1
	2
	3

Nota: Para los valores numéricos de la eficiencia en remoción de DBO₅, SST y Coliformes totales encontrados en la revisión de literatura se utilizaron las eficiencias promedio provenientes de las investigaciones que utilizaban únicamente la tecnología de membrana como tratamiento de AGC y así evitar datos con grandes variaciones entre la literatura analizada. No obstante, en el caso de existir variaciones muy grandes en los datos, estos no se tendrían en cuenta para la evaluación de la tecnología.

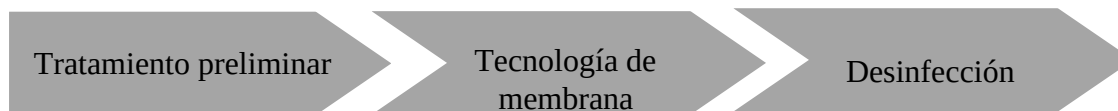
2.1.5 Selección del tren de tratamiento

Después de determinar el origen del AG, el reúso del AG tratada y la tecnología de membrana y considerando el Anexo D, donde se presentan los trenes de tratamiento descritos en cada artículo revisado, se seleccionaron las tecnologías que mejor complementan a la tecnología de membrana y se descartaron aquellos trenes de tratamiento que utilizaban tecnologías en fase de desarrollo o que contaban con muchas etapas de tratamiento, debido al alto costo y al alto nivel de complejidad en operación y mantenimiento de las tecnologías.

A partir de la información recolectada se realizó el siguiente esquema para tratamiento de AG a nivel residencial. Donde el tratamiento preliminar se caracteriza por ser un proceso de separación sólido-líquido seguido de la tecnología de membrana y un proceso de desinfección para la eliminación de agentes patógenos.

Figura 2

Esquema de tren de tratamiento propuesto



2.1.6 Definición de las condiciones para la puesta en marcha y operación del sistema de tratamiento

De acuerdo con el tamaño, la configuración y demás propiedades de la membrana seleccionada se definió el tipo de flujo, el caudal y presión mínima requerida para el correcto funcionamiento de la tecnología de membrana como indica el fabricante, además al ser un sistema de tratamiento, el caudal indicado por la membrana será el mismo al caudal de diseño. Adicionalmente se elabora un protocolo para el arranque y puesta en marcha de los dos prototipos propuestos en este estudio.

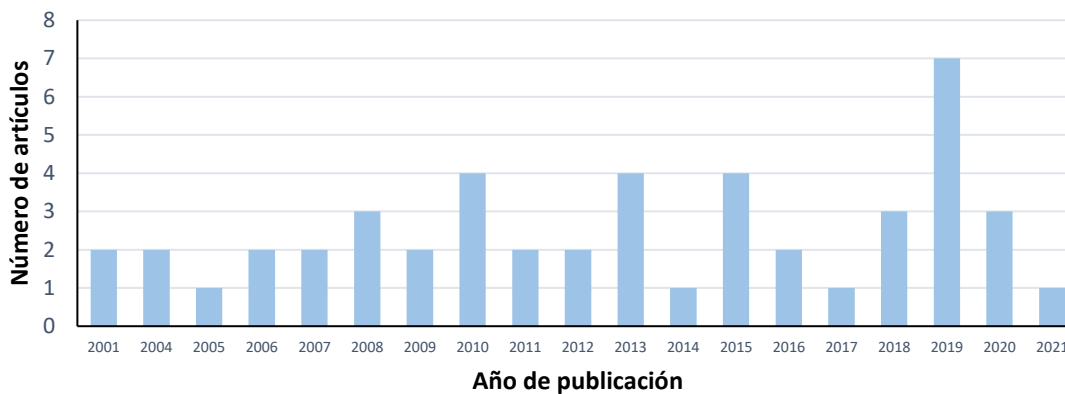
3. Resultados y discusión

3.1 Evolución y estado actual de las investigaciones

El tratamiento de AG mediante el uso de tecnologías de membrana es un tema en continuo estudio, esto debido a que la tecnología de membranas no fue considerada como un método de separación de aguas residuales sino hasta la década de 1960 (Al-Ghazawi et al., 2018), lo que se refleja en los pocos artículos publicados antes del año 2001, de la misma forma en la limitada cantidad de investigaciones realizadas entre los años 2001 y 2004. La Figura 3 muestra el aumento en la publicación de artículos en los últimos 3 años (se consideraron los artículos publicados en los primeros dos meses del año 2021), presentando el mayor número de estudios realizados en el año 2019.

Figura 3.

Evolución y estado actual de las investigaciones



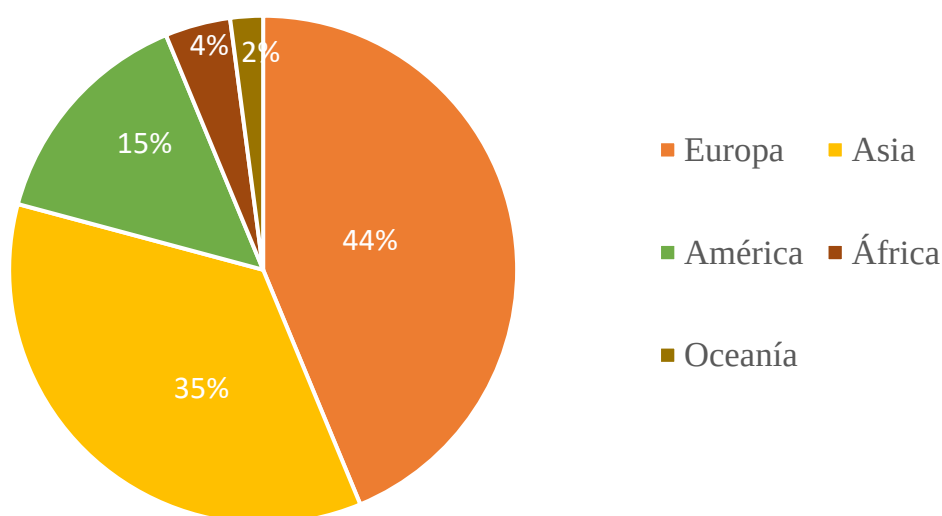
Con respecto a los países donde se han desarrollado estas investigaciones se puede destacar a Reino Unido y Alemania como los países que más artículos han desarrollado acerca del uso de tecnología de membrana (5 artículos cada país), representando el 20% de los artículos estudiados en esta revisión. Así mismo, India y Estados Unidos representan el 16% de las investigaciones analizadas (4 artículos cada uno).

Por último, en la Figura 4 se observa que el mayor número de publicaciones analizadas se realizó en países del continente europeo, representando el 44% de las investigaciones seleccionadas (21 de 48 artículos), continuando con Asia que representa el 35% (17 de 48 artículos). De acuerdo con el informe mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2021, el alto porcentaje de estudios se debe a que este continente en los últimos años ha invertido en nuevos modelos e investigaciones para el reúso de aguas residuales, debido al crecimiento demográfico y a la escasez de agua en algunas zonas. En tercer lugar, se encuentra América, aportando el 15% de los artículos (7 de 48 artículos), de los cuales América del norte realizó 6 artículos, mientras que América del sur solo aportó 1 estudio, demostrando la poca inversión en estudios sobre tecnologías de membrana para el reúso de AG. Por otra parte, el continente africano representa el 4% de las

investigaciones (2 de 48 artículos) provenientes de países de la región árabe (Egipto y Túnez) donde tienen problemas de escasez de agua y por lo tanto requieren de recursos hídricos no convencionales para mejorar la sostenibilidad y el acceso para todos (UNESCO, 2021).

Figura 4.

Porcentaje de artículos por continente



3.2 Factores técnicos y económicos de tecnología de filtración por membrana

3.2.1 Características de las aguas grises

Dependiendo del origen de las AG, éstas se pueden clasificar en 5 categorías: Ducha, lavamanos, cocina, limpieza y mixto (S De Gisi et al., 2016). Por lo tanto, la composición y cantidad variará según la ubicación geográfica, las fuentes e instalaciones de donde proviene el AG y las prácticas y hábitos de sus habitantes (Vuppaladadiyam et al., 2019). Por ejemplo, para países con baja disponibilidad de agua como Jordania se identifican tasas reducidas de producción de AG $59 \text{ L hab}^{-1} \text{ día}^{-1}$ (Halalsheh et al., 2008). En Alemania tasas de $70 \text{ L hab}^{-1} \text{ día}^{-1}$ (D. Cecconet et al., 2019), mientras que Omán produce aproximadamente $196 \text{ L hab}^{-1} \text{ día}^{-1}$ (Prathapar et al., 2005).

Otra forma de clasificar las AG es según su contenido de carga contaminante en 2 categorías: AG con alto contenido orgánico (p.ej. descarga de lavadora y cocina) o AG con bajo contenido orgánico (p.ej. baños, aseo, lavamanos). Usualmente las aguas grises de cocina se producen en volúmenes bajos y contienen cargas variables de coliformes, además de altos niveles de DQO, lo que significa que requiere un tratamiento más complejo para su reúso (Christova-Boal et al., 1996). El agua de lavandería contiene detergentes, amoníaco, gran cantidad de sólidos suspendidos y alta demanda DBO_5 (S De Gisi et al., 2016). En cambio, las AGC tienen menor concentración de DBO_5 , bajos niveles de coliformes y una gran cantidad de sólidos suspendidos y turbidez (S De Gisi et al., 2016).

Utilizar AG sintética sobre AG real para ensayar tecnologías de tratamiento tiene algunas ventajas como: (a) proporcionar la medida de nutrientes, carbono y contaminantes deseada según la formulación; (b) se puede producir grandes cantidades de AG sintética continuamente (O'Flaherty & Gray, 2013).

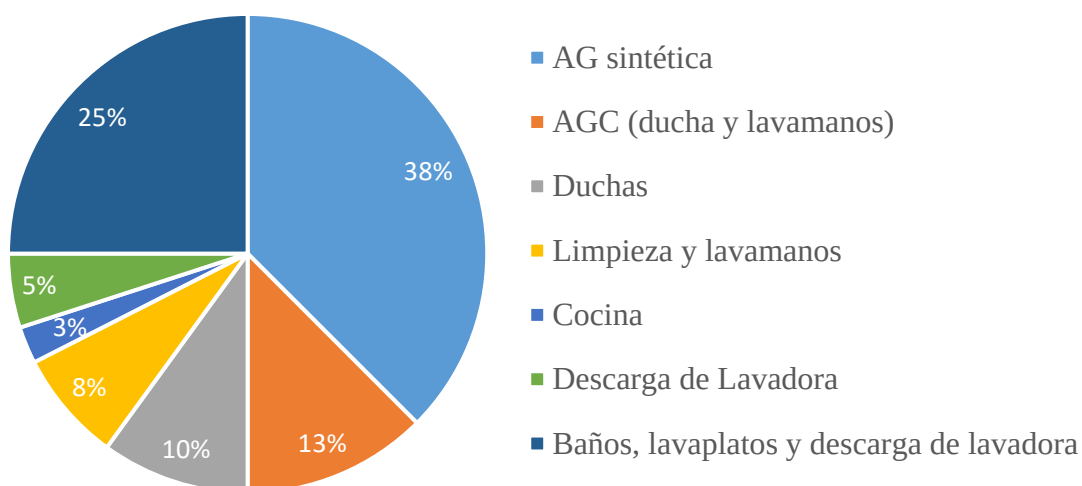
En cuanto al tema de costos, aunque las AG reales son gratuitas se debe considerar costos de transporte, manipulación y almacenamiento en el laboratorio, mientras que el costo del AG sintética depende de los productos utilizados y el almacenamiento, lo que puede ser rentable en algunas ocasiones (O'Flaherty & Gray, 2013). En el Apéndice E se muestran distintas formulaciones de AG sintética.

En la Figura 5 se observan los distintos tipos de fuentes de AG monitoreados en las 40 publicaciones analizadas. El afluente con mayor porcentaje fue el uso de agua gris sintética, dado que la mayoría de los estudios evaluaban trenes de tratamiento a escala piloto y por temas de dificultad en transporte y almacenamiento de AG se optó por utilizar AG sintética (O'Flaherty & Gray, 2013). Adicionalmente, el 72% de las publicaciones utilizaron agua gris

clara, es decir, con bajo contenido orgánico, lo que explica la composición y calidad del afluente.

Figura 5.

Fuentes de agua gris provenientes de 40 investigaciones.



Como se observa en la Figura 5, el origen de las AG puede ser muy variado, por lo que resulta fundamental caracterizar cada tipo de AG de acuerdo con los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos como se muestra en la Tabla 3. Cabe destacar la variabilidad de rangos en los parámetros de monitoreo debido a que depende del número de ocupantes, los productos químicos utilizados y los hábitos de cada habitante de la vivienda (Ghaitidak & Yadav, 2013).

A partir de la información recolectada en la Tabla 3 se observa que: (i) Se presenta una alta concentración de aceites y grasas (328 mg/L) en el flujo proveniente de actividades para la cocina, mientras que las AGC tienen en promedio 77 mg/L (ii) Las características de AG (cocina, ducha, lavadora y lavamanos) estudiadas por Ghaitidak et al. muestran valores muy altos en los parámetros de turbidez, SST, EC, DQO y DBO₅ comparado con el AGC, es decir, la proveniente de ducha y lavamanos. Esto se debe principalmente a la presencia de

residuos de alimentos presentes de la cocina y a los productos químicos utilizados en la lavadora. (iii) El valor del pH para AGC estuvo en un rango neutral (6.5-7.7), mientras que para el flujo proveniente del lavaplatos y de la descarga de lavadora el pH estuvo en un rango alcalino (8.2-9.3), producto del uso de detergentes, los cuales contienen compuestos químicos como carbonatos, fosfatos y alcalinos para disolver la suciedad (iv) De acuerdo con Metcalf & Eddy (Inc, 1995) los valores típicos de la composición de AR domésticas ($\text{DBO}_5 = 220 \text{ mg/L}$, $\text{DQO} = 500 \text{ mg/L}$, $\text{Tot. N} = 40 \text{ mg/L}$, $\text{grasa} = 100 \text{ mg/L}$ y $\text{coliformes totales} = 1^7 - 1^8 \text{ n}^\circ/\text{mL}$) (Inc, 1995) son superiores a los valores típicos del AGC ($\text{DBO}_5 = 129-173 \text{ mg/L}$, $\text{DQO} = 230-367 \text{ mg/L}$, $\text{Tot. N} = 6.6 \text{ mg/L}$, $\text{grasa} = 77 \text{ mg/L}$ y $\text{coliformes totales} = 6.3^3 - 5^6 \text{ n}^\circ/\text{mL}$), debido a los contaminantes provenientes del inodoro, cocina y lavadora.

