

Nuevas Tecnologías para el Tratamiento de Aguas Residuales Municipales

Johann Arley Suárez Nivia

Ingeniería ambiental

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente-ECAPMA

Universidad Nacional Abierta y a Distancia-UNAD

Diana Marcela Muñoz Nieto

9 de Octubre 2021

Resumen

El agua es uno de los elementos más abundantes en el planeta y por ello es una de las principales materias primas en diversas industrial y en los hogares. Como producto de su uso, una gran variedad de sustancias logra contaminar los caudales hasta el punto de hacerlos inutilizables. Por lo anterior, se han utilizado desde hace algunos años metodologías convencionales que permiten eliminar en un alto porcentaje dichos contaminantes y lograr que las aguas lleguen a fuentes naturales sin contaminantes o con bajas concentraciones de sustancias toxicas para el medio ambiente y los ecosistemas. sin embargo, debido al rápido proceso de industrialización, al consumismo y otros factores, las industrias han empleado nuevas sustancias que son muy nocivas para el agua y que los tratamientos usuales de las PTAR ya no logran mitigar ni reducir su concentración, por ello alrededor del mundo se han propuesto nuevas tecnologías que permitan tratar las aguas residuales y disminuir satisfactoriamente todas las sustancias contaminantes que alteran el ciclo normal de un ecosistema.

Por lo anterior, el presente trabajo tiene como principal objetivo realizar un análisis de las diferentes tecnologías que se han propuesto para el tratamiento de aguas residuales municipales y su aplicación en contextos locales, específicamente en las aguas ubicadas en la Cuenca del Río Bogotá.

Palabras claves: PTAR, Cuenca, Ecosistema, Contaminantes.

Abstract

Water is one of the most abundant elements on the planet and is therefore one of the main raw materials in various industrial and household uses. As a result of its use, a great variety of substances contaminate water flows to the point of making them unusable. For this reason, conventional methodologies have been used for some years to eliminate a high percentage of these pollutants and ensure that the water reaches natural sources without pollutants or with low concentrations of toxic substances for the environment and ecosystems. However, due to the rapid process of industrialization, consumerism and other factors, industries have used new substances that are very harmful to water and that the usual treatments of WWTPs are no longer able to mitigate or reduce their concentration, so new technologies have been proposed around the world to treat wastewater and satisfactorily reduce all pollutants that alter the normal cycle of an ecosystem.

Therefore, the main objective of this work is to analyze the different technologies that have been proposed for the treatment of municipal wastewater and their application in local contexts, specifically in the waters located in the Bogotá River Basin.

Key words: WTRM, Basin, Ecosystem, Pollutants

Tabla de contenido

Resumen	2
Abstact	3
Listado de tablas	6
Lista de figuras	7
Objetivos	8
Objetivo general	8
Objetivos específicos	8
Introducción	9
Capítulo I. Impactos de las aguas residuales sobre el medio ambiente	11
Composición química y microbiológica de las aguas residuales municipales	12
Aguas residuales y su impacto sobre el medio ambiente	14
Políticas para el tratamiento y disposición final de las aguas municipales	22
Capítulo II. Tecnologías para el Tratamiento de Aguas Residuales Municipales	25
Tratamiento convencional de aguas residuales municipales	26
Desarrollos tecnológicos para el tratamiento de aguas residuales	30
Nuevas tecnologías para la filtración	33
Aplicación de nanotecnología para el tratamiento de ARM	38
Avances e investigaciones en el tratamiento de ARM Colombia	47
Aguas residuales como recurso para la generación de energía	57

Capítulo III. Gestión de las aguas residuales municipales en la Cuenca Alta del Río Bogotá

59

Estado de la calidad del agua en la Cuenca Alta del Río Bogotá	60
Manejo municipal de las aguas residuales en la Cuenca Alta del Río Bogotá	65
Análisis del desempeño de los sistemas de tratamiento (STAR)	69
Conclusiones y recomendaciones	74
Referencias bibliográficas	76

Listado de tablas

Tabla 1. Microorganismos presentes en aguas residuales	13
Tabla 2. Compuestos presentes en aguas residuales.	18
Tabla 3. Algunas características membranas de filtración	35
Tabla 4. Comparativo de eficiencia de remoción de contaminantes por tecnologías.	46
Tabla 5. Información PTAR municipios Cuenca Alta	67
Tabla 6. Información STAR municipios Cuenca Alta Río Bogotá	70
Tabla 7. Coeficientes de confiabilidad y objetivos de reutilización de DBO5	72

Lista de figuras

Figura 1. Contaminación de aguas residuales por diferentes fuentes	17
Figura 2. Porcentaje de GEI en diferentes sistemas de tratamiento de aguas residuales	20
Figura 3. Distintos flujos de aguas residuales	27
Figura 4. Espectro rango de filtración.	34
Figura 5. Esquema del modelo de AVF	36
Figura 6. Estructura de los sitios de absorción de láminas de grafeno.	39
Figura 7. Esquema de tratamiento de aguas residuales sedimentación por lastre	45
Figura 8. Cuencas priorizadas en Colombia para descontaminación.	54
Figura 9. Municipios con descargas al Río Bogotá.	61
Figura 10: Resultados campaña de monitoreo CAR 2017	63

Objetivos

Objetivo general

Analizar los avances tecnológicos a nivel mundial relacionados con el tratamiento de aguas residuales municipales y su aplicación en el contexto local.

Objetivos específicos

Revisar información correspondiente a las nuevas tecnologías para el tratamiento de aguas residuales en el contexto internacional y local.

Identificar las condiciones de operación más relevantes en los procesos de tratamiento de aguas residuales municipales.

Reconocer las tecnologías aplicables al tratamiento de los vertimientos municipales que hacen parte de la Cuenca del Río Bogotá.

Introducción

Desde hace algunos años diferentes industrias han empleado el agua como materia prima para el desarrollo de su producción. Estas aguas, que inicialmente son limpias, entran en contacto con una serie de sustancias químicas y por ende al finalizar el proceso están contaminadas y son las aguas que se desechan hacia vertederos de aguas residuales o se trasladan hacia las plantas de tratamientos de agua para extraer un porcentaje de dichos contaminantes. Sin embargo, a pesar de este tratamiento, la mayoría de las aguas provenientes de actividades industriales contienen metales pesados que son de difícil eliminación y tienen un impacto ambiental importante en los ecosistemas acuáticos.

Por lo anterior, es importante, antes de hablar de tratamientos para estas aguas residuales, reconocer su composición tanto química como biológica, según su procedencia y evaluar qué impactos tiene sobre el medio ambiente.

A partir de lo anterior, es necesario resaltar que no todas las aguas residuales presentan una composición idéntica puesto que esto depende de su procedencia, algunas son domésticas, otras han sido utilizadas en industrias agrícolas, de cueros, minería, entre otras y por ello, suelen tener bacterias, sólidos, materia orgánica, nitrógeno, oxígeno disuelto, metales pesados, etc. Este tipo de sustancias y organismos presentes en las aguas residuales genera un impacto específico sobre el medio ambiente, en principio afectan los suelos cercanos al afluente y desde allí, en conjunto con los ciclos biogeoquímicos comienzan a dispersar por el aire diversos contaminantes que conllevan a la formación de lluvia ácida, gases de efecto invernadero, malos olores, generación de vectores para enfermedades, etc.

Se ha demostrado, a partir de una variedad de estudios, que los sistemas de tratamiento de aguas convencionales, en la actualidad, no son capaces de remover de las aguas residuales

contaminantes que han surgido en las últimas décadas debido al rápido avance industrial, por ello, se han propuesto, no solo en Colombia, sino alrededor del mundo, tecnologías alternativas que permiten tener una mejor eficiencia en la remoción de todo tipo de contaminantes y de esta manera, permitir que las aguas residuales sean reutilizables.

Entre las nuevas tecnologías propuestas se pueden encontrar membranas de filtración, nanotecnología, sistemas de múltiple filtración, filtración con magnetita, entre otras, que, en comparación con sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales, se ha encontrado que permiten valores de remoción superiores, permitiendo así que se cumpla con las normativas y se permita que las aguas tengan una reutilización.

Capítulo I. Impactos de las aguas residuales sobre el medio ambiente

Para comenzar es importante definir el concepto de aguas residuales. Según (Suarez et al., 2011), las aguas residuales son aquellas que han sido usadas y contienen sólidos que, por diferentes medios, son llevadas hasta los alcantarillados y pueden provenir de usos domésticos o industriales, sea a nivel urbano o municipal. Estas aguas presentan una composición química y biológica variada puesto que depende específicamente de los usos previos que han tenido.