Tabla 3.*Características de AG de acuerdo con fuente doméstica*

Parámetro	Unidades	Agua del grifo	Ducha	Lavamanos	Lavaplatos	Fregadero/Lavadero	Descarga de lavadora	Baño (ducha+lavamanos)	AG combinada
Turbidez	NTU	ND	84.8-375	164	347.2	133-211	328-444	59.8	167.9
TS	mg/L	28.7	520-1090	835	2819	679-1272	2021-2700	777	742.2
SST	mg/L	21.1	89-353	153-259	525	134-625	188-315	58-78	190.4
Aceite y grasas	mg/L	ND	164	135	328	232	181	77	92.5
TDS	mg/L	154.8	279-565	473.3	633	312-903	2140-2444	-	533.1
pH		7.1	7.3-7.5	7-7.3	8.2-8.3	6.5-7.7	8.3-9.3	7.1-7.6	7.7
EC	mS/cm	0.3	1.4-89	199.3	90.61	1.4-97	2.9-703	43.7	359.7
DBO₅	mg/L	226.6	40.2-424	155-205	470-4450	40.8-890	44.3-462	129-173	290.6
DQO	mg/L	ND	77-645	386-587	1296	58-1340	58-1339	230-367	911.9

COT	mg/L	ND	65	60.8	542	-	189.2	-	217.1
Tot. N	mg/L	21	8.7-10.92	10.4	31.2	6.44	14.28	6.6	17.8
Tot. P	mg/L	ND	1.12		48.3	0.69	51.58	-	17.6
Coliformes totales	NMP	-	2 E+02 - 6.8 E+03	9.42 E+03	4.30 E+06	2 E+02 – 5.29 E+02	2 E+02 – 4.2 E+06	6.35 E+03 – 5.1 E+06	-
E. coli	NMP	-	2 E+02- 1.49 E+06	10	-	2 E+02	-		-

Adaptado de: (Edwin et al., 2014; Ghaitidak & Yadav, 2013)

La Tabla 4 presenta un resumen de los porcentajes esperados de remoción de parámetros físicos y biológicos utilizados para monitorear los trenes de tratamiento en los artículos analizados. Para esto se seleccionaron solo aquellos documentos que evaluaron la calidad del agua posterior al tratamiento, únicamente por tecnología de membrana, además se consideró el afluente proveniente de similares fuentes (ducha, lavamanos y descarga de lavadora).

Tabla 4.

Porcentajes promedio de eficiencia en remoción de contaminantes

Tipo de membrana	Porcentaje de eficiencia en remoción (%)						
	Turbidez	DQO	E. coli	Coliformes totales	DBO ₅	SST	SDT
Ultrafiltración (UF) (Sabino De Gisi et al., 2016)(Kim et al., 2009)	97 %	73%	99%	90%	98%	98%	-
Nanofiltración (NF) (Hourlier et al., 2010)	98%	90%	-	N.D	99%	95%	-
Microfiltración (MF) (de Oliveira et al., 2020)	60-80%	58-93%	-	-	31-49 %	94%	15%
Osmosis inversa (OI) (de Oliveira et al., 2020)	98-99%	95-97%	-	-	98	N.D	77%
Biorreactor de membrana (MBR) (D. Cecconet et al., 2019)	98%	86-94 %	99%	99.5 %	91.5 %	98%	-

N.D = no detectable

3.2.1 Sistemas de tratamiento

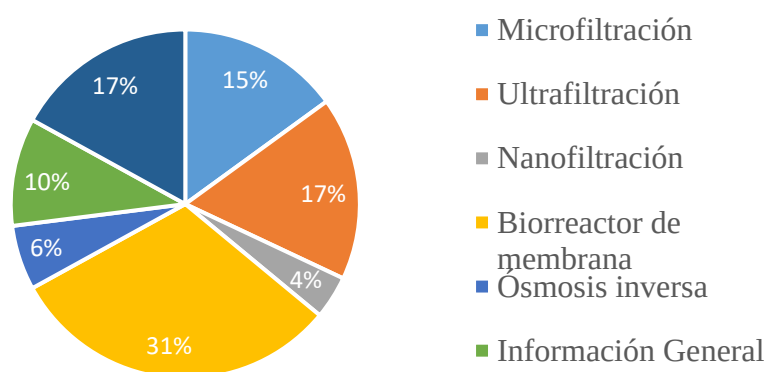
3.2.2.1 Tecnologías de membrana La filtración por membrana es un proceso físico que, según se ha documentado, realiza una excelente remoción de sólidos disueltos y suspendidos, sin embargo, proporciona una eliminación limitada de sustancias orgánicas

(Fane, 2011). Escoger la tecnología más apropiada depende de factores técnicos como la escala de operación y el uso final del agua y de algunos factores socioeconómicos (S De Gisi et al., 2016; Fane, 2011). Las membranas desempeñan un papel cada vez más importante en el suministro de agua potable, de esta forma, es oportuno examinar los desafíos técnicos y sociopolíticos a los que se enfrenta y de esta manera impulsar la tecnología a nuevos desarrollos.

En la figura 6 se presentan los tipos de membranas empleados en los estudios seleccionados en esta revisión. Se puede observar que, con un valor porcentual de 31%, la mayoría de los estudios realizaron sus investigaciones sobre reactores biológicos de membrana (MBR), esto puede ser debido a que su tratamiento de aguas grises tiene mayor eficiencia en la remoción de microorganismos y materia orgánica, respecto a otro tipo de membranas (Bani-Melhem et al., 2015), además de ventajas como ser la única tecnología que no requiere el acompañamiento de desinfección con cloro.

Figura 6

Distribución porcentual de estudios por tipo de membrana.



Nota: GDMBR = gravity-driven membrane bioreactor

LSDMBR = low sludge discharge membrane bioreactor

PCBM = Polyelectrolyte-complex bilayer membrane

MBBMR = moving bed biofilm membrane reactors

Membrana metálica y Membrana de carbón activado.

Información general = Opciones, desafíos y ventajas del tratamiento de AG mediante tecnología de membrana a nivel mundial.

Debido a la cantidad de artículos obtenidos y a los porcentajes observados en el diagrama anterior, en este estudio sólo se analizaron los factores técnicos y económicos de las membranas con mayor número de investigaciones realizadas (MF, UF, NF, OI y MBR), además de ser las más implementadas a nivel mundial.

– **Membrana de microfiltración (MF)**

Se identificaron 7 investigaciones que abordaron este tipo de membranas, con un porcentaje de 15% sobre el total de artículos. En general, se trata de membranas de fibra hueca con un tamaño de poro de entre 0.1 μm – 10 μm , magnitud que le permite separar partículas finas, coloides, algas y microorganismos (de Oliveira et al., 2020)(Kim et al., 2009)(Kumar Khuntia et al., 2019); aunque los virus sean de menor tamaño que el poro de esta membrana es posible eliminar parte de esta contaminación viral debido a la unión de virus con otras partículas de mayor tamaño [44][49]. En cuanto a condiciones técnicas, sólo se conoce el TRH de dos estudios a escala de laboratorio, 30 min y 21h (de Oliveira et al., 2020)(Kumar Khuntia et al., 2019) y se evidenció que el tipo de flujo que predomina en este tipo de tecnología es el flujo continuo con un 71.42% (de Oliveira et al., 2020)(Kim et al., 2009)(Das et al., 2018)(Verma & Subbiah, 2019)(Rivero et al., 2006). Se identificó que la remoción de contaminantes fue mejor cuando la filtración por membrana se acompañó de desinfección con cloro (de Oliveira et al., 2020)[44][49].

La microfiltración puede trabajar individualmente y es ideal para la reducción de algunos microorganismos presentes en el agua, sin embargo, tiene un mayor desempeño al trabajar acoplada a otras tecnologías, siendo un buen pretratamiento para NF y OI.

Figura 7

Membrana de microfiltración



Tomado de: (Martin, n.d.)

– Membrana de ultrafiltración (UF)

Se encontraron 8 estudios (17%) relacionados con este tipo de membrana. Con una revisión general, se logró caracterizar aspectos físicos como el tamaño de poro, que varía entre 0.04 a 0.1 μm , lo que le brinda la capacidad de separar macromoléculas, y también el tipo de superficie que por lo general es porosa de fibra hueca y tiene forma de espiral (Lodge et al., 2004; López Zavala et al., 2014)(Ahmed & Jamal, 2020)(Kant et al., 2018). Esta tecnología tiene una alta tasa de implementación, lo cual puede ser debido al bajo requerimiento de energía y a que demandan menos espacio que otras (Oschmann et al., 2005). En cuanto a factores técnicos, Fangyue et al. (Fangyue Li et al., 2008) trabajaron la membrana a una presión constante (TMP) de 0.12 bar y obtuvieron tasas de reducción aptas para el posterior reúso en jardinería y agricultura, además de un efluente con excelente

apariciencia física. Un poco más del 50% de las investigaciones estudiadas fueron realizadas a escala piloto y con tipo de flujo tipo batch (Lodge et al., 2004)(Ahmed & Jamal, 2020)(Kant et al., 2018)(Oschmann et al., 2005). Respecto al TRH, no hubo una tendencia marcada entre los distintos estudios, hubo tiempos de 10 minutos y otros de aproximadamente 1 hora. Por otro lado, la composición del tren de tratamiento sí tuvo influencia en los resultados, los efluentes que presentaban mejor calidad fueron tratados por ultrafiltración acoplada a otros niveles de tratamiento (pretratamiento y/o tratamiento primario) (López Zavala et al., 2014)(Lodge et al., 2004)(Kant et al., 2018)(Fangyue Li et al., 2008). También se encontró que, pensando en economizar sin dejar a un lado la calidad, la ultrafiltración puede ir acompañada sólo de prefiltración mediante fieltro y poliéster (Friedler et al., 2008).

Figura 8.

Membrana de ultrafiltración.



Tomado de: (Martin, n.d.)

– Membrana de nanofiltración (NF)

Se identificaron dos investigaciones (4%) que emplearon este tipo de tecnología, las cuales permitieron reconocer aspectos físicos de la membrana tales como, forma tubular y tamaño de poros de entre 0.1 nm-0.001 μm (Hourlier et al., 2010; Ramon et al., 2004). La nanofiltración es un proceso intermedio entre UF y OI debido a los niveles de separación que

brinda y a las presiones que requiere para su funcionamiento. En su estudio, Ramon et al. (Ramon et al., 2004) compararon el desempeño de NF y UF, sometiendo la membrana de nanofiltración a una presión transmembrana de entre 6-10 bar, con tipo de flujo dead-end, que permite eliminar los sólidos finos y las partículas en suspensión, y un tiempo de retención hidráulica de 150 minutos. Se encontró que NF está más comprometido que UF con la retención de solutos y consume menos energía que OI. Por otro lado, Hourlier et al. (Hourlier et al., 2010) analizó la eficiencia de tres membranas tubulares con distintos puntos de corte por peso molecular que fueron sometidas a dos presiones (20 y 35 bar), y trabajaron con un TRH de 180 minutos. Se encontró que la mejor calidad de filtración fue lograda con la membrana AFC80 a presión de 35 bar. En los dos estudios se pudo observar que las membranas funcionaron como tecnología única.

Figura 9.

Membrana de nanofiltración.



Tomado de: (Suez, n.d.)

– Ósmosis Inversa (OI)

Con un porcentaje del 6% de estudios que abarcaron esta tecnología, el análisis de OI se hizo sobre 3 investigaciones. Respecto a los resultados, se puede concluir que es un proceso capaz de retener sustancias disueltas en el agua (p.ej. sales, incluso las monovalentes), al tiempo que las moléculas de agua pasan libremente a través de la

membrana. En esta pequeña muestra de estudios, predominó el tipo de flujo cross y batch (flujo cruzado y por lote) y en todos los casos la escala de aplicación fue prueba en laboratorio (de Oliveira et al., 2020) (Boddu et al., 2016) (C. Wang & Li, 2019). Boddu et al. (Boddu et al., 2016) y Oliveira et al. (de Oliveira et al., 2020) acoplaron la filtración OI con tecnologías con filtro de carbón, filtro de cartucho y mallas. Por otro lado, Wang et al. (F. Wang & Tarabara, 2008) implementaron OI como tratamiento único.

Figura 10.

Membrana de ósmosis inversa.



Tomado de: (Shangai Minipore Industrial Co. Ltd, n.d.)

– **Biorreactor de membrana**

Estadísticamente, es la tecnología más estudiada en artículos científicos, representando el 31% de estudios tratados en esta revisión bibliográfica. Esto se debe, entre otros aspectos, a la combinación de dos procesos distintos: por un lado, una degradación biológica aeróbica de materia orgánica utilizando lodos activados, y por otro, una separación directa de coloides-líquido (incluyendo bacterias patógenas), esto por medio de membranas de filtración (Lamine et al., 2012)(Bani-Melhem et al., 2015). MBR posee ciertas características que la distinguen de otras tecnologías al tratar aguas grises, entre tantas,

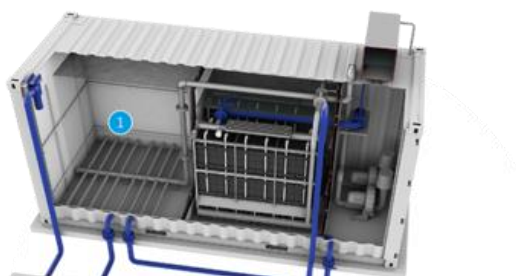
tamaño reducido, permite mayor volumen de carga, reduce la producción de lodos y tiene un alto rendimiento en la eliminación de nutrientes y materia orgánica (Lamine et al., 2012) (Daniele Cecconet et al., 2019)(Ren et al., 2020).

Existen dos tipos de reactores, diferenciados por el principio de separación de membranas, en uno se expulsa el permeado por una bomba de succión, en otro se transporta mediante gravedad, lo cual disminuye costos debidos a la bomba, simplifica la estructura y ahorra energía (Lamine et al., 2012). Las membranas utilizadas en el proceso de separación sólido-líquido, generalmente están hechas de polímero orgánico y tienden a tener un tamaño de poro de entre $0.05\ \mu\text{m}$ – $0.4\ \mu\text{m}$ (Ren et al., 2020)(Hocaoglu & Orhon, 2010a)(Bruce Jefferson et al., 2001)(Diamantis, 2021), sin embargo, Hasan et al. (Hasan et al., 2015) implementó una membrana de cerámica de bajo costo que probó tener el mismo éxito que las usuales en cuanto a desinfección, además de presentar un riesgo de colmatación bajo que no afecta en gran medida al flujo. Se evidencia una tendencia a operar los biorreactores con flujo tipo batch y tiempos de retención hidráulica entre 16h a 24h.

Los permeados de los biorreactores de membrana tienen las características físicas, químicas y biológicas para ser reutilizados de cualquier uso, siendo evidente que su calidad no depende del acompañamiento de otras tecnologías, es posible afirmar que el uso de la tecnología MBR correctamente, en la mayoría de los casos, no necesita del uso de desinfección con cloro debido a la alta eficiencia en eliminación de patógenos como se demuestra en la investigación realizada por Friedler et al. (Friedler et al., 2006), sin embargo, para el cumplimiento de las normativas nacionales y para evitar un posible rebrote de bacterias y virus se sugiere su aplicación (Hocaoglu & Orhon, 2010b)(Hocaoglu et al., 2013).

Figura 11

Biorreactor de membrana



Tomado de: (Martin, n.d.)

3.2.2.2 Tecnologías acopladas Para tratar AG de forma eficiente en algunos casos se requiere de otra tecnología que complemente a la tecnología de membrana y así cumplir los requisitos de los parámetros fisicoquímicos establecidos para reúso, por lo que seleccionar la tecnología más apropiada es un aspecto de sumo interés y depende de los siguientes factores: escala de operación, costo, gasto energético, uso final del agua (S De Gisi et al., 2016), grado de cuidado e intervención en el sitio, entre otros (Ong et al., 2019).

Habitualmente la tecnología de membrana es precedida por un pretratamiento de separación sólido-líquido, tal es el caso de la prefiltración con fieltro y poliéster comprimido, esta tecnología surge como una alternativa potencial para disminuir el espectro amplio de las membranas de MF y UF, también se destaca por su eficiencia en eliminación de SST y DQO (López Zavala et al., 2014). En igual forma la implementación de prefiltración de cartucho obtiene altos porcentajes en eliminación de SST y turbidez (83% y 85% respectivamente) (Ong et al., 2019), además de disminuir la colmatación de la membrana, permitir un flujo sin grandes variaciones y rechazar compuestos orgánicos (Boddu et al., 2016). Otra alternativa es el uso de filtros de metal o mallas de pantalla para retener las fibras de ropa, cabello y otras

partículas finas y gruesas (de Oliveira et al., 2020) (Lamine et al., 2012). Algunas otras tecnologías de prefiltración pueden ser filtración de grava, de arena u otro material (Ong et al., 2019).

Los sistemas físicos son ampliamente utilizados como etapa de pretratamiento de aguas residuales o para aplicaciones con requisitos de calidad de efluente poco estrictos (Ong et al., 2019). En las investigaciones (F. Li et al., 2008) y (F. Li et al., 2009) se implementó un tanque séptico como pretratamiento de UF, para eliminar las partículas más grandes como cabello, aceite y grasa. Adicionalmente, se identificó la importancia de retener materia orgánica para evitar el bloqueo acelerado de los poros de membrana UF. Sin embargo, para el tratamiento de AGC no se recomienda implementar pretratamientos biológicos, ya que no representaría ninguna ventaja económica, técnica o ambiental el tratar aguas grises sobre aguas residuales (Lodge et al., 2004), esto debido a que las AGC se caracterizan por tener poca materia orgánica entre sus contaminantes (Lodge et al., 2004). Cabe destacar que la colmatación de la membrana UF sería el mismo al tratar AR o AG; además se podría aumentar el porcentaje de agua tratada de entre 35-50%, al tratar solamente AG, hasta alrededor del 95% (AR) con un costo adicional mínimo (Lodge et al., 2004).

En algunos estudios referentes a la tecnología de microfiltración se implementó también difusores de aireación (Ong et al., 2019) y fotocalizador (Rivero et al., 2006) como tratamiento primario. A pesar de que la aireación se realiza para promover la degradación de contaminantes orgánicos por microorganismos aeróbicos y trata eficazmente la turbidez, SST y DBO₅ (Ong et al., 2019), no es una tecnología adecuada para viviendas debido a su alto costo, compleja operación y mantenimiento (Lodge et al., 2004). La oxidación foto catalítica (PCO) presenta la desventaja de colmatación en el catalizador sólido y su elevado costo lo que no hace factible aplicarla a nivel residencial (Rivero et al., 2006).

Los sistemas químicos surgen como un posible paso final del tratamiento de aguas grises, teniendo en cuenta que la desinfección con cloro o UV se requiere para la eliminación de virus, patógenos y olores (Ren et al., 2020), además de evitar el riesgo para la salud humana al almacenar y aplicar el AG tratada (Santasmassas et al., 2013). En el estudio (Kim et al., 2009) se concluyó que el uso del proceso de oxidación como paso final del tren de tratamiento aumenta los costos de inversión, operación y mantenimiento.

Generalmente se utiliza como último tratamiento la desinfección con cloro para lo cual el agua es desinfectada agregando una pequeña cantidad de hipoclorito de sodio, menor a 1 ppm, para así conservar las propiedades sanitarias y ser almacenada en un tanque de cloración (Santasmassas et al., 2013). La luz ultravioleta (UV) es un método alternativo a la desinfección con cloro, este método es efectivo para la eliminación de una amplia variedad de virus y bacterias (Wright, H.B and Cairns, n.d.). Sin embargo, se ve obstaculizado por los altos costos requeridos para operación y mantenimiento del sistema, además del desgaste presentado por la lámpara UV con el tiempo y la compleja operación y monitoreo (Kant et al., 2013)

Se determinó que se requiere de un pretratamiento para disminuir la colmatación de la membrana, tratamiento primario con filtración por membrana y un tratamiento secundario para eliminar virus, patógenos y cumplir los requerimientos normativos asociados a parámetros microbiológicos de reúso.

3.2.2 *Trenes de tratamiento*

Para aumentar la eficiencia en la remoción de contaminantes y así cumplir con los requisitos de calidad para reúso de AG sin implementar una tecnología demasiado costosa, se

observó que el mejor desempeño ocurre en esquemas que combinen diferentes tecnologías de costo moderado y sencillo mantenimiento (Pidou et al., 2007).

En la Tabla 5, se presentan los sistemas con mayor potencial para tratamiento encontrados en la revisión de literatura. La mayoría de las investigaciones estaban enfocadas en evaluar únicamente la tecnología de membrana, por lo que solo se identificaron 9 trenes de tratamiento para AG a nivel residencial.

Tabla 5.

Sistemas de tratamiento estudiados de la revisión de literatura.

Abreviatura	Tren de tratamiento	Usos finales
UF+DC (Oschmann et al., 2005)	Membrana de Ultrafiltración + Desinfección con Cloro	Jardinería, lavandería, lavado de automóviles y descarga de sanitarios
SD + UF +DC (Fangyue Li et al., 2008)	Sedimentador + Membrana de Ultrafiltración + Desinfección con Cloro	Jardinería, agricultura y descarga de sanitarios
F+UF+DC (López Zavala et al., 2014)	Filtro + Membrana de Ultrafiltración + Desinfección con Cloro	-
F+MBR +DC (Ren et al., 2020)	Filtro + Biorreactor de membrana + Desinfección con Cloro	Descarga de sanitarios
FA+MBR +DC (Friedler et al., 2006)	Filtro de arena + Biorreactor de membrana + Desinfección con Cloro	Jardinería, lavandería, lavado de automóviles y descarga de sanitarios

MBR+DC (D. Cecconet et al., 2019)	Biorreactor de membrana + Desinfección con Cloro	Descarga de sanitarios y jardinería
SD+MBR +DC (Hocaoglu et al., 2013)	Sedimentador + Biorreactor de membrana + Desinfección con Cloro	Descarga de sanitarios y jardinería
NF+DC (Hourlier et al., 2010)	Membrana de nanofiltración + Desinfección con Cloro	Descarga de sanitarios y lavado de ropa.
MF+DC (Das et al., 2018)	Membrana de microfiltración + Desinfección con Cloro	Lavado de automóviles, lavado de pisos y descarga de sanitarios

3.2.4 Condiciones técnicas

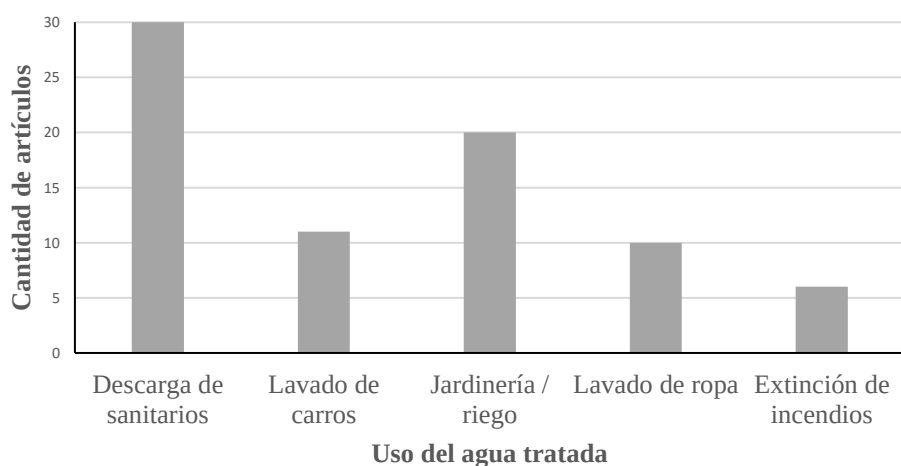
3.2.4.1 Usos generales Generalmente, la aplicación descrita por la mayoría de los artículos enfocados en la reutilización de AG es la descarga de sanitarios y/o urinarios. Este reúso permitiría reducir hasta en un 35% la demanda de agua en una vivienda (Ren et al., 2020). Sin embargo, es posible usar las AG para el riego de césped, lavado de vehículos, extinción de incendios, lavado de ropa, pisos o pavimentos (S De Gisi et al., 2016; Fane, 2011; Ren et al., 2020). Se han realizado investigaciones donde se determinó que el uso de AG tratadas con fines de riego no tiene impacto negativo en la calidad química de las plantas y/o cultivos (D. Cecconet et al., 2019). Este reúso de AG permite disminuir o evitar el uso de productos químicos como fertilizantes, debido a la presencia de macronutrientes como el nitrógeno y el fósforo en el AG tratada (Gabarró et al., 2013).

Para analizar las aplicaciones del agua tratada se elaboró la Figura 7, la cual presenta los 5 principales usos del AG sin considerar el tipo de tecnología implementada, siendo la

descarga de sanitarios el uso más repetitivo (30 de 48 artículos), esto se debe a que los sistemas de tratamiento de AG están planteados para ser reusados a nivel residencial. No obstante, la alta calidad del efluente en algunos casos, dependiendo de los requisitos normativos del país en cuestión, no se limitaría a aplicaciones convencionales de bajo grado, por lo cual se podría reusar para: lavado de automóviles, jardinería o riego, lavado de ropa y extinción de incendios. Resultando así en una gran alternativa el tratamiento de agua gris en países con escasez y/o poco acceso al recurso hídrico.

Figura 12.

Frecuencia del uso de agua gris tratada en 40 investigaciones.



3.2.4.2 Mantenimiento En el proceso de tratamiento de aguas grises por filtración de membranas es inevitable la colmatación de estas (fouling), pues las obstrucciones que se generan en la superficie de la membrana o en los poros mismos, son inherentes al proceso de filtración. Detalles sobre el “fouling” han sido documentados, encontrando que las partículas más pequeñas como los coloides, tienden a incrustarse en los poros, mientras que las partículas orgánicas, biológicas e inorgánicas forman una capa en la superficie de la membrana “cake” (Lim & Bai, 2003). Las consecuencias observadas en la experimentación

con membranas, van desde la disminución del flujo de permeado, hasta un daño irreversible de la membrana si no es tratada periódicamente (F. Wang & Tarabara, 2008).

La información recolectada sobre membranas de ultrafiltración, indica que, idealmente la limpieza de estas se realiza después de 5-6 horas operación (Oschmann et al., 2005) con técnicas como retro lavado de membrana con recuperación de flujo de hasta el 88% (Ahmed & Jamal, 2020) el cual puede durar de 7-25 minutos (Lodge et al., 2004), aireación de 15 minutos en solución química con posterior limpieza de lejía (Oschmann et al., 2005) y lavado a contracorriente con una bomba sumergida con posterior limpieza alcalina (F. Li et al., 2008), lo que permite una recuperación de flujo inicial.

Para las membranas de nanofiltración, Hourlier et al. (Hourlier et al., 2010) documentaron una limpieza alcalina (pH de 9.4) a 45°C durante 1h con el detergente Ultrasil 53 (HenkelEcolab), seguido de un enjuague con agua desionizada, una limpieza ácida (pH = 1.4) a 35°C durante ½ h con ácido nítrico y por último, un enjuague con agua desionizada.

Como datos generales sobre las membranas de microfiltración, se encontró que las membranas horizontales se ensucian a mayor velocidad que las verticales (Kumar Khuntia et al., 2019). Entre los mantenimientos documentados se encontró, se lava a contracorriente durante 2 minutos después de la filtración de 50L, pasando el agua pura a través del canal de permeado y posteriormente se limpia químicamente con solución de NaOH a 25°C (Verma & Subbiah, 2019), también, lavado con n-hexano de acetona y agua, limpieza adicional de ácido nítrico e hidróxido de sodio y posterior deionización (Das et al., 2018). Otro tipo de limpieza se realiza manualmente limpiando hasta eliminar la torta superficial, posteriormente se somete a retro lavado de 20 minutos con presión de 1 bar y se limpia químicamente con hipoclorito de sodio diluido al 0.1% (de Oliveira et al., 2020). Se recomienda mantenimiento regular para evitar el deterioro en este tipo de membranas.

En relación con la limpieza de membranas de ósmosis inversa, Wang et al. (F. Wang & Tarabara, 2008) aplicaron un lavado por 30 minutos con agua desionizada a una velocidad de 5.6 cm/s, mientras que, por otro lado, Oliveira et al. (de Oliveira et al., 2020) consideraron pertinente realizar 10 veces una limpieza química, haciendo circular solución alcalina de NaOH (pH 10) durante 10 minutos y dejando actuar la solución 10 minutos más en reposo.

En cuanto a biorreactores de membrana, se encontraron distintos tipos de mantenimiento: i) retro lavado con ciclo de 24h (Ren et al., 2020) ii) bombas de aireación (Daniele Cecconet et al., 2019) iii) limpieza periódica con hipoclorito y agua (Friedler et al., 2006) iv) uso de difusores de aire y limpieza con hipoclorito de sodio al 0.16% con tiempo de contacto de 2h (Santasmassas et al., 2013).

3.2.5 Costos

Construir un tren de tratamiento de aguas grises, independientemente de la escala de construcción, requiere una gran inversión. Según el uso destinado para el efluente, el tren deberá estar compuesto de las tecnologías necesarias para restaurar las aguas residuales.

En caso de optar por membranas como método de filtración, tendrá que realizarse un estudio de los costos que implica el uso de esta tecnología, teniendo en cuenta que no sólo se trata del precio de estas, sino que también es importante invertir en su limpieza y mantenimiento.

A continuación, se exponen los costos típicos de las distintas membranas de filtración estudiadas durante la revisión de literatura, exceptuando aquellas que se consideraron de poco interés científico de acuerdo con la cantidad de artículos enfocados en su uso.

Tabla 6.*Costo de membranas.*

T. filtración	Proveedor	Precio €/m ²
MF	Shangai Minipore Industrial Co. Ltd	70-90
UF	Martin	100-160
NF	Mathiesen	-
RO	Suez wáter technologies et solutions	95-130
MBR	Mathiesen	-

En la Tabla 6 se evidencia la diferencia de costo que representa cada membrana según su tipo de filtración, sin embargo, no es correcto compararlas por factores económicos, ya que cada membrana tiene sus características y funciones únicas que también se ven reflejadas en su eficiencia de remoción. Por lo que se recomienda seleccionar la tecnología de membrana de acuerdo con el tipo de agua que se va a tratar y del uso al que está destinada.

3.3 Propuesta de tren de tratamiento óptimo

Para plantear el tren de tratamiento con mayor potencial de reúso en viviendas, primero se definieron las características del afluente (AG proveniente de duchas y lavamanos) y el uso del AG tratada (descarga de sanitarios). Tal y como se especifica previamente en el inciso 2.1.4

3.3.1 Selección de tecnología de filtración por membrana óptimo

A partir de la información recolectada en la revisión de literatura se realizó un análisis cuantitativo y cualitativo, presentado en la Tabla 6, a las 5 tecnologías de membrana

evaluadas en este estudio (MF, UF, NF, OI y MBR). Para la asignación de valores se consideraron 3 criterios: i) Eficiencia en remoción de contaminantes ii) Aspecto económico iii) Manejo y mantenimiento de tecnología. Estos aspectos fueron valorados en los incisos 3.2.1; 3.2.5 y 3.2.4.2, respectivamente.

Tabla 7.

Calificación de tecnología de membrana.

Tecnología de membrana	DBO ₅	SST	Coliformes totales y E. coli	Simplicidad en operación y mantenimiento	Costo de instalación, operación y mantenimiento	Puntaje total
MF	1	3	2	3	3	12
UF	3	3	3	3	2	14
NF	3	3	3	3	1	13
OI	3	3	3	2	2	13
MBR	3	3	3	1	1	11

Como se muestra en la Tabla 7, la membrana de Ultrafiltración tiene el mayor puntaje de acuerdo con los criterios analizados, por lo que se seleccionó como la tecnología de filtración por membranas con mayor potencial para ser aplicada en tratamiento de AG en residencias.