Composición química y microbiológica de las aguas residuales municipales

Como se mencionó anteriormente, la composición química depende de la procedencia de las aguas residuales, en el caso de las aguas residuales municipales, estas provienen de usos domésticos y en algunos casos industriales, por ello, según los datos reportados en la literatura, se ha estimado que químicamente estas aguas tienen una composición de 99% agua y 1 % sólidos. Del 1% total de sólidos, un 70%, aproximadamente, proviene de residuos orgánicos que varían entre proteínas, carbohidratos y lípidos, y un 30% de residuos inorgánicos entre los que se pueden encontrar sales, algunos metales, compuestos nitrogenados y fosforilados y/o arenas. (Suarez et al., 2011)

En las aguas residuales es común encontrar una diversidad de microorganismos que dan cuenta de ciertas características fisicoquímicas que debe presentar el agua. Así, por ejemplo, es usual encontrar que en estas aguas hay presencia de microorganismos como bacterias, algas, hongos, protozoos y actinomicetos, que es más común en lodos. (Suarez et al., 2011)

Las bacterias se encargan, principalmente de degradar la materia orgánica que está presente en el agua y es usual encontrarlas en aguas residuales domésticas y municipales.

Los hongos son más comunes en las aguas provenientes de procesos industriales puesto que estas presentan valores bajos de pH y tienen baja presencia de nutrientes, lo que permite el crecimiento de estas especies.

Los protozoos se encargan de mejorar la calidad del agua ya que además de degradar materia orgánica también lo hacen con las bacterias. Von Sperling y Chernicharo (2005) proponen una tabla resumen en la cual mencionan los principales microorganismos presentes en las aguas residuales, como se observa en la tabla 1.

Tabla 1.

Microorganismos presentes en aguas residuales

Organismos	Descripción
Bacterias	Presentes en varias formas y tamaños Son los responsables de la estabilización de la materia orgánica Algunas bacterias son patógenas causando enfermedades intestinales
Arqueas	Similar a las bacterias en tamaño y componentes celulares Se diferencia de las bacterias en el material celular ARN Es importante en los procesos anaerobios
Algas	Organismos fotosintéticos autótrofos, contiene clorofila Importante en la producción de oxígeno en los cuerpos de agua y en los procesos de tratamiento de aguas residuales En lagos y reservorios puede proliferar y deteriorar la calidad del agua
Hongos	Predominan los aerobios, multicelulares no fotosintéticos, son organismos heterótrofos Son también importantes en la descomposición de la materia orgánica Pueden crecer en condiciones de baja temperatura y pH
Protozoos	Usualmente organismos unicelulares sin pared celular En su mayoría son aerobios y facultativos Se alimentan de bacterias, algas y otros microorganismos Son esenciales en tratamientos biológicos por que mantienen el equilibrio entre microorganismos Algunos son patógenos
Virus	Organismos parásitos, formados por la asociación de material genético (ADN o ARN) y estructura proteica Patógenos y frecuentemente se dificulta su reducción en el tratamiento de aguas residuales
Helminetos	Los huevos ocasionan enfermedades

Aguas residuales y su impacto sobre el medio ambiente

Teniendo en cuenta lo anterior, es importante analizar entonces, cómo estas aguas residuales, a partir de su composición, tienen un impacto sobre el medio ambiente. Con la creciente densidad poblacional la demanda de agua potable ha crecido significativamente, sin embargo, sólo el 20 % de las aguas residuales municipales es tratada. (Hernández-Padilla et al., 2017) lo cual conlleva a que los impactos ambientales generados por las aguas no tratadas cada vez se tornen más complejos representen a futuro un problema mayor.

En el tratamiento de aguas residuales, la mayoría de las veces lo que se busca es eliminar los sólidos que hacen que el agua tenga una apariencia indeseable, así como los microorganismos que puedan ser perjudiciales tanto para la salud humana, como de los animales que consuman aguas de efluentes en los cuales se hayan descargado las AR una vez tratadas. Sin embargo, algunos contaminantes como el nitrógeno y el fósforo poca prioridad tienen de ser eliminados siendo algunos de los compuestos que mayor afectación tienen sobre el medio ambiente, específicamente sobre los cuerpos de agua, ya que afectan directamente la estabilidad de los ecosistemas, por el incremento de nutrientes en la fuente, que dan a lugar a la eutrofización y en ocasiones pueden afectar la salud humana. (Cárdenas & Sánchez, 2013)

El nitrógeno se presenta en el agua gracias a diversas actividades tanto humanas, como naturales, por ejemplo, la disolución de depósitos ricos en nitrógeno, descomposición de materia orgánica, fijación de procariotas, desechos antropogénicos y aún, por el mismo ciclo natural de este elemento que llega al suelo y efluentes por la contaminación que se presenta en el aire. Entre las principales actividades humanas que ocasionan la deposición de nitrógeno en el agua se encuentran dos fuentes, las orgánicas y las inorgánicas. (Cabello & Hervás Ramírez, 2001)

Una de las fuentes de nitrógeno orgánico más común son las excreciones de los animales, que usualmente contienen una gran cantidad de compuestos nitrogenados que fácilmente se convierten en nitritos o nitratos. Estas fuentes casi siempre son provocadas por la ganadería o el pastoreo, ya que es en estas actividades en las cuales hay mayor acumulación de excretas (Pacheco Ávila & Cabrera Sansores, 2003).

Los fertilizantes, implementados en actividades agrícolas, son una fuente importante de nitrógeno inorgánico en las aguas residuales. Estas sustancias químicas se emplean en la agricultura con el fin de suministrar la cantidad adecuada de nutrientes a los cultivos, ya que, en muchas ocasiones, el suelo tiene deficiencias y no logra suplir dichas necesidades para las plantas (Pacheco Ávila & Cabrera Sansores, 2003).

Los desechos municipales, industriales y de transporte, son quizá una de las mayores fuentes de contaminación por presencia de nitrógeno en aguas superficiales y subterráneas, debido a que estos poseen altas concentraciones de nitrógeno, por ejemplo, los desechos humanos, los desechos de tanques sépticos, la evacuación de desechos sólidos provenientes de botaderos de basura o rellenos sanitarios, desechos de industrias alimentarias, aguas de alcantarillado, entre otras (Pacheco Ávila & Cabrera Sansores, 2003).

El ciclo del nitrógeno no debería ser una de las causas de acumulación de este nutriente en las corrientes de agua, sin embargo, este se ha visto altamente afectado por acciones humanas que han llevado a la producción de gases de efecto invernadero y que han alterado el curso normal del ciclo del nitrógeno, provocando así que las concentraciones de este aumenten en el planeta. (Cárdenas & Sánchez, 2013)

En las aguas es usual encontrar el nitrógeno en forma de urea, por desechos de animales, amoníaco, aminoácidos, creatina, ácido úrico, entre otros, que son compuestos fácilmente

degradables por otros organismos y por procesos biológicos como nitrificación y amonificación, por lo tanto, estos procesos permiten que los compuestos nitrogenados estén presentes, en su mayoría, como iones inorgánicos de amonio, nitrito y nitrato en concentraciones permisibles y no tóxicas para los ecosistemas acuáticos, ni para los humanos que hagan uso de las fuentes de agua. Sin embargo, es usual que en efluentes cercanos a zonas donde se tienen actividades como la agricultura, se presenten niveles más altos, casi tóxicos, de compuestos nitrogenados gracias al uso indiscriminado de fertilizantes (Cárdenas & Sánchez, 2013).

De acuerdo con (Cárdenas & Sánchez, 2013) los problemas por contaminación con especies nitrogenadas en niveles tóxicos son principalmente, el aumento de la acidez del efluente, desarrollo de eutrofización (que puede causar una disminución en los niveles de oxígeno en el agua por el acelerado crecimiento de plantas y atraer vectores infecciosos) y la limitación del uso de aguas debido al aumento en la concentración de nitrógeno tanto a nivel superficial como subterráneo.

Por otro lado, como lo mencionan (Jáuregui et al., 2007) en los cuerpos de agua existen una serie de microorganismos que son los encargados de depurar los compuestos o residuos que no necesita y estos tienen una capacidad máxima que se ve alterada por la adición de residuos de diferentes procedencias, por ello, cuando hay presencia de sustancias orgánicas en el efluente se da inicio a un proceso de descomposición biológica, proceso que consume altos niveles de oxígeno provocando que el oxígeno disuelto disminuya, lo que afecta la calidad de las aguas y el equilibrio de los ecosistemas acuáticos.