3.3.2 Selección de tren de tratamiento

La elección de un sistema de tratamiento debe basarse en una evaluación cuidadosa de algunos factores como: el uso del agua, la escala de operación, los beneficiarios del sistema, la legislación y el entorno socioeconómico (Sabino De Gisi et al., 2016).

Después de definir las etapas de tratamiento que requiere el reúso de AG en descarga de sanitarios (2.1.5) y de seleccionar la membrana de ultrafiltración como tratamiento primario, se consideraron solamente aquellos trenes de tratamiento presentes en la literatura estudiada que cumplieran con ambos parámetros, dando como resultado los siguientes dos trenes de tratamiento:

Figura 13.

Primer tren de tratamiento propuesto

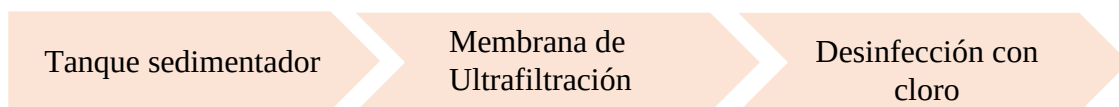
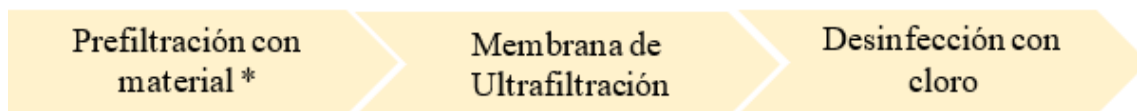


Figura 14.

Segundo tren de tratamiento propuesto



Nota: Prefiltración con fieltro y/o poliéster prensado

Como se planteó previamente, es necesario una etapa de pretratamiento que separe las partículas de gran tamaño y el líquido, con el fin de evitar la colmatación rápida de la membrana UF, lo que permitirá disminuir la frecuencia del mantenimiento, aumentar la vida útil de la membrana y mantener la cantidad de flujo permeado durante un mayor tiempo.

Adicionalmente como tratamiento posterior a la membrana UF se requiere un proceso de desinfección con cloro para eliminar patógenos y virus presentes en el agua para cumplir los requisitos normativos de reúso.

Teniendo en cuenta el proyecto de investigación realizado por Álvarez y Bonilla (Álvarez & Bonilla, 2020) y el GPH, donde proponen un tren de tratamiento con las mismas tecnologías y condiciones del tren expuesto en la Figura 9 se plantearon las mismas dimensiones para un prototipo de laboratorio del primer tren propuesto (SD+UF+DC). Por otra parte, para las dimensiones del segundo tren propuesto (F+UF+DC), las dimensiones de los 3 tanques se calcularon de acuerdo con el caudal por defecto suministrado por el fabricante de la membrana de UF para un tiempo de retención de 120 minutos, el cual cumple con las recomendaciones para evitar olores y posible crecimiento de bacterias. A continuación, se muestran los esquemas de los trenes de tratamiento propuestos. Para detallar el diseño de ambos trenes de tratamiento propuestos se presentan en los Apéndices F y G.

Figura 15.

Esquema primer tren de tratamiento propuesto.

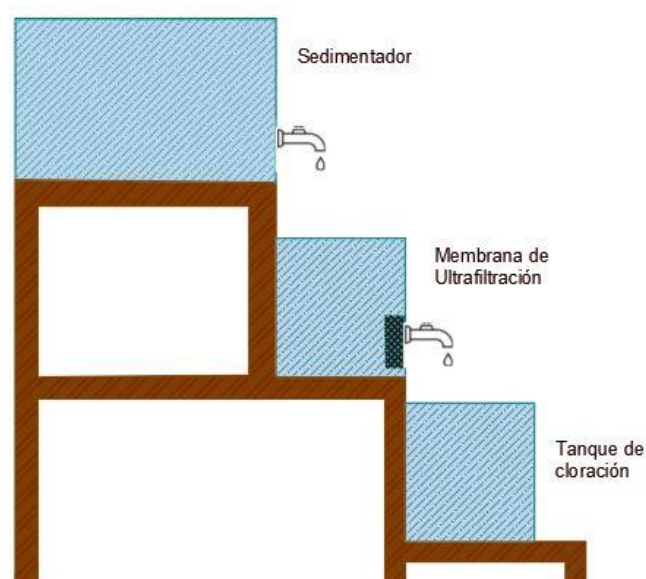
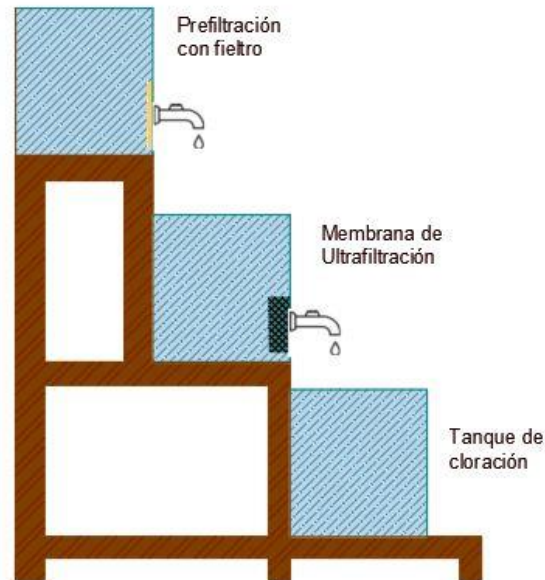


Figura 16.

Esquema segundo tren de tratamiento propuesto.



3.3.3 Condiciones para puesta en marcha, operación y mantenimiento

Primero se debe definir si el AGC que se utilizará será real o sintética dependiendo de la distancia y disponibilidad del AGC en el laboratorio. En caso de utilizar AGC sintética en la investigación realizada por E. O'Flaherty y N. F. Gray (O'Flaherty & Gray, 2013) se presentan 11 fórmulas de AG sintética que dependiendo de los compuestos químicos disponibles se escogerá la fórmula adecuada.

Posteriormente se verificará que el prototipo del tren de tratamiento a escala de laboratorio esté en buen estado, con las dimensiones y materiales apropiados. También se comprobará el estado de la membrana de UF, su configuración y que no presente ninguna clase de partículas retenidas que puedan afectar su funcionamiento inicial.

Para evaluar los trenes de tratamiento propuestos se recomienda analizar la calidad del afluente y efluente de cada etapa, para esto se monitorearán los parámetros físicos, químicos

y biológicos (Turbidez, DBO₅, SST, DQO, E. coli y coliformes fecales) del flujo antes y después del paso por cada tecnología. El prototipo sería operado por flujo Batch y funcionaría por gravedad, para evitar un aumento en los costos. Además, se debe considerar no exceder el flujo recomendado por el fabricante de la membrana “Martin Membrane Systems”, ya que un mayor flujo aceleraría la colmatación de la membrana.

Se recomienda ensayar cada sistema de tratamiento al menos 3 veces, para que al realizar el análisis de datos sea con una muestra mayor.

Con respecto al mantenimiento requerido por el prototipo dado que el tiempo de operación de la membrana de UF en cada ensayo será inferior a 6 horas se recomienda realizar un lavado a contracorriente con una bomba sumergida y luego una limpieza alcalina después de tratar 3 lotes de AGC con un tiempo de retención de 2 horas por cada lote.

4. Conclusiones

- La tecnología de membrana representa una opción llamativa debido a la posibilidad de obtener un efluente con alta calidad. Sin embargo, el mantenimiento de la membrana sigue siendo una de las mayores limitantes, ya que debe ser periódico y realizado por personas calificadas que cuenten con filtros de retrolavado y manejen compuestos químicos para complementar la limpieza de la membrana. Por lo que para aplicar esta tecnología se requiere de un constante gasto económico que limita su uso.
- Se identificaron 5 tecnologías de membrana (MF, UF, NF, OI y MBR) implementadas como proceso de filtración de AGC, de las cuales 4 mostraron gran potencial para tratamiento de AGC a nivel residencial. Para el contexto de países en desarrollo que abordó este estudio, se descartó el uso de MBR debido a la alta complejidad en la operación y mantenimiento y al alto costo de inversión requerido. El uso de

membranas de UF para tratamiento de AGC surge como una alternativa eficiente, de costo medio y baja complejidad para operación.

- Se propusieron dos sistemas de tratamiento de AGC para reúso en descarga de sanitarios; el primer sistema está compuesto por una etapa de prefiltración con fieltro o poliéster prensado, seguido de una membrana de UF y una etapa de cloración; el segundo sistema consta de un tanque sedimentador, seguido de una membrana de UF y una etapa de cloración.
- Se elaboró un protocolo para la puesta en marcha, operación y mantenimiento de los dos prototipos de tren de tratamiento propuestos en este estudio, con el objetivo de garantizar el correcto funcionamiento y la vida útil esperada de la tecnología de UF. Además, se definieron los parámetros físicos, químicos y biológicos que se utilizarán para evaluar el desempeño de ambos prototipos a escala de laboratorio.
- Con el fin de determinar la factibilidad de implementar los dos trenes de tratamiento propuestos en este artículo, se recomienda realizar estudios para evaluar el desempeño de estos prototipos para una escala de laboratorio. Adicionalmente se requiere de un mayor número de investigaciones sobre el uso de nuevos materiales, más económicos, que se acoplen como tratamiento preliminar a las tecnologías de membrana para mejorar el rendimiento y la vida útil de estas membranas.

Referencias bibliográficas

- Ahmed, J., & Jamal, Y. (2020). A pilot application of recycled discarded RO membranes for low strength gray water reclamation. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11117-z>
- Al-Ghazawi, Z., Qasaimeh, A., & Bani-Melhem, K. (2018). Ablution gray water qualitative assessment and treatment by submerged membrane bioreactor: A case study in Jordan. *Desalination and Water Treatment*, 127, 213–221. <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.22790>
- Álvarez, & Bonilla. (2020). Propuesta de opciones tecnológicas para el tratamiento y reúso de aguas grises provenientes de ducha y lavamanos en una vivienda unifamiliar del Área metropolitana de Bucaramanga AMB.
- Amerasinghe, P., Bhardwaj, R. M., Scott, C., Jella, K., & Marshall, F. (2013). Urban wastewater and agricultural reuse challenges in India. *IWMI Research Report*, 147, 1–28.
- Avellaneda, & Salcedo. (2019). Evaluación de opciones tecnológicas para el tratamiento de aguas grises con fines de reúso a nivel residencial en el contexto de Bucaramanga (Colombia). *UIS*.
- Bani-Melhem, K., Al-Qodah, Z., Al-Shannag, M., Qasaimeh, A., Rasool Qtaishat, M., & Alkasrawi, M. (2015). On the performance of real grey water treatment using a submerged membrane bioreactor system. *Journal of Membrane Science*, 476, 40–49. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.11.010>
- Birks, R., & Hills, S. (2007). Characterisation of indicator organisms and pathogens in domestic greywater for Recyclin. *Environmental Monitoring and Assessment*, 129(1–3),

61–69. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9427-y>

Boddu, V. M., Paul, T., Page, M. A., Byl, C., Ward, L., & Ruan, J. (2016). Gray water recycle: Effect of pretreatment technologies on low pressure reverse osmosis treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(4), 4435–4443. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.09.031>

Cecconet, D., Callegari, A., Hlavínek, P., & Capodaglio, A. G. (2019). Membrane bioreactors for sustainable, fit-for-purpose greywater treatment: a critical review. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21(4), 745–762. <https://doi.org/10.1007/s10098-019-01679-z>

Cecconet, Daniele, Callegari, A., Hlavínek, P., & Capodaglio, A. G. (2019). Membrane bioreactors for sustainable, fit-for-purpose greywater treatment: a critical review. In *Clean Technologies and Environmental Policy*. <https://doi.org/10.1007/s10098-019-01679-z>

Chao, O., Asadsangabifard, M., Ismail, Z., Tam, J. H., & Roushenas, P. (2019). Design of a compact and effective greywater treatment system in Malaysia. *DESALINATION AND WATER TREATMENT*, 146, 141–151. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23631>

Christova-Boal, D., Eden, R. E., & McFarlane, S. (1996). An investigation into greywater reuse for urban residential properties. *Desalination*. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(96\)00134-8](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(96)00134-8)

Das, D., Baitalik, S., Halder, B., Saha, R., & Kayal, N. (2018). Preparation and characterization of macroporous SiC ceramic membrane for treatment of waste water. *Journal of Porous Materials*, 25(4), 1183–1193. <https://doi.org/10.1007/s10934-017-0528-5>

De Gisi, S., Casella, P., Notarnicola, M., & Farina, R. (2016). Grey water in buildings: a mini-

- review of guidelines, technologies and case studies. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 33(1), 35–54. <https://doi.org/10.1080/10286608.2015.1124868>
- De Gisi, Sabino, Casella, P., Notarnicola, M., & Farina, R. (2016). Grey water in buildings: a mini-review of guidelines, technologies and case studies. In *Civil Engineering and Environmental Systems*. <https://doi.org/10.1080/10286608.2015.1124868>
- de Oliveira, T. M., Benatti, C. T., & Tavares, C. R. G. (2020). Pilot system of microfiltration and reverse osmosis membranes fogreywater reuse. *Desalination and Water Treatment*, 201, 13–19. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.26020>
- Delhiraja, K., & Philip, L. (2020). Characterization of segregated greywater from Indian households: part A—physico-chemical and microbial parameters. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(7). <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08369-0>
- Diamantis, V. (2021). Performance of a Micro-Scale Membrane Reactor for Greywater Treatment at Household Level. *Membranes*, 11, 63. <https://doi.org/10.3390/membranes11010063>
- Edwin, G. A., Gopalsamy, P., & Muthu, N. (2014). Characterization of domestic gray water from point source to determine the potential for urban residential reuse: a short review. *Applied Water Science*, 4(1), 39–49. <https://doi.org/10.1007/s13201-013-0128-8>
- Eriksson, E., Auffarth, K., Henze, M., & Ledin, A. (2002). Characteristics of grey wastewater. *Urban Water*, 4(1), 85–104. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(01\)00064-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1462-0758(01)00064-4)
- Fane, A. G. (2011). Membranes and the water cycle: challenges and opportunities. *Applied Water Science*. <https://doi.org/10.1007/s13201-011-0002-5>
- FAO Organizaci. (2013). *Afrontar la escasez de agua*.

- Friedler, E., Katz, I., & Dosoretz, C. G. (2008). Chlorination and coagulation as pretreatments for greywater desalination. *Desalination*, 222(1–3), 38–49. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.130>
- Friedler, E., Kovalio, R., & Ben-Zvi, A. (2006). Comparative study of the microbial quality of greywater treated by three on-site treatment systems. *Environmental Technology*, 27(6), 653–663. <https://doi.org/10.1080/09593332708618674>
- Gabarró, J., Batchellí, L., Balaguer, M. D., Puig, S., & Colprim, J. (2013). Grey water treatment at a sports centre for reuse in irrigation: A case study. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 34(11), 1385–1392. <https://doi.org/10.1080/09593330.2012.750382>
- Ghaitidak, D. M., & Yadav, K. D. (2013). Characteristics and treatment of greywater-a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(5), 2795–2809. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1533-0>
- Halalsheh, M., Dalahmeh, S., Sayed, M., Suleiman, W., Shareef, M., Mansour, M., & Safi, M. (2008). Grey water characteristics and treatment options for rural areas in Jordan. *Bioresource Technology*, 99(14), 6635–6641. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.12.029>
- Hasan, M., Shafiquzzaman, M., Nakajima, J., Ahmed, A., & Azam, M. (2015). Application of a Low Cost Ceramic Filter to a Membrane Bioreactor for Greywater Treatment. *Water Environment Research*, 87, 233–241.
- Hills, S., Smith, A., Hardy, P., & Birks, R. (2001). Water recycling at the millennium dome. *Water Science and Technology*, 43(10), 287–294. <https://doi.org/10.2166/wst.2001.0643>
- Hocaoglu, S. M., Atasoy, E., Baban, A., & Orhon, D. (2013). Modeling biodegradation characteristics of grey water in membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science*,

429, 139–146. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2012.11.012>

Hocaoglu, S. M., & Orhon, D. (2010a). Fate of proteins and carbohydrates in membrane bioreactor operated at high sludge age. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 45(9), 1101–1108. <https://doi.org/10.1080/10934529.2010.486342>

Hocaoglu, S. M., & Orhon, D. (2010b). Fate of soluble residual organics in membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science*, 364(1–2), 65–74. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.07.050>

Hourlier, F., Massé, A., Jaouen, P., Lakel, A., Gérente, C., Faur, C., & Le Cloirec, P. (2010). Membrane process treatment for greywater recycling: Investigations on direct tubular nanofiltration. *Water Science and Technology*, 62(7), 1544–1550. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.435>

Inc, M. % E. (1995). *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización*.

Jefferson, B, Laine, A., Parsons, S., Stephenson, T., & Judd, S. (2000). Technologies for domestic wastewater recycling. *Urban Water*, 1(4), 285–292. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(00\)00030-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00030-3)

Jefferson, Bruce, Laine, A. L., Stephenson, T., & Judd, S. (2001). Advanced biological unit processes for domestic water recycling. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 43, 211–218. <https://doi.org/10.2166/wst.2001.0623>

Kadewa, W. W., Knops, G., Pidou, M., Jeffrey, P., Jefferson, B., & Le Corre, K. S. (2020). What is the impact of personal care products selection on greywater characteristics and reuse? *Science of The Total Environment*, 749, 141413. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141413>

- Kant, S., Jaber, F. H., & Karthikeyan, R. (2018). Evaluation of a portable in-house greywater treatment system for potential water-reuse in urban areas. *Urban Water Journal*, 15(4), 309–315. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2018.1457165>
- Kant, S., Jaber, F. H., & Karthikeyan, R. (2013). Greywater treatment system modeling: An approach using simulated greywater. *American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting 2013, ASABE 2013*, 6, 4403–4407.
- Kim, J., Song, I., Oh, H., Jong, J., Park, J., & Choung, Y. (2009). A laboratory-scale graywater treatment system based on a membrane filtration and oxidation process - characteristics of graywater from a residential complex. *Desalination*, 238(1–3), 347–357. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.08.001>
- Kumar Khuntia, H., Hameed, S., Janardhana, N., & Chanakya, H. (2019). Greywater treatment in aerobic bio-reactor with macropore mesh filters. *Journal of Water Process Engineering*, 28, 269–276. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.02.013>
- Lamine, M., Samaali, D., & Ghrabi, A. (2012). Greywater treatment in a submerged membrane bioreactor with gravitational filtration. *Desalination and Water Treatment*, 46(1–3), 182–187. <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.677553>
- Li, F., Behrendt, J., Wichmann, K., & Otterpohl, R. (2008). Resources and nutrients oriented greywater treatment for non-notable reuses. In *Water Science and Technology* (Vol. 57, Issue 12). <https://doi.org/10.2166/wst.2008.601>
- Li, F., Gulyas, H., Wichmann, K., & Otterpohl, R. (2009). Treatment of household grey water with a UF membrane filtration system. *Desalination and Water Treatment*, 5(1–3), 275–282. <https://doi.org/10.5004/dwt.2009.550>
- Li, Fangyue, Behrendt, J., Wichmann, K., & Otterpohl, R. (2008). Resources and nutrients oriented greywater treatment for non-potable reuses. *Water Science and Technology*,

57(12), 1901–1907. <https://doi.org/10.2166/wst.2008.601>

Lim, A. L., & Bai, R. (2003). Membrane fouling and cleaning in microfiltration of activated sludge wastewater. *Journal of Membrane Science*, 216(1–2), 279–290. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(03\)00083-8](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(03)00083-8)

Lodge, B., Judd, S. J., & Smith, A. J. (2004). Characterisation of dead-end ultrafiltration of biotreated domestic wastewater. *Journal of Membrane Science*, 231(1–2), 91–98. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2003.09.026>

López Zavala, M. A., Suárez Pérez, L. B., Reynoso-Cuevas, L., & Funamizu, N. (2014). Pre-filtration for enhancing direct membrane filtration of graywater from washing machine discharges. *Ecological Engineering*, 64, 116–119. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.12.049>

Maimon, A., Friedler, E., & Gross, A. (2014). Parameters affecting greywater quality and its safety for reuse. *Science of the Total Environment*, 487(1), 20–25. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.03.133>

Mara, D., & Kramer, A. (2008). *The 2006 WHO Guidelines for Wastewater and Greywater Use in Agriculture: A Practical Interpretation BT - Efficient Management of Wastewater* (I. Al Baz, R. Otterpohl, & C. Wendland (Eds.); pp. 1–17). Springer Berlin Heidelberg.

Martin. (n.d.). *Martin Membrane Systems - Welcome*. AQUANET. Retrieved July 29, 2021, from <https://martin-membrane.de/en/>

Mendoza, & Rincón. (2016). Evaluación de la viabilidad social, técnica y económica de la implementación de un sistema de recolección, tratamiento y aprovechamiento de aguas lluvias y aguas grises en un proyecto de vivienda de interés social. *UIS*.

Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. (n.d.). *Resolución 2115 de 2007*.

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (n.d.). *Resolución 1207 de 2014*.

Mulder, M. (1991). *Basic Principles of Membrane Technology*.

O’Flaherty, E., & Gray, N. F. (2013). A comparative analysis of the characteristics of a range of real and synthetic wastewaters. *Environmental Science and Pollution Research*.
<https://doi.org/10.1007/s11356-013-1863-y>

O’Toole, J., Sinclair, M., Malawaraarachchi, M., Hamilton, A., Barker, S. F., & Leder, K. (2012). Microbial quality assessment of household greywater. *Water Research*, 46(13), 4301–4313. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.05.001>

Ong, Z. C., Asadsangabifard, M., Ismail, Z., Tam, J. H., & Roushenas, P. (2019). Design of a compact and effective greywater treatment system in Malaysia. *Desalination and Water Treatment*, 146, 141–151. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23631>

Oschmann, N., Nghiem, L. D., & Schäfer, A. I. (2005). Fouling mechanisms of submerged ultrafiltration membranes in greywater recycling. *Desalination*, 179(1-3 SPEC.), 215–223. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.12.023>

Oteng-Peprah, M., Acheampong, M. A., & deVries, N. K. (2018). Greywater Characteristics, Treatment Systems, Reuse Strategies and User Perception—a Review. *Water, Air, & Soil Pollution*, 229(8), 255. <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3909-8>

Ottoson, J., & Stenström, T. A. (2003). Faecal contamination of greywater and associated microbial risks. *Water Research*, 37(3), 645–655. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00352-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00352-4)

Pidou, M., Mamon, F. A., Stephenson, T., Jefferson, B., & Jeffrey, P. (2007). Greywater recycling: Treatment options and applications. *Proceedings of the Institution of Civil*

Engineers: Engineering Sustainability, 160(3), 119–131.
<https://doi.org/10.1680/ensu.2007.160.3.119>

Prathapar, S. A., Jamrah, A., Ahmed, M., Al Adawi, S., Al Sidairi, S., & Al Harassi, A. (2005). Overcoming constraints in treated greywater reuse in Oman. *Desalination*.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.01.018>

Ramon, G., Green, M., Semiat, R., & Dosoretz, C. (2004). Low strength graywater characterization and treatment by direct membrane filtration. *Desalination*, 170(3), 241–250. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.02.100>

Ren, X., Zhang, Y., & Chen, H. (2020). Graywater treatment technologies and reuse of reclaimed water for toilet flushing. *Environmental Science and Pollution Research*.
<https://doi.org/10.1007/s11356-019-05154-6>

Rivero, M. J., Parsons, S. A., Jeffrey, P., Pidou, M., & Jefferson, B. (2006). Membrane chemical reactor (MCR) combining photocatalysis and microfiltration for grey water treatment. In *Water Science and Technology* (Vol. 53, Issue 3).
<https://doi.org/10.2166/wst.2006.090>

Samayamanthula, D. R., Sabarathinam, C., & Bhandary, H. (2019). Treatment and effective utilization of greywater. *Applied Water Science*, 9(4), 90.
<https://doi.org/10.1007/s13201-019-0966-0>

Santasmasas, C., Rovira, M., Clarens, F., & Valderrama, C. (2013). Grey water reclamation by decentralized MBR prototype. *Resources, Conservation and Recycling*, 72, 102–107.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.01.004>

Sathe, S. M., & Munavalli, G. R. (2019). Domestic wastewater treatment by modified bio-rack wetland system. *Journal of Water Process Engineering*, 28, 240–249.
<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.02.010>

Schouppe, M. (2010). Membrane technologies for water applications. In *Water*.

Shangai Minipore Industrial Co. Ltd. (n.d.). Retrieved July 29, 2021, from <http://minipore.net/>

Sievers, J. C., & Londong, J. (2017). Characterization of domestic graywater and graywater solids. *Water Science and Technology*, 77(5), 1196–1203. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.627>

Suez. (n.d.). *Suez water technologies et solutions*. Retrieved July 29, 2021, from <https://www.suezwatertechnologies.mx/>

UNESCO. (2020). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2020: agua y cambio climático*. UNESCO.

UNESCO. (2021). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2021*.

Verma, V. K., & Subbiah, S. (2019). Fouling resistant sericin-coated polymeric microfiltration membrane. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 94(11), 3637–3649. <https://doi.org/10.1002/jctb.6169>

Vuppaladadiyam, A. K., Merayo, N., Prinsen, P., Luque, R., Blanco, A., & Zhao, M. (2019). A review on greywater reuse: quality, risks, barriers and global scenarios. In *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*. <https://doi.org/10.1007/s11157-018-9487-9>

Wang, C., & Li, Y. (2019). Permeation of greywater constituents in an aquaporin based biomimetic forward osmosis membrane process: experimental performance and modeling. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 94(5), 1567–1575. <https://doi.org/10.1002/jctb.5920>

Wang, F., & Tarabara, V. V. (2008). Pore blocking mechanisms during early stages of

membrane fouling by colloids. *Journal of Colloid and Interface Science*, 328(2), 464–469. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2008.09.028>

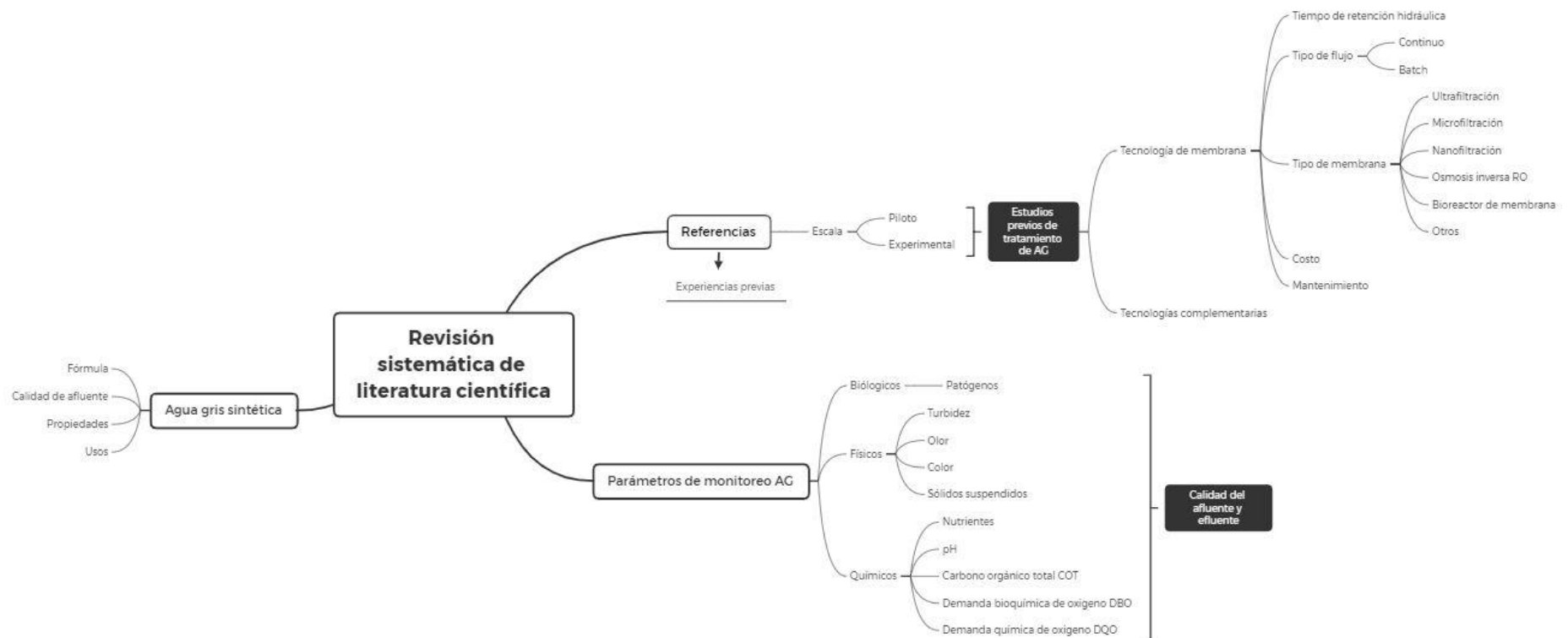
Wright, H.B and Cairns, W. L. (n.d.). *Ultraviolet light UV*.

Yoonus, H., Mannan, M., & Al-Ghamdi, S. G. (2020). Environmental Performance of Building Integrated Grey Water Reuse Systems: Life Cycle Assessment Perspective. *World Environmental and Water Resources Congress 2020: Water, Wastewater, and Stormwater and Water Desalination and Reuse - Selected Papers from the Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress 2020*, 1–7. <https://doi.org/10.1061/9780784482988.001>

Zaraza, & Rivera. (2015). Propuesta de tecnologías para el tratamiento del agua en el sistema de aprovechamiento de agua lluvia del edificio de la escuela de Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones en el campus central de Universidad Industrial de Santander. *UIS*.