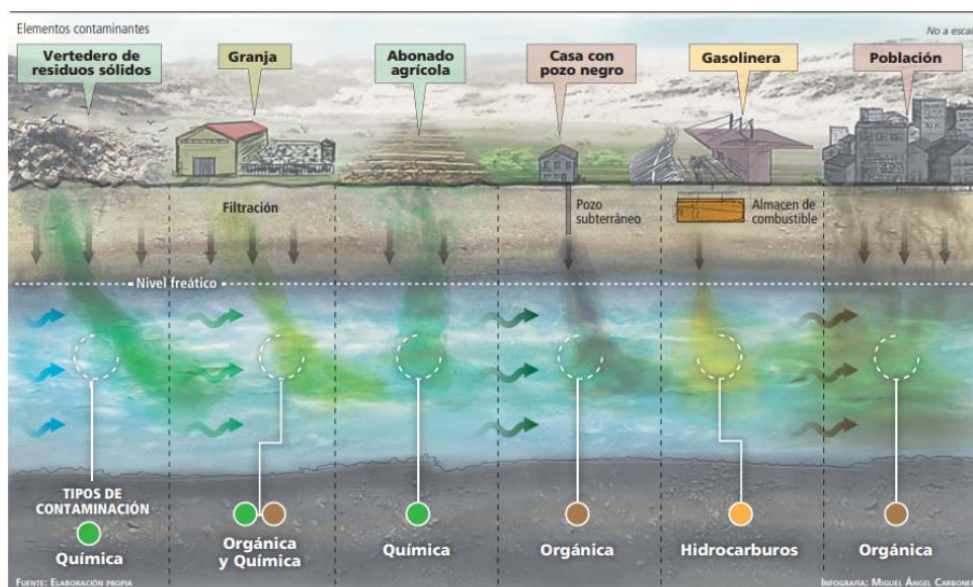
Además de los impactos expuestos anteriormente, (Peña et al., 2001) proponen, a partir de un estudio realizado en una PTAR de aguas residuales, que durante el pretratamiento de las aguas residuales municipales no se lleva a cabo un buen procedimiento y es por ello que al final,

cuando las aguas tratadas son transferidas al efluente que las recibe, tienen altas concentraciones de grasas y aceites, sustancias tóxicas, microorganismos patógenos y otras. La presencia de estos compuestos afecta significativamente los caudales y su autorrecuperación, puesto que los compuestos tóxicos como el mercurio, cobre y otros metales conllevan a que la actividad biológica se inhiba y se destruya. Además, las grasas, los aceites y los detergentes, al formar películas en las superficies impiden el intercambio de oxígeno y, por ende, se ve afectado el efecto de las sustancias o microorganismos que consumen este compuesto.

En la figura 1, se representan algunos tipos de contaminación que se pueden producir en fuentes de agua o en las aguas residuales, dependiendo de su procedencia. (Amengual, 2010).

Figura 1.

Contaminación de aguas residuales por diferentes fuentes



Fuente: (Amengual, 2010).

Además de lo anterior, es común encontrar que las aguas residuales presentan olores desagradables y fuertes que pueden llegar a causar molestias y a la atracción de otros vectores sanitarios. Estos olores son provocados por la presencia de sustancias nitrogenadas, sulfuradas o fosforadas (tabla 2) que tienden a producir compuestos de olor característico. El río Bogotá es un

gran ejemplo de la presencia de dichos olores que son causados por los vertimientos desmedidos que son realizados por parte de empresas de tratamiento de cárnicos, o de las PTAR que no poseen un buen sistema de tratamiento de aguas residuales y los efluentes que son tratados siguen contaminados con compuestos nitrogenados, sulfurados o fosforados (Sáenz et al., 2016).

Tabla 2.

Compuestos presentes en aguas residuales.

Clasificación	Compuesto	Fórmula química	Olor al que se asemeja	Peso molecular g/mol	Composición en el aire ¹ en ppm	Composición en el agua ² ppm	Solubilidad en agua g/ml	Volatilidad a 25 °C Ppm(v/v)
Sulfuros	Metilmercaptano	CH ₃ SH	Repollo podrido	48	10-50	11-322	0.023 ⁴	Gas
	Dimetilsulfuro	(CH ₃) ₂ SH	Ajo	186		3-27		830000
	Sulfuro de hidrogeno	H ₂ S	Huevo podrido	34	200-10.000	15-38	0.005 ⁴	
Nitrogenados	Trimetil amina	(CH ₃) ₃ N	Pescado Amoniaco	59	10-50	78 ³		Gas
	Dimetil amina	(CH ₃) ₂ NH	Amoniaco	45		210 ³	3.54 ⁴	
	Indol	C ₈ H ₇ NH	Fecal	117		570 ³	0.0019 ⁴	360
	Escatol	C ₇ H ₇ NH	Fecal	131		700 ³	Insoluble	200
	Amoniaco	NH ₃	Irritante	17		35-60	0.899 ⁵	Gas
	Compuestos orgánicos volátiles	VOC'S		46-176				

Fuente: (Sáenz et al., 2016).

Los olores, o los contaminantes que generan olores desagradables en las aguas residuales además de causar problemas ambientales, pueden llegar a tener efectos negativos sobre la salud humana al punto de generar lesiones o molestias fuertes, debido a que la mayoría de estos compuestos se consideran tóxicos. De acuerdo con lo mencionado por la OMS, se considera un efecto negativo todo aquello que genere un malestar y que puede ser físico, emocional o mental, por ello se dice que los malos olores tienen efectos negativos sobre la salud humana. (T. Rojas, 2018)

Los principales efectos que tienen en estos compuestos sobre la salud humana son:
(Sáenz et al., 2016)

Irritación en las vías respiratorias

Disminución del apetito

Cefalea

Náuseas

Mareos

Irritación de ojos

Insuficiencia cardiaca (cuando hay exposición a altas concentraciones)

Diarrea

Además, según la OMS, los malos olores generados por las aguas residuales y sus contaminantes atraen insectos que actúan como vectores de algunas enfermedades parasitarias. (World Health Organization, 2013).

Los olores mencionados son producidos, usualmente, por gases que se componen de azufre, nitrógeno y otros, que además pueden actuar como gases de efecto invernadero, casi siempre, como lo mencionan (Cristancho Montenegro et al., 2019), son producidos también por la materia orgánica que es vertida a los caudales de agua después de un tratamiento en una PTAR o a causa de otras actividades como las mencionadas anteriormente.

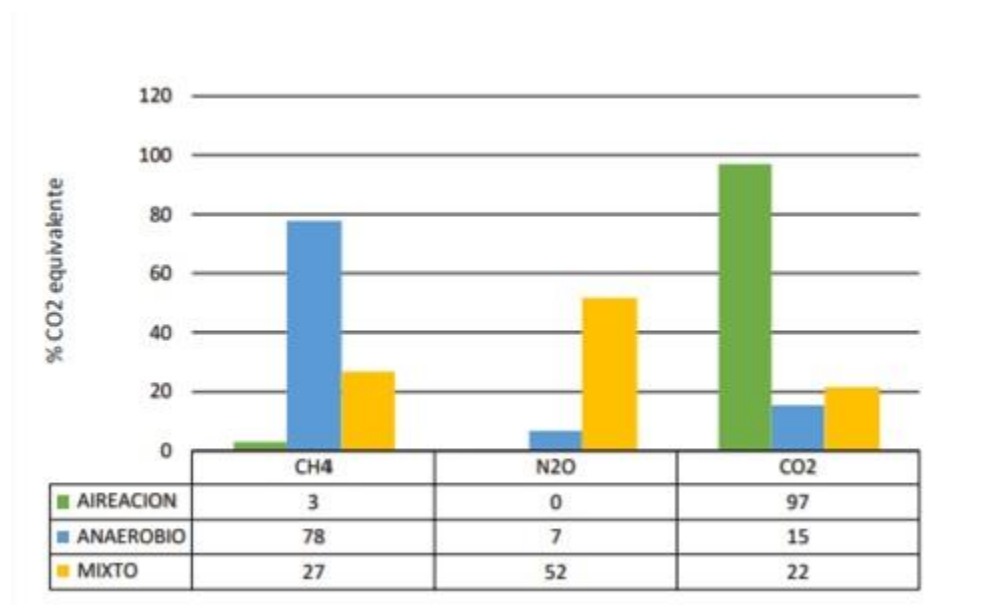
El metano, por ejemplo, es uno de los GEI más comunes en aguas residuales y este es producido por la materia orgánica que se puede degradar y se relaciona también con la temperatura del medio, pues como lo mencionan (Doorn & Irving, 2006) a temperaturas inferiores a los 15 °C es casi imperceptible la producción de este gas, ya que no hay metanógenos activos, mientras que a temperaturas mayores a esta, la producción del gas es significativa. Sin embargo, como lo mencionan (Cristancho Montenegro et al., 2019), el gas metano que se produce en las PTAR o en las aguas residuales, puede recolectarse y emplearse como un generador de energía.

Por otro lado, el óxido nitroso es otro de los GEI que suele emitirse por parte de las aguas residuales, este proviene de la degradación de compuestos nitrogenados que llegan a los efluentes de aguas residuales, como la urea, los nitratos y las proteínas, que casi siempre son producto de desechos humanos o de otras actividades industriales. Es importante resaltar en este punto, que el N_2O es un gas que se emite en las aguas residuales como producto de procesos de nitrificación y desnitrificación de los compuestos mencionados (Doorn & Irving, 2006).

(Cristancho Montenegro et al., 2019), realizaron un estudio en el cual identificaron los principales gases de efecto invernadero (GEI) que son producidos en diferentes sistemas de tratamiento de aguas residuales. Como se observa en la figura 2, los investigadores encontraron que, para sistemas de tratamiento aerobios, el gas que se produce en mayor proporción es el CO_2 , presente en un 97% en el aire, por su parte, en los sistemas anaerobios el metano es el gas de mayor proporción, con un 78% y finalmente, para sistemas mixtos, el monóxido de nitrógeno (N_2O) es el gas más abundante, presente en un 52%.

Figura 2.

Porcentaje de GEI en diferentes sistemas de tratamiento de aguas residuales



Fuente: (Cristancho Montenegro et al, 2019).

Además de lo anterior, (Cristancho Montenegro et al., 2019) encontraron en su estudio que el sistema de tratamiento que más GEI produce es el anaeróbico, encontrando que son los responsables de emitir un 54,19% de estos, mientras que el sistema que menos cantidad de GEI produce es el mixto, emitiendo un 4,11% de los gases. Estas emisiones también se relacionan con el tipo de actividad que hay cerca de las cuencas de aguas o de las PTAR encargadas del tratamiento de las aguas residuales, pues como lo mencionan los investigadores, los caudales o las PTAR que reciben aguas provenientes de actividades como la agricultura, la ganadería, y otras industrias, son zonas en las que más producción de gases de efecto invernadero (GEI) se presentan.

Por otro lado, las aguas residuales municipales también se han visto afectadas por contaminación de metales pesados provenientes de diferentes actividades como la agricultura o la extracción minera. De acuerdo con algunas investigaciones realizadas, algunos de los metales pesados que se encuentran en las aguas residuales son mercurio (Hg), arsénico (As), Plomo (Pb), cadmio (Cd), zinc (Zn), níquel (Ni) y cromo (Cr). (Reyes et al., 2016). Por otro lado, en las aguas residuales también es posible encontrar los denominados contaminantes emergentes, que se definen como aquellos compuestos de diversos orígenes o naturaleza química, cuya presencia en el medio ambiente no es significativa en cuanto a sus concentraciones lo que hace que en análisis o tratamientos de aguas no sean detectados fácilmente, sin embargo, pueden causar daños significativos en el ambiente y la salud humana. Entre los contaminantes emergentes más conocidos en la actualidad se encuentran los plaguicidas, pesticidas, fármacos, productos para el cuidado personal, surfactantes, aditivos alimenticios, nanomateriales, entre otros. (Janet et al., 2012).

Políticas para el tratamiento y disposición final de las aguas municipales

En Colombia, como en otros países, se han planteado una serie de políticas que permiten controlar y vigilar las características de los efluentes de agua que son tanto de vertimientos residuales como de consumo humano. Algunas de estas políticas han sido propuestas en los foros mundiales o en los diversos eventos en los cuales se tratan temas relacionados con las fuentes de agua, que son de interés común no sólo para la comunidad científica, sino también para los gobiernos y especialmente para la población y el medio ambiente.

En 2015, por ejemplo, se realizó una Conferencia de las Naciones Unidas sobre el desarrollo sostenible y en esta, los líderes mundiales propusieron una serie de objetivos que permitan tratar temas como la desigualdad, la pobreza, el hambre y así poder garantizar para el 2030 que la población mundial goce de iguales beneficios, relacionados con la energía, buena salud, energía sostenible, entre otros. Uno de estos objetivos plantea que todos gocen de agua potable y saneamiento, con el fin de combatir la escasez de agua y garantizar un acceso universal al agua potable, por lo que plantean que las naciones, independientes, deben invertir en infraestructura, instalaciones sanitarias y en el fomento de prácticas sanitarias. (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2016)

Por otro lado, en el informe mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos, algunos expertos hablaron sobre las diferentes problemáticas que aquejan al recurso hídrico a nivel mundial, demanda y uso, calidad del agua y saneamiento, en este último ítem, se menciona la importancia del saneamiento de las fuentes de agua para permitir a más personas abastecerse de esta, además de proponer una disposición final para los lodos y permitir obtener energía o fertilizantes a partir de su incineración. (UNESCO, 2019)

Por otro lado, a nivel nacional los diferentes organismos encargados del control de la calidad de las aguas tanto potables como residuales, han planteado diferentes normativas en las cuales expresan claramente algunos parámetros que deben cumplir los cuerpos de aguas residuales una vez han sido tratados en las PTAR para evitar impactos negativos a nivel ambiental. Entre las principales normativas se encuentran:

Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico: en esta política se establecen diferentes objetivos, metas, estrategias y líneas de acción para el manejo del recurso hídrico del país. Con esta política, se busca garantizar la sostenibilidad del agua, proponiendo un uso eficaz y eficiente del agua. Además de lo anterior, en este documento se proponen diferentes instrumentos que permiten la regulación y el control de los recursos y entre estos, algunos planes estratégicos para el monitoreo de las diferentes cuencas hídricas y verificar de esta manera que los parámetros exigidos para las aguas sean cumplidos (MAVDT, 2010).

Otra de las políticas de control de las aguas residuales ha sido planteada en la Resolución 631 de 2015, en la cual se establecen los parámetros y los valores máximos permisibles en los vertimientos a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público. En esta resolución el Ministerio propone los valores de las características de aguas residuales que son permitidos dependiendo del tipo de actividad de la cual provenga el agua, es decir, si es de uso doméstico, agrícola, industrial, entre otras; las características fisicoquímicas de agua que se plantean en este documento son el pH, DQO, DBO, SST, SSED, hidrocarburos, grasas, aceites, compuestos fosforados, nitrogenados, iones metálicos, metales, dureza, color, olor, etc (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

El Decreto Unificado 1076 de 2015 es otra de las políticas que han surgido con el fin de controlar el recurso hídrico en Colombia. En este decreto, se establecen las funciones de los

diferentes organismos encargados de los parques y reservas naturales, de la ANLA, IDEAM, y todas las entidades vinculadas y relacionadas con la investigación, uso y control del recurso hídrico. (Ministerio de ambiente y desarrollo, 2015)

Otra de las políticas importantes relacionadas con el monitoreo de los vertimientos de aguas residuales es la Resolución 1433 de 2004, en la cual se reglamentan los planes de saneamiento y el manejo de vertimientos. En este documento se plantean, básicamente, las directrices que deben seguir quienes sean prestadores del servicio de alcantarillado para presentar ante las autoridades respectivas el Plan de Saneamiento y el Manejo de vertimientos PSMV, teniendo en cuenta la reglamentación establecida en esta y otras políticas que sean expedidas por el Ministerio de Ambiente. (Resolución Número 1433, 2004)

Capítulo II. Tecnologías para el Tratamiento de Aguas Residuales Municipales

Tratamiento convencional de aguas residuales municipales

El rápido crecimiento de la población y la urbanización a nivel mundial, ha conducido a que la demanda de recursos hídricos aumente potencialmente, repercutiendo a la vez en la generación de aguas residuales, término que se define, según (Dursun et al., 2017) como una combinación de uno o más efluentes domésticos como aguas negras, y aguas grises; agua proveniente de actividades industriales, de hospitales, pluviales, escorrentías urbanas, agrícolas, acuícolas, etc.

La generación de aguas residuales es una actividad que en la actualidad se presenta en la mayoría de los países del mundo, siendo el 80% de esta vertida en fuentes de agua natural sin haber recibido un tratamiento previo, con el fin de eliminar sustancias que pueden ser tóxicas y alterar el curso normal del ecosistema, como se mencionó en el capítulo anterior. A pesar del rápido crecimiento de la población, la necesidad de abastecimiento de agua y el desgaste de las fuentes de agua dulce, los gobiernos suelen pasar por alto el adecuado manejo de estas aguas, aun cuando tienen un potencial económico muy alto, como lo menciona (Dursun et al., 2017).