Apéndices

Apéndice A. Mapa general de revisión sistemática de literatura



Apéndice B. *Artículos seleccionados en la revisión de literatura.*

Nombre del artículo	Año	País
Evaluation of a portable in-house greywater treatment system for potential water reuse in urban areas. (Shashi Kant, Fouad H. Jaber & R. Karthikeyan)	2018	Estados Unidos
Characterization of dead-end UF of biotreated domestic wastewater. (Ben Lodge, S.J. Judd & A.J. Smith)	2004	Reino Unido
A pilot application of recycled discarded RO membranes for low strength gray water reclamation. (Jawwad Ahmed & Yousuf Jamal)	2020	Alemania
Treatment of household grey water with a UF membrane filtration system. (Fangyue Lia, Holger Gulyasb, Knut Wichmanna & Ralf Otterpohl)	2009	Alemania
Fouling mechanisms of submerged ultrafiltration membranes in greywater recycling. (Nadine Oschmann, Long D. Nghiem & Andrea I. Schäfe)	2005	Australia
Low strength graywater characterization and treatment by direct membrane filtration. (Ramona, Michal Green, Raphael SemiaP & Carlos Dosoretz)	2004	Israel
Resources and nutrients-oriented greywater treatment for non-potable	2008	Alemania

reuses. (Fangyue Li, Joachim Behrendt, Knut Wichmann & Ralf Otterpoh)		
Graywater treatment technologies and reuse of reclaimed water for toilet flushing. (Xueli Ren, Yanyan Zhang & Hongbin Chen)	2019	China
Membrane bioreactors for sustainable, fit-for-purpose greywater treatment: a critical review. (Daniele Cecconet, Arianna Callegari, Petr Hlavínek & Andrea G. Capodaglio)	2019	Alemania
Comparative study of the microbial quality of greywater treated by three on-site treatment systems. (E. Friedler, R. Kovalio & A. Ben-Zvi)	2006	Israel
Application of a low-cost ceramic filter to a membrane bioreactor for greywater treatment. (Md. Mahmudul Hasan, Md. Shafiquzzaman, Jun Nakajima, Abdel Kader T. Ahmed & Mohammad Shafiul Azam)	2015	Japón
Fate of proteins and carbohydrates in membrane bioreactor operated at high sludge age. (Selda Murat Hocaoglua & Derin Orhon)	2010	Turquía
Fate of soluble residual organics in membrane bioreactor. (Selda Murat Hocaoglua & Derin Orhon)	2010	Turquía
Modeling biodegradation characteristics of grey water in membrane bioreactor. (S. Murat Hocaoglu, E. Atasoy, A. Baban un & D. Orhon)	2013	Turquía
Performance of a micro-scale membrane reactor for greywater treatment	2021	Grecia

at household level. (Vasileios Diamantis)		
Greywater recycling in Vietnam - Application of the HUBER MBR process. (Stefania Paris & Celine Schlapp)	2010	Alemania
Grey water reclamation by decentralized MBR prototype. (Carme Santasmasas, Miquel Rovira, Frederic Clarens & César Valderrama)	2013	España
Gray water recycle effect of pretreatment technologies on low pressure reverse osmosis treatment. (Veera M. Boddu, Tias Paul, Martin A. Page, Cristiaan Byl, Laura Ward & Jaime Ruan)	2016	Estados Unidos
Permeation of greywater constituents in an aquaporin based biomimetic forward osmosis membrane process: experimental performance and modeling. (Ce Wang una & Yongmei Li)	2019	China
Greywater treatment system modeling: an approach using simulated greywater. (Shashi Kant, Fouad H. Jaber & R. Karthikeyan)	2013	Estados Unidos
Pilot system of MF and reverse osmosis membranes for greywater reuse. (Taísa Machado de Oliveira, Cláudia Telles Benatti & Célia Regina Granhen Tavares)	2020	Brasil
Membrane process treatment for greywater recycling: investigations on direct tubular nanofiltration. (F. Hourlier, A. Masse', P. Jaouen, A. Lakel, C. Gérente & C. Faury P. Le Cloirec)	2010	Francia

Advanced biological unit processes for domestic water recycling. (B. Jefferson, AL Laine, T. Stephenson & SJ Judd)	2001	Reino unido
Preparation and characterization of macropores SiC ceramic membrane for treatment of wastewater. (Dulal Das, Sanchita Baitalik, Barun Haldar, Rajnarayan Saha & Nijhuma Kayal)	2018	India
Design of a compact and effective greywater treatment system un Malaysia. (Zhi Chao Ong, Mohammadjavad Asadsangabifard, Zubaidah Ismail, Jun Hui Tam & Peiman Roushenas)	2019	Malasia
A laboratory-scale graywater treatment system based on a membrane filtration and oxidation process- characteristics of graywater from a residential complex. (Joonkyu Kim, Insang Song, Haeseok Oh, Jisun Jong, Joonhong Park & Younkyoo Choung)	2009	Corea del sur
Greywater treatment in aerobic bioreactor with macropore mesh filters. (Himanshu Kumar Khuntia, Sadiya Hameed, Naveen Janardhana & Hoysall Chanakya)	2019	India
Fouling resistant sericin-coated polymeric microfiltration membrane. (Vishal Kumar Verma & Senthilmurugan Subbiah)	2019	India
On the performance of real grey water treatment using a submerged membrane bioreactor system. (Bani-Melhem, K., Al-Qodah, Z., Al-Shannag, M., Qasaimeh, A., Rasool Qtaishat, M. & Alkasrawi, M.)	2015	Jordania

Greywater treatment in a submerged membrane bioreactor with gravitational filtration. (Lamine, M., Samaali, D. & Ghrabi, A.)	2012	Túnez
Estimated costs of implementation of membrane processes for on-site greywater recycling. (Humeau, P., Hourlier, F., Bulteau, G., Massé, A., Jaouen, P., Gérente, C., Faur, C. & Le Cloirec, P.)	2011	Francia
Impact of applying electrocoagulation pre-treatment step on grey water treatment by submerged membrane bioreactor. (Bani-Melhem, K., & Smith, E.)	2012	Egipto
Advanced filtration in greywater treatment: a modelling approach with water reuse. (Kant, S., & Jaber, F. H.)	2020	Estados Unidos
Single household greywater treatment with a moving bed biofilm membrane reactor (MBBMR). (Jabornig, S., & Favero, E.)	2013	Austria
Modelling of moving bed biofilm membrane reactors (MBBMR) for on-site greywater treatment. (Jabornig, S., & Rauch, W.)	2015	Austria
A review on greywater reuse: quality, risks, barriers and global scenarios. (Arun K. Vuppaladadiyam, Noemi Merayo, Pepijn Prinsen, Rafael Luque, Ángeles Blanco & Ming Zhao)	2018	China
Membranes and the water cycle: challenges and opportunities. (AG Fane)	2011	Singapur

Grey water in buildings: a mini-review of guidelines, technologies and case studies. (Sabino De Gisia, Patrizia Casella, Michele Notarnicolauna & Roberto Farina)	2015	Italia
Greywater recycling: Treatment options and applications. (Pidou, M., Mamon, F. A., Stephenson, T., Jefferson, B., & Jeffrey, P.)	2007	Reino unido
Water recycling at the millennium dome. (Hills, S., Smith, A., Hardy, P., & Birks, R.)	2001	Reino unido
Chlorination and coagulation as pretreatments for greywater desalination. (Friedler, E., Katz, I., & Dosoretz, C. G.)	2008	Israel
Pre-filtration for enhancing direct membrane filtration of graywater from washing machine discharges. (López Zavala, M. A., Suárez Pérez, L. B., Reynoso-Cuevas, L. & Funamizu, N.)	2014	México
Greywater treatment in aerobic bioreactor with macropore mesh filters. (Kumar Khuntia, H., Hameed, S., Janardhana, N., & Chanakya, H.)	2019	India
A low energy gravity-driven membrane bioreactor system for grey water treatment: Permeability and removal performance of organics. (Ding, A., Liang, H., Li, G., Szivak, I., Traber, J., & Pronk, W.)	2017	Suiza
Bathroom greywater recycling using polyelectrolyte-complex bilayer membrane: Advanced study of membrane structure and treatment efficiency. (Oh, K. S., Poh, P. E., Chong, M. N., Chan, E. S., Lau, E. V.,	2016	Malasia

& Saint, C. P.)		
Membrane chemical reactor (MCR) combining photocatalysis and microfiltration for grey water treatment. (Rivero, M. J., Parsons, S. A., Jeffrey, P., Pidou, M. & Jefferson, B.)	2006	Reino unido
Development and testing of a low sludge discharge membrane bioreactor for greywater reclamation. (Young, S., & Xu, A.)	2008	Canadá
Reuse of greywater and rainwater using fiber filter media and metal membrane. (Kim, R.-H., Lee, S., Jeong, J., Lee, J.-H., & Kim, Y.-K.)	2007	Corea del sur

Apéndice C. Aspectos económicos y de mantenimiento de acuerdo con la tecnología de membrana estudiada.

TIPO DE MEMBRANA	ARTÍCULO	CARACTERÍSTICAS DE MEMBRANA	COSTOS	MANTENIMIENTO
UF	Evaluation of a portable in-house greywater treatment system for potential water reuse in urban areas. (Shashi Kant, Fouad H. Jaber & R. Karthikeyan)	GAC-MI-ME	Fabricación 800 dólares	-
	Characterization of dead-end UF of biotreated domestic wastewater. (Ben Lodge, S.J. Judd & A.J. Smith)	Material: Politífono hidrófilo sulfófono Fibra hueca	Altos por pretratamiento	Tiempo del ciclo de retrolavado entre 7 y 25 minutos
	A pilot application of recycled discarded RO membranes for low strength gray water reclamation. (Jawwad Ahmed & Yousuf Jamal)	Reutilización de membranas de RO (espiral) membranas desechadas de Lanxess-Lewabrane (B085 HF 4040) y DOW Filmtec (BW30-4040)	Reducción del costo capital del sistema a comparación con membrana UF	Ensuciamiento reversible, en su mayoría, mediante retrolavado de membrana. Recuperación de flujo 88%
	Treatment of household grey water with a UF membrane filtration system. (Fangyue Lia, Holger Gulyasb, Knut Wichmanna & Ralf Otterpohl)	módulo de membrana de cuerda espiral de canal abierto (Rochem UF System)	-	Después de cada ciclo de filtración la membrana se limpia químicamente de forma alcalina
	Fouling mechanisms of submerged ultrafiltration	Membrana de fibra hueca UF sumergida ZeeWeed-1 (ZW-1)	-	La limpieza se realizó después de 5-6 horas de operación, la membrana se

	membranes in greywater recycling. (Nadine Oschmann, Long D. Nghiem & Andrea I. Schäfe)				airea durante 15 min en la solución y luego se empapa en tensoactivo, por último, se limpia con lejía
	Resources and nutrients-oriented greywater treatment for non-potable reuses. (Fangyue Li, Joachim Behrendt, Knut Wichmann & Ralf Otterpoh)	Una membrana de canal abierto en espiral de Rochem módulo de brana con superficie total de 8.2 m ² y tamaño de poro de 0.0062 mm	-		Utilización de bomba sumergida para lavar a contracorriente la membrana, para eliminar suciedades reversibles. Posterior se limpia químicamente alcalina. El flujo vuelve al valor inicial
	Chlorination and coagulation as pre-treatments for greywater desalination (Friedler, E., Katz, I., & Dosoretz, C. G)	UF: Membrana FP100, PCI (18 tubular PVDF) RO: modelo XLE-2521, FilmTec	-	-	
	Pre-filtration for enhancing direct membrane filtration of graywater from washing machine discharges (López Zavala, M. A., Suárez Pérez, L. B., Reynoso-Cuevas, L., & Funamizu, N.)	MF: 0.1 µm Tamaño de poro (Alfa Laval) UF: una membrana de corte de 1000 Da de peso molecular (MW) (Alfa Laval)	-	-	
	Graywater treatment technologies and reuse of reclaimed water for toilet flushing. (Xueli Ren, Yanyan Zhang & Hongbin Chen)	Reactor MBR hecho en plexiglas, Volumen 7,5 Litros. Se utilizaron 2 membranas. Flujo de membrana de 16-67-25 L. Tamaño del poro inferior a 0.1 um	-		Tiempo del ciclo de retrolavado 24 h (BAF)

MBR

Membrane bioreactors for sustainable, fit-for-purpose greywater treatment: a critical review. (Daniele Cecconet, Arianna Callegari, Petr Hlavínek & Andrea G. Capodaglio)

-

-

Bombas de aireación para evitar ensuciamiento de membrana. Implementación de campos eléctricos en reactores. Tratamiento químico directo

Comparative study of the microbial quality of greywater treated by three on-site treatment systems. (E. Friedler, R. Kovalio & A. Ben-Zvi)

Base de aireación de 0.1 m³ Compuesta por 2 módulos de 4 flujos cruzados de 8 membranas de UF (BTU-P4V / 02AE; Berghoff GmbH, Alemania)

-

Limpieza periódica de la membrana con hipoclorito y lavado con agua

Application of a low-cost ceramic filter to a membrane bioreactor for greywater treatment. (Md. Mahmudul Hasan, Md. Shafiquzzaman, Jun Nakajima, Abdel Kader T. Ahmed & Mohammad Shafiul Azam)

Filtro de cerámica simple sumergido, mezcla de tierra arcillosa 80% y salvado de arroz 20 %. Tamaño del poro 1-5 µm

Económico

Tradicional para MBR. En caso de requerirlo se puede cambiar el filtro, debido a que no es costoso

Fate of proteins and carbohydrates in membrane bioreactor operated at high sludge age. (Selda Murat Hocaoglua & Derin Orhon)

2 MBR sumergidos. Volumen efectivo de 630 L, Los módulos de membrana eran tipo placa y marco KUBOTA. Área total de membrana 5 m². Material es polietileno clorado CPE

-

-

Fate of soluble residual organics in membrane bioreactor. (Selda Murat Hocaoglu & Derin Orhon)	3 MBR sumergidos. Volumen efectivo de 630 L, Los módulos de membrana eran tipo placa y marco KUBOTA. Área total de membrana 5 m ² . Material es polietileno clorado CPE	-	-
Modeling biodegradation characteristics of grey water in membrane bioreactor. (S. Murat Hocaoglu, E. Atasoy, A. Baban un & D. Orhon)	MF sumergida. Área total de 5 m ² . Material de polietileno clorado con tamaño de poro de 0.4 μ m	-	-
Advanced biological unit processes for domestic water recycling (B. Jefferson, AL Laine, T. Stephenson y SJ Judd)	Cámara bioreactor de metacrilato. Volumen 0.066 m ³ . 2 membranas de polisulfona de placa y marco de 0.24 m ² . tamaño poro 0.4 μ m. Aireación a biomasa	-	-
Performance of a micro-scale membrane reactor for greywater treatment at household level. (Vasileios Diamantis)	Reactor de membrana aireada Volumen 25 L con un módulo de membrana de fibra hueca sumergida (PVDF, diámetro interior / exterior 0,5 / 0,4 mm, tamaño de poro = 0,1 μ m, área de filtración = 1,5 m ²	Bajo costo de capital y operación	Menor mantenimiento por la biodegradación de lodos
Greywater recycling in Vietnam - Application of the HUBER MBR process. (Stefania Paris & Celine Schlapp)	6 módulos (planta HUBER GreyUse). Área de membrana: 18 m ² . Material: PES. Tamaño de poro: 38 nm	-	-