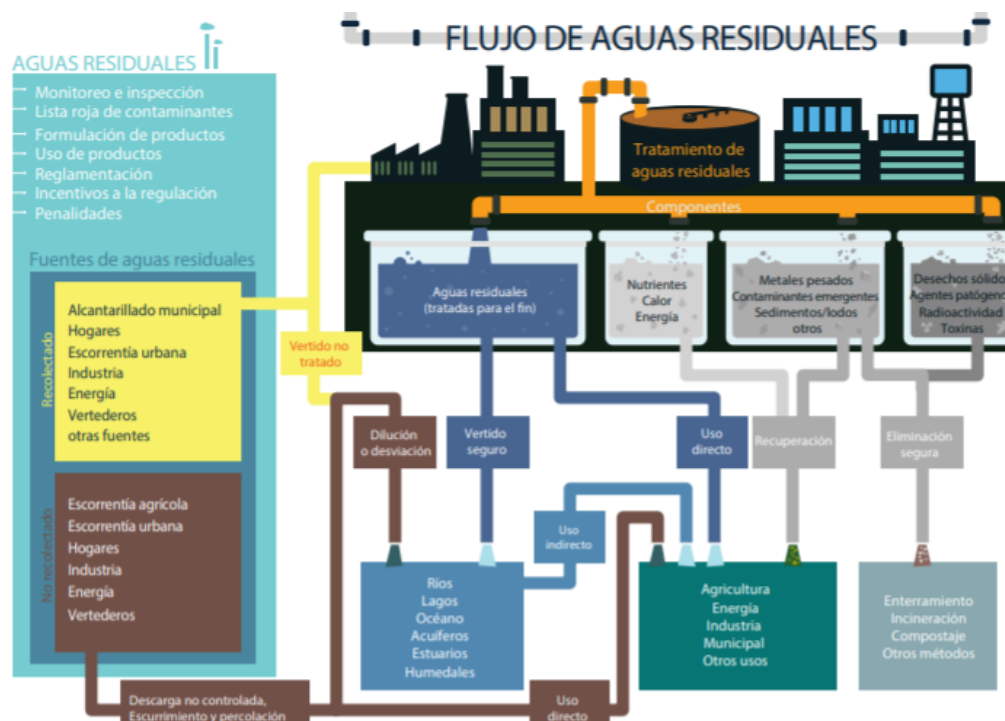
Después de diferentes estudios, algunos autores han llegado a la conclusión de que las aguas residuales son una fuente potencial para el manejo de una economía circular en la cual el desarrollo económico va de la mano del cuidado de los ecosistemas y recursos naturales y el uso de estos de manera sostenible, puesto que las aguas residuales son una fuente importante para permitir a poblaciones vulnerables el acceso al agua, a energía y a otros beneficios importantes. (Dursun et al., 2017).

Teniendo en cuenta lo anterior, es importante mencionar qué formas o técnicas de tratamiento de agua existen en la actualidad en Colombia y otros países del mundo, para el tratamiento de estas aguas residuales y qué usos se les ha dado o se les da a los subproductos que

emergen en cada fase del tratamiento. Sin embargo, antes, es necesario comprender de dónde provienen estas aguas y cómo se realiza su recolección.

Figura 3.

Distintos flujos de aguas residuales.



Fuente: (Dursun et al., 2017).

Como se observa en la figura 3, las aguas residuales son un compendio de efluentes provenientes de diversas actividades humanas, lo cual permite que durante su tratamiento y disposición final se realicen acciones diferentes para cada una, dependiendo su composición y posterior reutilización. Por ejemplo, la recolección de aguas de manera controlada o sistematizada se realiza por medio de alcantarillados, escorrentías urbanas, vertederos, recolectores industriales, entre otras, las cuales son conducidas en su mayoría a las PTAR. Por otro lado, existen algunas fuentes que no son recolectadas de forma controlada, sino que estas van directamente hacia las fuentes de aguas naturales por filtración, percolación o escurrimiento,

como aguas provenientes de actividades agrícolas, lluvias, vertederos, etc. Una vez recolectadas las aguas provenientes de diversas fuentes, se someten a un tratamiento y la disposición final de estas pueden ser hacia fuentes naturales como lagos, ríos, océanos, entre otros o, de acuerdo con la composición final, dispuestas para fabricación de compost, incineradas o enterradas (Dursun et al., 2017).

A partir de lo anterior, es importante comenzar a hablar entonces de los métodos y el proceso en general que se implementa para el tratamiento adecuado de estas aguas, teniendo en cuenta su fuente y composición, es decir, si presentan metales pesados, sustancias radiactivas, residuos agrícolas, etc.

A nivel general, el tratamiento de las aguas residuales municipales suele realizarse en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), en las cuales existe un proceso general en el que se realizan un pretratamiento, tratamiento primario, secundario y terciario.

Pretratamiento: en esta fase se realiza una filtración previa para eliminar residuos sólidos de gran tamaño, grasas, etc.

Tratamiento primario: en esta fase se eliminan entre el 40% y el 60% de los sólidos que esta presentes en el agua.

Tratamiento secundario: se elimina cerca de un 90% de los contaminantes del agua por acción de procesos biológicos.

Tratamiento terciario: se eliminan y tratan los lodos que pueden ser a su vez implementados en generación de biogás.

Este tipo de tratamientos son los que suelen realizarse en las plantas de tratamiento de agua alrededor del mundo. Sin embargo, algunos países han ido incursionando en nuevas tecnologías y técnicas que permiten el tratamiento y la purificación de aguas residuales con el fin

de reutilizarlas con miras a que, en un futuro quizá no muy lejano, las fuentes de agua dulce se agoten y estas las que cubran las necesidades de la población. Teniendo en cuenta lo anterior, se exponen a continuación algunas de las tecnologías que han estado implementando en Europa y Asia.

Desarrollos tecnológicos para el tratamiento de aguas residuales

Los tratamientos convencionales de aguas residuales con el tiempo se han ido enfrentando a diferentes retos como la identificación de nuevos contaminantes que surgen a raíz de nuevas actividades industriales, del rápido crecimiento de la población y otras actividades humanas, lo cual ha llevado a que estas técnicas en la actualidad no sean las más efectivas, impulsando a la investigación y comercialización de diferentes tecnologías que prometen tratamientos más eficientes, pero que desafortunadamente no encajan en los contextos locales, cuando se evalúan diferentes aspectos técnicos, económicos y sociales. Por lo general relacionados a los costos de implementación, operación y mantenimiento.

El costo de implementación y/o inversión inicial se considera como uno de los elementos más importantes para seleccionar un proceso, aunque debe estar completamente relacionado a los costos de operación y mantenimiento con una proyección de vida útil de 20 años. Este aspecto es fundamental para que la inversión perdure y cumpla su función en el tiempo y se pueda evitar incurrir en las mismas situaciones asociadas al abandono de las plantas y a la escasez de recursos para su mantenimiento y operación (Noyola, Morgan, & Güereca, 2015).

Para contrarrestar estas fallas, (Shah, 2016) es uno de los investigadores que propone la implementación de diferentes tecnologías que permitan detectar y tratar contaminantes que con el método convencional no es posible, entre estas se encuentran membranas de filtración, implementación de nanotecnología, tecnología de filtración variable automática (AVF) y pilas de combustible microbianas.

En el mercado se encuentran muchos avances en materia de tecnologías para el tratamiento de este tipo de afluentes. Sin embargo, al evaluar con criterios de peso como son los

asociados a los costos de implementación, costos de operación y mantenimiento, la oferta se reduce sustancialmente.

Además de lo anterior, en la actualidad se ha incrementado la contaminación de aguas residuales por compuestos Contaminantes Orgánicos Persistentes (COPs), los cuales no son degradados por el método biológico convencional que se aplica en las PTAR y son peligrosos en la medida en que, de entrar en contacto con el cuerpo humano o con animales, afecta funciones del sistema hormonal y endocrino. En respuesta a este problema que cada vez se hace menos controlable, investigadores en España han buscado nuevas tecnologías que permitan degradar estos compuestos o adsorberlos para poder separarlos de las fuentes de agua y tratarlos. Los nanomateriales de carbono han sido identificados como eficientes y eficaces en estas tareas y además presentan ventajas como altos valores de área superficial específica, resistencia a diferentes valores de pH, fácil modificación de su estructura con el fin de cambiar su tamaño y forma. Algunos experimentos se han realizado con nanomateriales de carbono como el grafeno; de los diferentes ensayos y análisis se encontró que estos materiales adsorben adecuadamente POPs como Tritón X-100 y compuestos aromáticos clorados. (Arranz, 2017)

En países como Estados Unidos una de las técnicas empleadas para el tratamiento de aguas residuales es el Ozono (O_3), este compuesto es un oxidante fuerte que permite oxidar un gran número de contaminantes tanto inorgánicos como orgánicos que no pueden degradarse durante tratamientos en las PTAR; un estudio realizado por American Water Works Research Foundation (AwwaRF) determinó que gracias al tratamiento con Ozono, de las aguas residuales se redujo un gran porcentaje de compuestos químicos que actúan como disruptores endocrinos (EDC) y residuos de productos farmacéuticos y del cuidado personal (PPCP). (Taylor et al., 2013).

Por otro lado, diversas investigaciones han mostrado alrededor del mundo que el tratamiento de aguas residuales por métodos convencionales no cumple adecuadamente con los estándares que se esperan, permitiendo así el paso de aguas con altas concentraciones de contaminantes que no pueden ser eliminados, o con características y parámetros fisicoquímicos no adecuados a lo que exige la ley. Lo anterior se debe a que, en muchas ocasiones, los procedimientos que se implementan para eliminar los desechos se van haciendo cada vez menos eficaces, ya que, con el avance de la tecnología, la creación de nuevos materiales y el consumismo, han surgido nuevos compuestos químicos que son de difícil tratamiento y eliminación. Para contrarrestar esto, gobiernos como el de Estados Unidos en conjunto con la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) han proporcionado desde el año 2008, avances y técnicas innovadoras relacionadas con el tratamiento de aguas residuales.

Una de las técnicas relacionadas con el tratamiento fisicoquímico de las aguas residuales se basa en el uso de membranas que permitan filtrar sólidos grandes, sistemas en los cuales sólidos de menor tamaño sean sedimentados por gravedad o flotación para que su separación sea óptima y de fácil eliminación, sin necesidad de implementar como base de este tratamiento la biomasa. Además de lo anterior, buscan implementar compuestos químicos que permitan cambiar la naturaleza química de los contaminantes y logren provocar cambios en sus estructuras para que sea más fácil su eliminación, por ejemplo, en la formación de flóculos o partículas de masa considerable que puedan tratarse por medios físicos. (EPA, 2012). Algunas de las tecnologías que se han propuesto para llevar a cabo un tratamiento como el descrito anteriormente son:

Nuevas tecnologías para la filtración

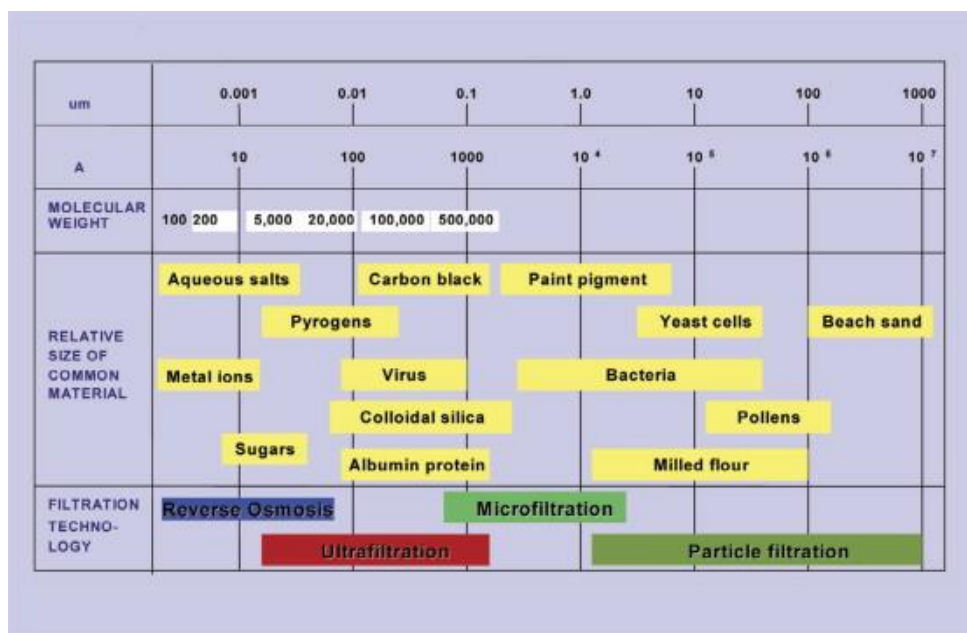
Membranas de filtración: Estas membranas permiten realizar una ultrafiltración que retiene sobre ella contaminantes altamente patógenos como virus y otros organismos que puedan ser perjudiciales para la salud de los animales y humanos. Además de retener patógenos, las membranas de filtración permiten separar especies teniendo en cuenta el tamaño de sus moléculas e iones, lo que ha hecho que sea una tecnología con rápido avance a nivel mundial. Gracias a su eficacia en las separaciones de diferentes compuestos y bajo diversas condiciones, las membranas de filtración son una tecnología que resulta ser más rentable en comparación con otras como las que emplean filtros de prensa o filtros rotatorios al vacío, por ello, otras industrias como las azucareras, de lácteos, textiles, y demás, la han implementado. Todos los procesos de tratamiento de aguas residuales en los cuales se implemente esta tecnología presentan una gran ventaja respecto a otros y es que permiten que haya una correcta filtración y limpieza de las aguas residuales sin necesidad de implementar químicos o componentes extra que puedan interferir en el proceso. Sin embargo, esta tecnología presenta una gran desventaja y es que en la separación de especies no iónicas o de tamaños muy pequeños resulta ser ineficiente, ya que usualmente estas especies pueden penetrar la membrana y continuar contaminando las aguas (Calvo Brenes et al., 2010).

La filtración por membrana es un término que se utiliza para la eliminación de partículas de una corriente de alimentación. Existen dos procesos de filtración por membrana muy conocidos que son la ultrafiltración (UF) y la microfiltración (MF). Aunque, también son conocidos para eliminar las especies disueltas de la corriente de alimentación, la osmosis inversa y la nanofiltración. Como se muestra en la figura 4 el tamaño de poro se encuentra en un rango

aproximado de 0.01-0.02 μm para ultrafiltración y de 0.04-0.1 μm para microfiltración. Esta última puede operar en tamaños de partícula más gruesos.

Figura 4.

Espectro rango de filtración.



Fuente: (Pearce, 2007).

En términos de composición del material de la membrana, las membranas se clasifican como orgánicas e inorgánicas. Las membranas orgánicas son fabricadas de polímeros orgánicos sintéticos, las cuáles se aplican en su mayoría para procesos por presión (microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa). Su composición es básicamente de sustancias como el polietileno (PE), politetrafluoroetileno (PTFE), polipropileno, acetato de celulosa entre otros.

Las membranas inorgánicas según (Ezugbe & Sudesh, 2020) se fabrican de materiales como las cerámicas, metales, zeolitas o sílica. Estos químicos son térmicamente estables y usados ampliamente en aplicaciones industriales como la separación del hidrógeno,

ultrafiltración y microfiltración. En la tabla 3 se presentan algunas características de presión de las membranas y los solutos retenidos.

Tabla 3.

Algunas características membranas de filtración.

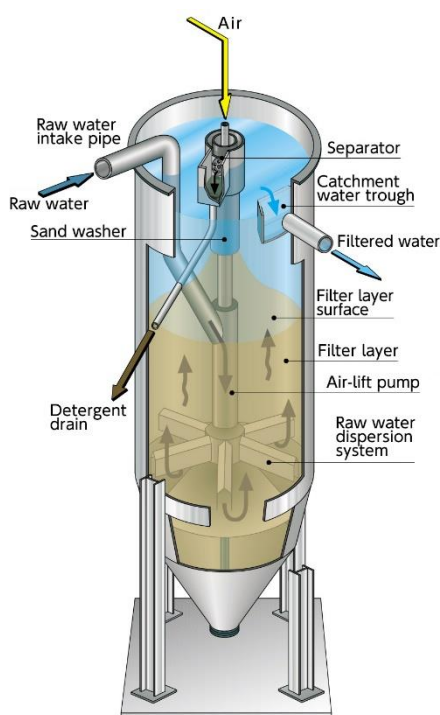
Proceso	Peso molecular (kilo Dalton)	Diámetro retenido (μm)	Presión requerida (bar)	Tipo de Membrana	Permeabilidad promedio ($\text{L}/\text{m}^2\text{h bar}$)	Solutos retenidos
Microfiltración	100-500	10-1-10	1-3	Poroso, asimétrico o simétrico	500	Bacterias, grasas, aceites, coloides, orgánicos, micropartículas.
Ultrafiltración	20-150	10-3-1	2-5	Microporoso, asimétrico	150	Proteínas, pigmentos, aceites, azúcares, orgánicos, microplásticos.
Nano filtración	2-20	10-3-10-2	5-15	Poroso ajustado, asimétrico, composición en película delgada	10-20	Pigmentos, sulfatos, cationes divalentes, aniones divalentes, lactosa, sucrosa, cloruro de sodio
Ósmosis inversa	0.2-2	10-4-10-3	15-75	Semiporoso, asimétrico, composición en película delgada	5-10	Todos los contaminantes incluidos los iones monovalentes

Fuente. (Singh & Hankins, 2016).

Filtración variable automática: Esta tecnología lo que propone es el flujo ascendente del efluente se limpia gracias a un flujo descendente de los medios filtrantes, es decir, el medio filtrante se limpia con el afluente filtrado, permitiendo optimizar el proceso sin que sea necesario realizar tratamientos adicionales, el modelo propuesto para esta tecnología se muestra en la figura 5.

Figura 5.

Esquema del modelo de AVF.



Fuente (Shah, 2016.)

El método AVF emplea filtros de lecho descendente limpiados continuamente integrados en una matriz variable. La configuración de dos etapas del sistema integra dos conjuntos de filtros de medios que pueden funcionar en modo serie o paralelo (Water Technology, 2021).