Grey water reclamation by decentralized MBR prototype. (Carme Santasmasas, Miquel Rovira, Frederic Clarens & César Valderrama)	MBR sumergido con un biorreactor volumen de 1200 L y un tanque de cloración de 500 L con dos planos láminas de membranas de polietersulfona (PES) con un tamaño de poro de 50 nm y área total de 7 m ²	El prototipo puede producir 1155 L / día con un consumo de energía de 2,9 kWh / m ³ , que representa 1.8 € / m ³ sirviendo para 40 PE (equivalentes personas)	La limpieza se realizó mediante difusores de aire, empapando las membranas durante 2 h con una solución de hipoclorito de sodio (0,16%)
On the performance of real grey water treatment using a submerged membrane bioreactor system. (Bani-Melhem, K., Al-Qodah, Z., Al-Shannag, M., Qasaimeh, A., Rasool Qtaishat, M. & Alkasrawi, M.)	ZeeWeed-1 Fibra hueca 0,04 µm	-	-
Greywater treatment in a submerged membrane bioreactor with gravitational filtration. (Lamine, M., Samaali, D. & Ghrabi, A.)	A3 con membrana Kubota Plato de grasa Poliétileno 0,4 µm	-	-
Estimated costs of implementation of membrane processes for on-site greywater recycling. (Humeau, P., Hourlier, F., Bulteau, G., Massé, A., Jaouen, P., Gérente, C., Faur, C. & Le Cloirec, P.)	-	-	1. La inspección, mantenimiento y revisión de mecánica y equipo controlador. 2. El suministro de bienes fungibles, incluidos los principales productos químicos. 3. El reemplazo anual de membranas.
Impact of applying	ZeeWeed-1	-	El comportamiento de ensuciamiento se

	electrocoagulation pre-treatment step on grey water treatment by submerged membrane bioreactor. (Bani-Melhem, K., & Smith, E.)	Hollow fiber 0,04 µm			evaluó midiendo la disminución del flujo de permeado con el tiempo. Posteriormente, el retrolavado del módulo de membrana se realizó durante el período de operación. Cada ciclo se operó hasta que el porcentaje de reducción del flujo de membrana del proceso SMBR superó el 90%. Antes de comenzar cada nuevo ciclo, y para restaurar la mayor parte de la permeabilidad de la membrana, se retiraron los módulos de membrana de los biorreactores y se aplicaron limpiezas físicas y químicas según el protocolo descrito por Meng et al.
OI	Gray water recycle: effect of pre-treatment technologies on low pressure reverse osmosis treatment (Veera M. Boddu, , Tias Paul, Martin A. Page, Cristiaan Byl, Laura Ward, Jaime Ruan)	Membranas para uso en unidad de flujo cruzado sepa CF, FILMTEC HRLE 440 y otras.	-	-	
	Permeation of greywater constituents in an aquaporin based biomimetic forward osmosis membrane process: experimental performance and modeling (Ce Wang una & Yongmei Li)	Membrana de ósmosis directa FO biomimética ABBM por Aquapoten company ltd (China)	-		Lavado por 30 min con agua desionizada a velocidad de 5.6 cm/s

	Pilot system of MF and reverse osmosis membranes for greywater reuse (Taísa Machado de Oliveira, Cláudia Telles Benatti & Célia Regina Granhen Tavares)	Film Tec membranes. Área de membrana: 1.2 m ² . Material: Polyamide	-	limpieza química con recirculación de solución alcalina de NaOH a pH 10 durante 10 min. Se detuvo la recirculación y se dejó que la solución actúe dentro del módulo durante 10 min. Este procedimiento fue repetido 10 veces
	Low strength graywater characterization and treatment by direct membrane Filtration (Ramona, Michal Green, Raphael SemiaP & Carlos Dosoretz)	Membrana tubular NF (30 cm de long, 1.25 cm de diámetro interior) Área de filtración de 0.014 m ²	-	-
NF	Membrane process treatment for greywater recycling: investigations on direct tubular nanofiltration (F. Hourlier, A. Masse, P. Jaouen, A. Lakel, C. Ge'rente & C. Faury P. Le Cloirec)	3 membranas tubulares NF instaladas en una planta Microlab 40 (VMA Industries). Material: Poliamida/polietersulfona compuesta. Membranas proporcionadas por PCI Membrane systems (UK)	-	limpieza alcalina durante 60min con 10g/L 21 de Ultrasil 53 (HenkelEcolab), seguido de un enjuague con agua desionizada, un ácido limpieza (pH ¼ 1.4) durante 30 min con 3 g/L 21 de nítricoácido y un enjuague final con agua desionizada
	Pilot system of MF and reverse osmosis membranes for greywater reuse. (Taísa Machado de Oliveira, Cláudia Telles Benatti & Célia Regina Granhen Tavares)	2 fibras huecas sumergidas. MF de empresa PAM membranes. Material: poliamida. Tamaño de poro: 0.4 nm	-	La limpieza de la membrana se realizó manualmente después de cada ciclo de funcionamiento sacando los cartuchos de membrana MF y limpiando la capa de torta acumulada con agua hasta eliminar la torta superficial. Posteriormente se realiza un retrolavado de 20 min a presión de 1 bar. limpieza química de los cartuchos de membrana se habrían llevado a cabo utilizando hipoclorito de

MF	sodio diluido al 0,1%			
	Preparation and characterization of macroporous SiC ceramic membrane for treatment of wastewater (Dulal Das, Sanchita Baitalik, Barun Halder, Rajnarayan Saha & Nijhuma Kayal)	Producida por Grindwell Norton	más costosa que una membrana polimérica	Lavado con n-hexano de acetona y agua para eliminar aceite atrapado en la membrana. Adicionalmente se limpiaron con ácido nítrico e hidróxido de sodio y finalmente fue desionizada para eliminar los restos de productos químicos de limpieza
	Design of a compact and effective greywater treatment system un Malaysia (Zhi Chao Ong, Mohammadjavad Asadsangabifard, Zubaidah Ismail,Jun Hui Tam & Peiman Roushenas)	Reactor compuesto por filtro de membrana, lámparas UV y difusores de burbujas de aireación	-	El mantenimiento (limpieza de filtros) debe realizarse con regularidad para evitar el deterioro del rendimiento de la membrana
	A laboratory-scale graywater treatment system based on a membrane filtration and oxidation process-characteristics of graywater from a residential complex	El tipo de módulo de membrana fibra hueca, y su tamaño de poro fue de 0,4 µm. el material era difluoruro de polivinilo. El modelo de la membrana fue SuperMAK	costoso debido a desinfección con ozono, a comparación UV. Membrana MF más económica que UF o NF	-

	(Joonkyu Kim, Insang Song, Haeseok Oh, Jisun Jong, Joonhong Park, Younkyoo Choung)			
	Greywater treatment in aerobic bio-reactor with macropore mesh filters (Himanshu Kumar Khuntia, Sadiya Hameed, Naveen Janardhana & Hoysall Chanakya)	Filtro de malla de nailon macroporoso (MF) sumergido en biorreactor aeróbico (MMBR). Material MF: nailon. Malla con tamaño de poro: 50 µm y 100 µm	alternativa de bajo costo y menos complejidad del MBR y es adecuado para el tratamiento descentralizado a pequeña escala	MF horizontal se ensució a velocidades relativamente más rápidas que el MF vertical
	Fouling resistant sericin-coated polymeric microfiltration membrane (Vishal Kumar Verma & Senthilmurugan Subbiah)	Membrana de microfiltración de fibra hueca (HFMF) polipropileno PP, recubierta con sericina (mejorar propiedades antiincrustantes)	-	se lavó a contracorriente durante 2 minutos después de cada ciclo de filtración de 50 L de agua. En el modo de retrolavado de agua pura, se pasó el agua pura a través del canal de permeado de la membrana HFMF ($\approx 35 \text{ L h}^{-1}$) y el agua lavada a contracorriente se recogió del lado retenido. Al final de experimento de ensuciamiento, la membrana se limpió químicamente utilizando 0.01 mol L^{-1} solución de NaOH a 25°C
	Membrane chemical reactor (MCR) combining photocatalysis and microfiltration for grey water Treatment (Rivero, M. J., Parsons, S. A., Jeffrey, P., Pidou, M., & Jefferson, B.)	Hollow fibres microfiltration membranes (Millenium pore) 0,05 µm	-	-

GRANULAR ACTIVATED CARBON - MEMBRANE	Advanced filtration in greywater treatment: a modelling approach with water reuse (Kant, S., & Jaber, F. H.)	CR-F: Polyester-Plus, HARMSCO, 50 µm, 20 µm, 10 µm & 5 µm MF: Polyester, HARMSCO, 1 µm & 0.35 µm UF: Membrana de fibra hueca & Polietersulfona, Neo-Pure, 0.025 µm RO: Membrana compuesta de película fina de poliamida, AXEON, >98% retención CF: Bituminosa, CALGON, 12x40 mesh	-	-
MBBMR	Single household greywater treatment with a moving bed biofilm membrane reactor (MBBMR) (Jabornig, S., & Favero, E.)	Fibra hueca Pore size of 0.2 µm	-	-
	Modelling of moving bed biofilm membrane reactors (MBBMR) for on-site greywater Treatment (Jabornig, S., & Rauch, W.)	C-MEM, Austria, Fibra hueca, HDPE Tamaño de poro: 0.2 µm	-	-
GENERAL	A review on greywater reuse: quality, risks, barriers and global scenarios (Arun K. Vuppaladadiyam . Noemi Merayo . Pepijn Prinsen . Rafael Luque .Ángeles Blanco . Ming Zhao)	-	-	-

	Membranes and the water cycle: challenges and opportunities (AG Fane)	MBR Tecnología para tratar AR	-	Para flujos por lote, se requiere mayor gasto energético debido al continuo retrolavado que requieren las membranas
	Grey water in buildings: a mini-review of guidelines, technologies and case studies (Sabino De Gisia, Patrizia Casella, Michele Notarnicolauna & Roberto Farina)	-	-	-
	Greywater recycling: Treatment options and applications (Pidou, M., Mamon, F. A., Stephenson, T., Jefferson, B., & Jeffrey, P.)	-	-	-
	Water recycling at the millennium dome (Hills, S., Smith, A., Hardy, P., & Birks, R.)	FP 200 EM 006 ES 404	-	-
SBR & MMBR	Greywater treatment in aerobic bio-reactor with macropore mesh filters (Kumar Khuntia, H., Hameed, S., Janardhana, N., & Chanakya, H.)	Nylon 100 µm MF (horizontal and vertical) 50 µm MF (horizontal and vertical)	-	-
GDMBR	A low energy gravity-driven membrane bioreactor system for grey water treatment: Permeability and removal performance of organics	UP150 from Microdyn Nadir (Wiesbaden, Germany) Polyethersulfone Nominal cutoff of 150 kDa	-	Membranas vírgenes se limpiaron durante 24 h en agua nanopura para eliminar los reactivos químicos. Ambos sistemas se ubicaron en una habitación con una temperatura

	(Ding, A., Liang, H., Li, G., Szivak, I., Traber, J., & Pronk, W.)		constante de 20 ° C.	
PCBM	Bathroom greywater recycling using polyelectrolyte-complex bilayer membrane: Advanced study of membrane structure and treatment efficiency (Oh, K. S., Poh, P. E., Chong, M. N., Chan, E. S., Lau, E. V., & Saint, C. P.)	Biodegradable chitosan and alginate polymers	-	-
LSDMBR	Development and testing of a low sludge discharge membrane bioreactor for greywater reclamation (Young, S., & Xu, A.)	Polyvinylidene fluoride (PVDF) Hollow fibre (FP-T) 0.2 µm	-	-
METAL MEMBRANA	Reuse of greywater and rainwater using fiber filter media and metal membrane (Kim, R.-H., Lee, S., Jeong, J., Lee, J.-H., & Kim, Y.-K.)	MMFs 5µm, 1µm & 0.5µm	-	-

Apéndice D. Fuente de AG, escalado, tipo de flujo y trenes de tratamiento encontrados en la revisión de literatura.

Nombre del artículo	Tipo de afluente	Tipo de flujo	Escala		TRH	Trenes de tratamiento			
			Piloto	Exp		Pre-Tratamiento	T. Primario	T. Secundario	T. terciario
Evaluation of a portable in-house greywater treatment system for potential water reuse in urban areas. (Shashi Kant, Fouad H. Jaber & R. Karthikeyan)	AG de lavandería, ducha y lavamanos	Batch	x		-	Filtración gruesa (CR-F)	Ultrafiltración (UF)	Microfiltración (MF)	Carbón activado granular (GAC), Ultravioleta (UV) y Ósmosis inversa (RO)
Characterization of dead-end UF of biotreated domestic wastewater. (Ben Lodge, S.J. Judd & A.J. Smith)	AGC Baños de 18 viviendas del campus	Batch	x		107 min	-	Sedimentador	Biotratamiento por filtro biológico aireado BAF	Ultrafiltración (UF)
A pilot application of recycled discarded RO membranes for low strength gray water reclamation. (Jawwad Ahmed & Yousuf Jamal)	AGC lavamanos y limpieza de piso del baño del instituto de ciencias e ingeniería ambientales IESE	Dead-end y Cross-flow Batch	x		80 min	Ultrafiltración (UF)			
Treatment of household	AG	Continu		x	10	-	Tanque séptico	Ultrafiltración	-

grey water with a UF membrane filtration system. (Fangyue Lia, Holger Gulyasb, Knut Wichmanna & Ralf Otterpohl)	asentamiento ecológico	o			min		(T.retención 2 días)	(UF)	
Fouling mechanisms of submerged ultrafiltration membranes in greywater recycling. (Nadine Oschmann, Long D. Nghiem & Andrea I. Schäfe)	AG sintética	Batch	x		-	Ultrafiltración (UF)			
Resources and nutrients oriented greywater treatment for non-potable reuses. (Fangyue Li, Joachim Behrendt, Knut Wichmann & Ralf Otterpoh)	AG asentamiento ecológico	Continuo		x	10 min	-	Sedimentador	Ultrafiltración (UF)	-
Chlorination and coagulation as pretreatments for greywater desalination. (Friedler, E., Katz, I., & Dosoretz, C. G.)	(Ducha y lavabo)	Batch		x	24 horas	-	Cloración o sedimentación	Ultrafiltración (UF)	-
Pre-filtration for enhancing direct	Descarga de lavadoras	-		x	-	-	Prefiltración con fieltro y	Ultrafiltración (UF)	Cloración

membrane filtration of graywater from washing machine discharges. (López Zavala, M. A., Suárez Pérez, L. B., Reynoso-Cuevas, L. & Funamizu, N.)							poliéster comprimido mediante sistema de vacío		
Graywater treatment technologies and reuse of reclaimed water for toilet flushing. (Xueli Ren, Yanyan Zhang & Hongbin Chen)	AG de apartamento de estudiantes (baño y lavadora)	Continuo		x	120-180 min	Filtro 5 mm	Biorreactor de membrana (MBR)	Desinfección con cloro 5 mg/L de NaClO	-
Membrane bioreactors for sustainable, fit-for-purpose greywater treatment: a critical review. (Daniele Cecconet, Arianna Callegari, Petr Hlavínek & Andrea G. Capodaglio)	Baño, lavadero, cocina, lavaplatos y mixto. La calidad depende de las actividades del hogar, tipo de suministro de agua, ubicación y nivel de ocupación.	-	-		16.2 h	Posibilidad de integración con otras tecnologías (ej electrocoagulación, carbón activado) requiere otra tecnología (desinfección con cloro o con UV) para cumplir requisitos de reúso			
Comparative study of the microbial quality of greywater treated by three on-site treatment systems. (E. Friedler, R. Kovalio & A. Ben-Zvi)	AGC de edificio de 7 pisos del campus de Technion	Continuo	x		300-420 min	-	1. Filtración de arena independiente SFEB	2. MBR con membranas UF	Desinfección

Application of a low-cost ceramic filter to a membrane bioreactor for greywater treatment. (Md. Mahmudul Hasan, Md. Shafiquzzaman, Jun Nakajima, Abdel Kader T. Ahmed & Mohammad Shafiul Azam)	AG sintética (shampoo, detergente para ropa y lavaplatos)	Batch	x		2 días	Biorreactor de membrana (MBR)			
Fate of proteins and carbohydrates in membrane bioreactor operated at high sludge age. (Selda Murat Hocaoglu & Derin Orhon)	AG de campus Gebze	Batch		x	21 horas	Biorreactor de membrana (MBR)			
Fate of soluble residual organics in membrane bioreactor. (Selda Murat Hocaoglu & Derin Orhon)	AG de campus Gebze	Batch		x	21 horas	-	Filtración a través de Millipore de 11.000 nm (filtro de red de nailon)	Biorreactor de membrana (MBR)	-
Modeling biodegradation characteristics of grey water in membrane bioreactor. (S. Murat Hocaoglu, E. Atasoy, A. Baban un & D. Orhon)	AG de campus Gebze	Batch	x		21 horas	-	Sedimentador 1. Dos Cribas de 6 mm y 3 mm 2. MBR	Biorreactor de membrana (MBR)	-