El proceso entrega agua con una calidad equivalente a la de la tecnología de microfiltración y a una fracción del costo de las membranas de baja presión. No presenta partes móviles y consume menos energía, lo que ofrece ahorros en costos de operación y mantenimientos reducidos.

Esta tecnología puede ser implementada idealmente en el tratamiento de aguas residuales que pretendan ser reutilizadas. Las principales empresas involucradas en el desarrollo de productos y servicios basados en tecnología AVF son especialmente R₂O Water Technologies, Process Research ORTECH (PRO) y Eureka Forbes.

Filtración en varias etapas: durante el tratamiento de aguas residuales suelen encontrarse partículas coloidales en suspensión, lo que dificulta el proceso de purificación y correcta desinfección de las aguas. Para ello, la EPA propone un sistema de filtración en varias etapas o en serie, que permitan que las partículas que no pueden ser filtradas inicialmente, sean retenidas en etapas posteriores, permitiendo así obtener un valor de SST menor que el permitido; el fósforo es una de las partículas de mayor interés en la eliminación o el tratamiento por filtración secuencial, ya que este, en estado metálico, suele formar coloides que no son eliminados adecuadamente. (EPA, 2012).

Aplicación de nanotecnología para el tratamiento de ARM

Existen diferentes tratamientos basados en la nanotecnología, que en la actualidad se están empleando para la remediación de aguas residuales, como son adsorción, biosorción, nanofiltración, fotocatalisis, desinfección, detección y seguimiento.

Esta tecnología propone el desarrollo de membranas a base de nanomateriales que permitan tener un mayor rendimiento y mejores filtraciones, reteniendo metales, óxidos, nanopartículas, compuestos carbonados, entre otros. Estas tecnologías permiten obtener sistemas de recuperación de energía y bombeo.

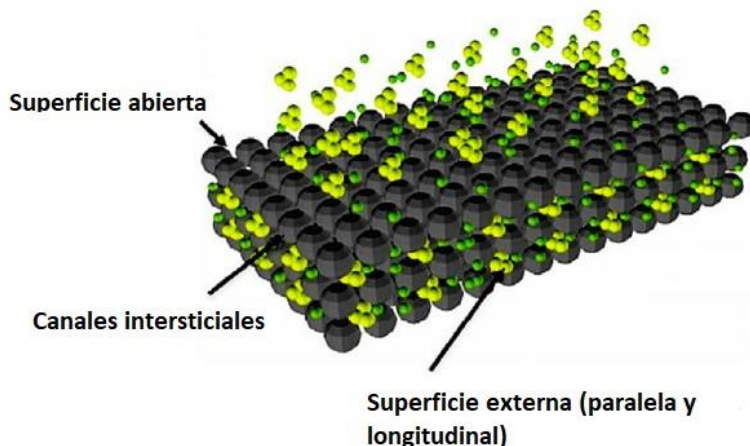
Desde hace algunos años se ha encontrado que la nanotecnología puede ser implementada en diversos campos de las ciencias con el fin de ayudar a solucionar problemáticas que van desde condiciones médicas hasta ambientales, para esta última, la mayoría de las aplicaciones se han hecho en el campo de la purificación y el tratamiento de aguas residuales. Sin embargo, para este tipo de procesos implementar procesos a base de nanotecnología resulta ser más costoso en comparación con otras tecnologías, por ejemplo, las membranas utilizadas deben tener características como alta permeabilidad, selectividad en cuanto a contaminantes, alta resistencia a la adherencia de microorganismos, entre otras. (Sánchez et al., 2012).

En cuanto a materiales, son ampliamente utilizados los nano absorbentes de carbono los cuales son alótropos del carbono, como el diamante, el grafito o los fulerenos. Estos nanomateriales presentan buenas propiedades físicas como su densidad, resistencia y conductividad térmica, que resultan interesantes en la creación de nuevos nanomateriales y pueden absorber compuestos químicos como los antibióticos que, en la actualidad por su uso extendido como medicamentos para combatir diferentes enfermedades, producen problemas de contaminación sobre los ecosistemas de cuerpos de agua receptores. Para diferentes preparados

de materiales se encontró en algunas investigaciones que la capacidad máxima de adsorción puede oscilar en un rango de 113.5 a 596.642 mg/g. La representación gráfica de la estructura y los sitios de absorción de las láminas de grafeno se presentan en la figura 6.

Figura 6.

Estructura de los sitios de absorción de láminas de grafeno.



Fuente. (Keerti, Anand, & et al, 2021).

Aparte de los nanomateriales de carbono, otros nanomateriales ampliamente estudiados, son las nanopartículas metálicas de valencia cero (Ag, Fe, Zn), nanopartículas de óxidos metálicos (TiO₂, ZnO y óxidos de hierro) y nanocompuestos. Según (Haijiao, Jingkang, & et al, 2016), algunos de estos nanomateriales son:

Nanopartículas de plata: No se conoce con claridad el mecanismo de los efectos antimicrobianos de los Ag NP. Sin embargo, se les conoce como buen agente antimicrobiano y se les ha utilizado ampliamente para la desinfección del agua. Según algunas investigaciones los NP de Ag pueden adherirse a la pared celular bacteriana y posteriormente penetrarla, lo que da cambios estructurales de la membrana celular y aumentar su permeabilidad. En los últimos veinte años los NP de Ag en materiales cerámicos han atraído una atención considerable debido a su desinfección y reducción de bioincrustación para el tratamiento del agua en el hogar. Por

ejemplo, la adición de NP de Ag a los filtros de cerámica construidos con arcilla y aserrín han demostrado su capacidad para mejorar la eficiencia de eliminación de *Escherichia coli*.

Nanopartículas de hierro: El hierro presenta muchas ventajas destacadas para el tratamiento de la contaminación del agua, incluidas excelentes propiedades de adsorción, precipitación, oxidación y bajo costo. Por lo tanto, las nanopartículas de hierro de valencia cero han sido las nanopartículas metálicas más estudiadas. Con los efectos de adsorción, reducción, precipitación y oxidación, las nanopartículas de hierro se han aplicado con éxito en la ampliación de una amplia gama de contaminantes, incluidos compuestos orgánicos halogenados, compuestos nitroaromáticos, compuestos orgánicos tintes, fenoles, metales pesados, aniones inorgánicos como fosfatos, nitratos, metaloides y radioelementos. Las desventajas de estos nanomateriales son básicamente la agregación, oxidación y dificultad de separación del sistema degradado.

Nanopartículas de zinc: Aunque la mayoría de los estudios sobre la degradación de contaminantes en el agua y el tratamiento de aguas residuales mediante nanopartículas metálicas de valencia cero se han centrado en el hierro, el zinc también se ha considerado como una alternativa, básicamente para la degradación de compuestos orgánicos halogenados, especialmente CCl_4 .

Nanopartículas de óxidos de titanio (TiO_2): En los últimos años, la tecnología de degradación foto catalítica se ha aplicado con éxito en la degradación de contaminantes en agua y aguas residuales. La mayoría de los fotocatalizadores comunes son semiconductores de óxido o sulfuro metálico, entre los cuales el TiO_2 ha sido el más investigado en las últimas décadas. Debido a su alta actividad foto catalítica, precio razonable, fotoestabilidad y estabilidad química y biológica. Son buenos para la degradación de todo tipo de contaminantes, como compuestos orgánicos clorados, hidrocarburos aromáticos policíclicos, colorantes, fenoles, plaguicidas,

arsénico, cianuro y metales pesados. Además, los radicales hidroxilos generados bajo irradiación UV (nm) permiten que las NP de TiO₂ dañen la función y la estructura de varias células. Las propiedades foto catalíticas del TiO₂ son capaces de destruir las bacterias gram positivas y gram negativas, así como hongos, algas, protozoos y virus.

Nanopartículas de ZnO: En el campo de la fotocatalisis, además de las nanopartículas de titanio, las NP de Zn han surgido como otro candidato eficiente en el tratamiento de agua y aguas residuales debido a sus características únicas, como banda ancha directa y amplia en la región espectral de UV cercano, fuerte capacidad de oxidación y buena propiedad fotocatalítica. Son nanopartículas respetuosas con el medio ambiente ya que son compatibles con organismos, lo que las hace adecuadas para el tratamiento de agua y aguas residuales. Tienen bajo costo frente a las NP de TiO₂. Presenta como desventajas la fotocorrosión, aunque para mejorar la eficiencia de la foto degradación, el dopaje de metales es una estrategia común. Se han probado varios tipos de dopajes metálicos, incluidos los aniónicos, catiónicos, de tierras raras entre otros.

Según (Roy & Bhattacharya, 2015), los costos de la implementación de este tipo de materiales en tecnologías de nanofiltración son variables y dependen del tipo de reactor y la concentración de metales pesados en las aguas residuales. Así, por ejemplo, un reactor continuo multietapa, para la remoción de metales pesados con el uso de nanomateriales, puede costar entre 0,28 y 17 dólares para el tratamiento de 1 litro de aguas residuales con una concentración de 3750 mg/L de metales pesados. Sin embargo, afirma el autor, los costos operativos podrían reducirse si se los esquemas de tratamiento mencionados son escalados al uso regular en plantas de tratamiento de aguas residuales.