Advanced biological unit processes for domestic water recycling. (B. Jefferson, AL Laine, T. Stephenson & SJ Judd)	AG sintètica	Batch	x		-	Biorreactor de membrana (MBR)			
Performance of a micro-scale membrane reactor for greywater treatment at household level. (Vasileios Diamantis)	AG y AG con aditivos	Continuo		x	20 horas	Biorreactor de membrana (MBR)			
Greywater recycling in Vietnam - Application of the HUBER MBR process. (Stefania Paris & Celine Schlapp)	AG fregaderos de cocina y los baños	Continuo		x	-	-	Pantalla de 1 mm	Tanque de compensación	Biorreactor de membrana (MBR)
Grey water reclamation by decentralized MBR prototype. (Carme Santasmasas, Miquel Rovira, Frederic Clarens & César Valderrama)	AG duchas y lavamanos	Batch		x	19.5 horas	1. filtro (1 mm)	2. biorreactor	3. difusores de aire	4. membranas 5. bomba de extracción 6. tanque de cloración

On the performance of real grey water treatment using a submerged membrane bioreactor system. (Bani-Melhem, K., Al-Qodah, Z., Al-Shannag, M., Qasaimeh, A., Rasool Qtaishat, M. & Alkasrawi, M.)	Fue recolectada de un edificio de la facultad de recursos naturales en la Universidad de Hashemite (lavabo y limpieza)	Continuo		x	-	Tamiz fino	Biorreactor de membrana (MBR)	-	-
Greywater treatment in a submerged membrane bioreactor with gravitational filtration. (Lamine, M., Samaali, D. & Ghrabi, A.)	Duchas del complejo estudiantil en la Universidad Agrícola de Tunisia	Batch		x	13 horas	-	Pantalla de acero inoxidable de 0,9 mm	Biorreactor de membrana (MBR)	-
Estimated costs of implementation of membrane processes for on-site greywater recycling. (Humeau, P., Hourlier, F., Bulteau, G., Massé, A., Jaouen, P., Gérente, C., Faur, C. & Le Cloirec, P.)	Agua gris y agua gris sintética	-		x	-	Biorreactor de membrana (MBR)			
Impact of applying electrocoagulation pre-treatment step on grey water treatment by submerged membrane	Se recogió en uno de los edificios de operaciones en el campus de la	Batch		x	15 horas por ciclo	-	Electrocoagulación	Biorreactor de membrana (MBR)	-

bioreactor. (Bani-Melhem, K., & Smith, E.)	Universidad Americana de El Cairo.								
Gray water recycle: effect of pretreatment technologies on low pressure reverse osmosis treatment. (Veera M. Boddu, Tias Paul, Martin A. Page, Cristiaan Byl, Laura Ward & Jaime Ruan)	AG sintética	Cross	x		-	1.filtración de cartucho CF	Membrana de ósmosis	-	-
Permeation of greywater constituents in an aquaporin based biomimetic forward osmosis membrane process: experimental performance and modeling. (Ce Wang una & Yongmei Li)	11 tipos de AG sintética	Cross Batch	x		-	Osmosis inversa (OI)			
Pilot system of MF and reverse osmosis membranes for greywater reuse. (Taísa Machado de Oliveira, Cláudia Telles Benatti & Célia Regina Granhen Tavares)	AG bañeras, duchas, lavamanos, lavadoras y lavaplatos de una vivienda	Continuo	x		30 min	1. Malla de 1mm para retener partículas grandes	Microfiltración (MF)	3. Filtro de carbón	4. Osmosis inversa membrana de OI de 6,1 cm de diámetro proporcionada por las membranas FilmTec T

Low strength graywater characterization and treatment by direct membrane filtration. (Ramona, Michal Green, Raphael SemiaP & Carlos Dosoretz)	AGC proveniente de duchas públicas de un polideportivo	Dead-end		x	150 min	Nanofiltración (NF)			
Membrane process treatment for greywater recycling: investigations on direct tubular nanofiltration. (F. Hourlier, A. Masse', P. Jaouen, A. Lakel, C. Ge'rente & C. Faury P. Le Cloirec)	AG Sintética	Batch	x		180 min	Nanofiltración (NF)			
Pilot system of MF and reverse osmosis membranes for greywater reuse. (Taísa Machado de Oliveira, Cláudia Telles Benatti & Célia Regina Granhen Tavares)	AG bañeras, duchas, lavamanos, lavadoras y Lavaplatos de una vivienda	Continuo	x		30 min	1. Malla de 1mm para retener partículas grandes	Microfiltración (MF)	3. Filtro de carbón	4. Osmosis inversa membrana de RO de 6,1 cm de diámetro proporcionada por las membranas FilmTec T
Preparation and characterization of macroporus SiC ceramic membrane for treatment	AG de cocina	Continuo	x		-	Microfiltración (MF)			

of waste water. (Dulal Das, Sanchita Baitalik, Barun Haldar, Rajnarayan Saha & Nijhuma Kayal)									
Design of a compact and effective greywater treatment system un Malaysia. (Zhi Chao Ong, Mohammadjavad Asadsangabifard, Zubaidah Ismail, Jun Hui Tam & Peiman Roushenas)	3 sitios de AG duchas, lavadora y cocina	Batch	x		-	filtro de cartucho	1.aireación	2.desinfección	3.filtración por membranas en un reactor compacto
A laboratory-scale graywater treatment system based on a membrane filtration and oxidation process-characteristics of graywater from a residential complex. (Joonkyu Kim, Insang Song, Haeseok Oh, Jisun Jong, Joonhong Park & Younkyoo Choung)	AG apartamentos Bundang-Gu, Kyungki-Do, Corea	Continuo		x	-	-	sistema A2O (3 bioreactor(anaeróbico-anóxico-óxico))	- MF membrana	- OP (proceso de oxidación)
Greywater treatment in aerobic bio-reactor with macropore mesh filters. (Himanshu Kumar	AG sintética	Batch	x		1 día	Microfiltración (MF)			

Khuntia, Sadiya Hameed, Naveen Janardhana & Hoysall Chanakya)									
Fouling resistant sericin-coated polymeric microfiltration membrane. (Vishal Kumar Verma & Senthilmurugan Subbiah)	AG sintética y AG de ONGC (Assam)	Continuo	-		-	Microfiltración (MF)			
Membrane chemical reactor (MCR) combining photocatalysis and microfiltration for grey water treatment. (Rivero, M. J., Parsons, S. A., Jeffrey, P., Pidou, M. & Jefferson, B.)	Ducha	Continuo		x	-	-	Fotocatalizador	Microfiltración	-
Advanced filtration in greywater treatment: a modelling approach with water reuse. (Kant, S., & Jaber, F. H.)	Lavaplatos, ducha, lavadora y también, menos del 2% de las muestras fueron de agua gris sintética	Batch	x		-	Granular activated carbon - membrane			
Single household greywater treatment with a moving bed	Agua gris sintética	Batch	x		1 día	-	Combinación de un reactor de biopelícula	MBBMR	-

biofilm membrane reactor (MBBMR). (Jabornig, S., & Favero, E.)							de lecho móvil		
Modelling of moving bed biofilm membrane reactors (MBBMR) for on-site greywater treatment. (Jabornig, S., & Rauch, W.)	Agua gris sintética (volumen diario representado por el consumo de 4 personas en Europa Central)	Batch	x		1 día	-	Proceso de lecho de biopelícula	MBBMR	-
A review on greywater reuse: quality, risks, barriers, and global scenarios. (Arun K. Vuppaladadiyam, Noemi Merayo, Pepijn Prinsen, Rafael Luque, Ángeles Blanco & Ming Zhao)	-	-	-		-	-			
Membranes and the water cycle: challenges and opportunities. (AG Fane)	-	-	-		-	Pretratamiento mediante la inactivación por oxidación avanzada (UV)			

Grey water in buildings: a mini-review of guidelines, technologies and case studies. (Sabino De Gisia, Patrizia Casella, Michele Notarnicolauna & Roberto Farina)	Baño, lavadero, cocina, lavaplatos y mixto. La calidad depende de las actividades del hogar, tipo de suministro de agua, ubicación y nivel de ocupación.	-	-		-	La selección de la tecnología apropiada depende de algunos factores: Escala de operación, uso del agua, socioeconómicos, costumbres y prácticas propias del sitio. Pueden ser tratamiento físico, biológico y químico. Generalmente una etapa de pretratamiento (separación sólido-líquido) y etapa final desinfección
Greywater recycling: Treatment options and applications. (Pidou, M., Mamon, F. A., Stephenson, T., Jefferson, B., & Jeffrey, P.)	-	-	-		-	-
Water recycling at the millennium dome. (Hills, S., Smith, A., Hardy, P., & Birks, R.)	"Lavamanos Agua gris sintética "	Batch	x		-	-
Greywater treatment in aerobic bio-reactor with macropore mesh filters. (Kumar Khuntia, H., Hameed, S., Janardhana, N., & Chanakya, H.)	Agua gris sintética	Batch		x	1 día	MMBR
A low energy gravity-	Agua gris	Batch		x	-	GDMBR

driven membrane bioreactor system for grey water treatment: Permeability and removal performance of organics. (Ding, A., Liang, H., Li, G., Szivak, I., Traber, J., & Pronk, W.)	sintética que representa el agua de ducha y lavaplatos								
Bathroom greywater recycling using polyelectrolyte-complex bilayer membrane: Advanced study of membrane structure and treatment efficiency. (Oh, K. S., Poh, P. E., Chong, M. N., Chan, E. S., Lau, E. V., & Saint, C. P.)	Ducha	-		x	-	-			
Development and testing of a low sludge discharge membrane bioreactor for greywater reclamation. (Young, S., & Xu, A.)	Agua sintética	Continuo		x	-	-	Reactor de lodos activados aeróbicos	LSDMBR	-
Reuse of greywater and rainwater using fiber filter media and metal membrane. (Kim, R.-H., Lee, S., Jeong, J., Lee,	Agua gris usada en la limpieza de pisos en edificios	-		x	-	Membrana de metal			

J.-H., & Kim, Y.-K.)						
----------------------	--	--	--	--	--	--

Apéndice E. Fórmulas para fabricación de AG sintéticas

Tomado de (O’Flaherty & Gray, 2013)

Compuesto	Unidad	Cantidad
Bracklow (bracklow et al. 2007)		
Ammonium acetate	mg L ⁻¹	79.4
Milk powder	mg L ⁻¹	116.2
Starch	mg L ⁻¹	122
Sunflower oil	mg L ⁻¹	29
Yeast extract	mg L ⁻¹	52.2
Peptone	mg L ⁻¹	17.4
NH ₄ Cl	mg L ⁻¹	12.8
Urea	mg L ⁻¹	91.7
KH ₂ PO ₄	mg L ⁻¹	23.4
MgHPO ₄ ·3H ₂ O	mg L ⁻¹	29
CoCl ₂ ·6H ₂ O	μg L ⁻¹	300
CuCl ₂	μg L ⁻¹	40
FeSO ₄ ·7H ₂ O	mg L ⁻¹	5.8
KI	mg L ⁻¹	0.06
MnSO ₄ ·H ₂ O	μg L ⁻¹	320
H ₃ BO ₃	mg L ⁻¹	0.3
Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	mg L ⁻¹	0.12
ZnCl ₂ ·2H ₂ O	μg L ⁻¹	140
Chuang (Chuang et al. 1998)		
Acetate	mg L ⁻¹	37.6
Milk powder	mg L ⁻¹	163.2
Sucrose	mg L ⁻¹	16.2
(NH ₄) ₂ SO ₄	mg L ⁻¹	78

Urea	mg L ⁻¹	30
KH ₂ PO ₄	mg L ⁻¹	6
FeCl ₃	mg L ⁻¹	0.1

Kiso (Kiso et al. 2000)

Skim milk	mg L ⁻¹	333
NH ₄ Cl	mg L ⁻¹	120
K ₂ HPO ₄	mg L ⁻¹	13.4
NaHCO ₃	mg L ⁻¹	583

LaPara (starch based) (LaPara et al. 2006)

Soluble starch	mg L ⁻¹	400
Yeast extract	mg L ⁻¹	10
Casamino acids	mg L ⁻¹	10
NH ₄ Cl	mg L ⁻¹	150
K ₃ PO ₄	mg L ⁻¹	30
Na ₃ PO ₄	mg L ⁻¹	25
CaCl ₂	mg L ⁻¹	60
MgCl ₂	mg L ⁻¹	40
NaHCO ₃	mg L ⁻¹	100
CoCl ₂ ·6H ₂ O	μg L ⁻¹	19
KH ₂ PO ₄	mg L ⁻¹	16
Na ₂ HPO ₄ ·2H ₂ O	mg L ⁻¹	32
FeCl ₃ ·6H ₂ O	mg L ⁻¹	40
NaCl	mg L ⁻¹	60
60NaHCO ₃	mg L ⁻¹	294

Apéndice F. *Dimensionamiento del primer tren de tratamiento a escala de laboratorio*

Tomado de (Álvarez & Bonilla, 2020)



Tanque de sedimentación

Base = 16 cm

Longitud = 61 cm

Altura (Hbl) = 42 cm

Membrana de ultrafiltración

-Tanque

Base = 34,2 cm

Altura = 36,7 cm

Longitud = 30,1 cm

-Membrana de ultrafiltración *Martin Membrane Systems* para caudal de 16 l/h

Material = polímero orgánico PES

Área= 0.45 m²

Separación entre membranas = 6mm

Tamaño de poro nominal ≈ 35 nm

Tamaño máximo de poro = 0.1 μm

Para un tiempo de retención de 120 minutos, el volumen tratado se halla de la siguiente forma:

$$Q = V * Tr$$
$$16 \frac{L}{h} = V * 120 \text{ min}$$

$$V = 32 \text{ Litros}$$

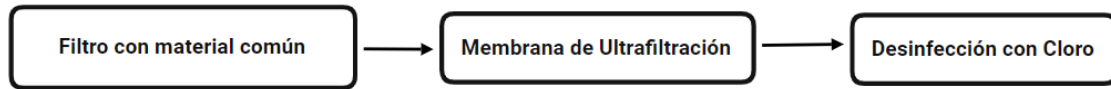
Tanque para desinfección con Cloro

Base = 34,2 cm

Altura = 36,7 cm

Longitud = 30,1 cm

Apéndice G. *Dimensionamiento del segundo tren de tratamiento a escala de laboratorio*



Por factores económicos, de disponibilidad de espacio y facilidad en monitoreo de ambos prototipos de trenes de tratamiento se determinó que el tratamiento secundario (UF) y de desinfección con Cloro tendrá las mismas dimensiones que en el apéndice G.

Prefiltración con materiales comunes

-Filtro

Material = fieltro o poliéster prensado

Implementar un filtro con material común es una alternativa con alto potencial para mejorar el rendimiento de la filtración directa por membrana, ya que permite reducir la tasa de incrustaciones en la membrana y mantiene por un mayor periodo el flujo de AG. Adicionalmente, la prefiltración es un proceso rentable, fácil de operar y sin generación de lodos, por lo que de acuerdo con López Zavala, 2014 (López Zavala et al., 2014) es recomendable su utilización en trenes de tratamiento de AG para viviendas.

-Tanque

Base = 34,2 cm

Altura = 36,7 cm

Longitud = 30,1 cm