Procesos avanzados de oxidación

Los procesos de oxidación avanzada encuentran su aplicación principal en el tratamiento terciario, siendo el objetivo de estos procesos eliminar compuestos difícilmente biodegradables e incluso disminuir la contaminación microbiológica. Las tecnologías de POA tienen la capacidad de oxidar una gran variedad de contaminantes, pudiendo llegar a la mineralización si el proceso se prolonga lo suficiente o quedándose en estados de oxidación intermedios que permitan un acoplamiento con otros métodos de depuración como pueden ser los procesos biológicos (CYTED, 2015).

Los procesos de oxidación avanzada presentan como característica fundamental ser una fuente de radicales hidroxilos (OH \cdot). Este radical, de elevado poder oxidante es capaz de destruir casi cualquier molécula orgánica hasta dióxido de carbono, agua y compuestos inorgánicos. Sin embargo, los procesos avanzados de oxidación para el tratamiento de aguas que contengan contaminantes son costosos, ya que están basados en el uso de fuentes de radiación UV y reactivos oxidantes. Aunque el uso de catalizadores y radiación solar puede contribuir a abaratar estos costos. Algo muy positivo de esta técnica es que la reactividad de los radicales hidroxilos hace que cualquier contaminante persistente sea degradado a moléculas más simples antes de producirse la mineralización completa (Gaya & Abdullah, 2008).

Los radicales hidroxilos oxidan sustancias orgánicas principalmente mediante la sustracción de hidrógeno. Esta reacción genera radicales orgánicos, que mediante la adición de oxígeno, originan radicales intermedios que terminan, por sucesivos pasos oxidativos, en dióxido de carbono, agua y compuestos inorgánicos. Los procesos avanzados de oxidación se dividen en sistemas homogéneos y sistemas heterogéneos, con generación de radicales hidroxilos con o sin radiación ultravioleta.

Sistemas heterogéneos: Se basa en la utilización de un material semiconductor como catalizador, el cual es activado por la luz para generar reacciones que pueden modificar químicamente los contaminantes convirtiéndolos en sustancias más biodegradables o, en muchos casos, logrando la completa mineralización de los mismos. Con este tipo de sistemas, se pueden eliminar sustancias muy tóxicas como PCBs, disolventes halogenados, pesticidas, entre otros.

Sistemas homogéneos: Estos sistemas se caracterizan por ocurrir en una sola fase. En los procesos se utiliza el ozono, peróxido de hidrógeno y el reactivo Fenton como generadores de radicales, en presencia o en ausencia de irradiación luminosa. La desventaja principal de estos procesos es la dificultad de transferencia de una masa significativa de ozono gaseoso hacia la fase líquida. El reactivo ha sido estudiado en tratamientos de efluentes que contienen pesticidas volátiles en presencia o en ausencia de iluminación, especialmente al combinar el reactivo con radiación UV o UV-visible.

Procesos de oxidación avanzados asistidos por microondas: Este tipo de sistemas es aplicado a la remoción de contaminantes emergentes, como lo son los productos farmacéuticos, productos de cuidado personal, pesticidas, tintes orgánicos. Este tipo de sistemas son más eficientes que la calefacción convencional y permite un calentamiento rápido y uniforme, con una transferencia de calor desde el interior hasta el exterior del sistema, con una mayor eficiencia de transformación (80-85%). Las ventajas únicas del MW contribuyen a la remediación ambiental, aunque con limitaciones para la degradación de materia orgánica. En los últimos años han aparecido MW-AOP basados en diferentes sistemas de oxidación, como el sistema de oxidación basado en radicales hidroxilos, el sistema de oxidación basado en radicales sulfatos y el sistema de oxidación binaria persulfato-peróxido de hidrógeno (Huilin, Chengwei, & et al, 2021).

Otros avances

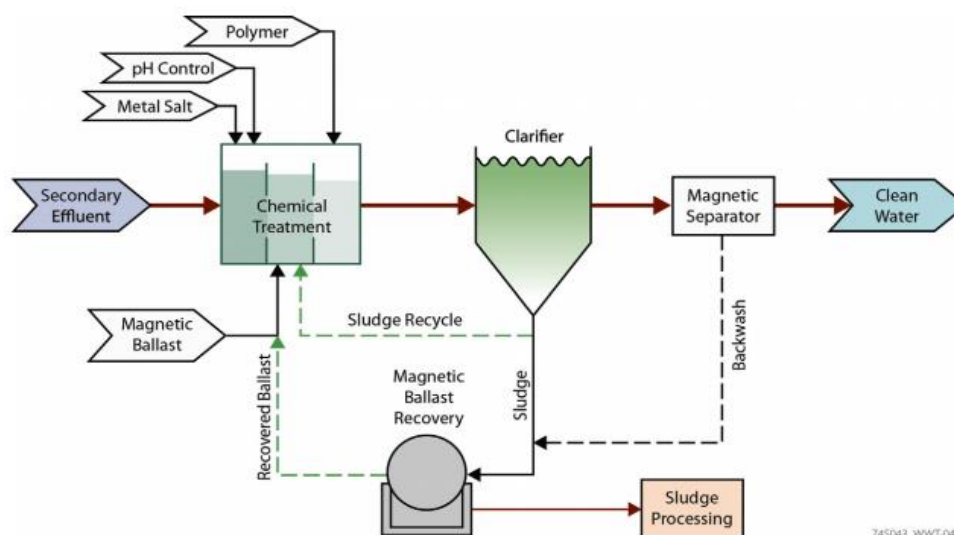
Pilas de combustible microbianas: esta es una tecnología en desarrollo en la que se pretende crear un cultivo de microorganismos que degrade la materia orgánica presente en las aguas residuales y a la vez, la energía que producen los organismos es capturada por un electrodo. Este tipo de celdas son sistemas bio-electroquímicos que se implementan con el fin de cumplir dos objetivos puntuales, el primero es convertir energía bioquímica a energía eléctrica y lograr el saneamiento de soluciones (en este caso aguas residuales) con la degradación de sustratos mediante microorganismos. Las celdas o pilas constan de una cámara en donde se encuentra el ánodo que contiene el sustrato, otra cámara en donde se encuentra el cátodo, una membrana de intercambio de protones y un circuito eléctrico externo que conecta los electrodos. En cuanto a los sustratos y microorganismos implementados en este tipo de tecnologías, se ha encontrado en diversos estudios que son dependientes entre sí, es decir, que los microorganismos a implementar en las celdas dependen del tipo de sustrato que sea el agua por tratar, para que de esta manera se logre un proceso de desinfección adecuado y además se logre generar una energía considerable para que el proceso sea rentable. Además de lo anterior, a partir de diversos estudios se ha encontrado que este tipo de tecnologías son más eficientes para tratar aguas residuales de mediana y baja resistencia, debido a que en estas hay alta cantidad de sustratos fermentativos que los microorganismos pueden consumir (Diguero & Juárez, 2018).

Sedimentación con lastre de magnetita: esta técnica consiste en la formación de flóculos y coágulos que se dan por la adición de magnetita a las aguas que están en tratamiento. Este componente permite que el peso de los contaminantes aumente y con ello la capacidad de coagulación y sedimentación de estos a una velocidad más alta que la que ocurriría con métodos convencionales. Una de las ventajas que presenta este método es que permite recuperar la

magnetita de los lodos y reutilizarla en procesos siguientes. En la figura 7 se presenta el esquema del tratamiento por sedimentación con lastre. (EPA, 2012).

Figura 7.

Esquema de tratamiento de aguas residuales sedimentación por lastre.



Fuente: (EPA, 2012).

En la figura 7 se puede observar que los lodos que contienen sólidos en suspensión se someten a un tratamiento con la magnetita, la cual permite eliminarlos de forma más sencilla durante el tratamiento químico y además, esta se recupera una vez finalizado el proceso cuando el agua está lista y en condiciones deseables para continuar su ciclo.

Por otro lado, en tratamientos de desinfección pueden encontrarse nuevas tecnologías como:

Desinfectantes alternativos: el ácido peracético (PPA) y el BCDMH son dos desinfectantes que se han comenzado a utilizar en países como Canadá y otros europeos debido a su potencial oxidante y su baja toxicidad, lo cual los hace mejores agentes en comparación con el cloro, el cual, en reacciones de desinfección o en tratamientos de aguas residuales suele generar subproductos que pueden ser nocivos para las aguas y todo el efluente en general. (EPA, 2012).

De las tecnologías mencionadas anteriormente, es importante analizar la eficiencia de remoción que presentan, para poder determinar cuál de estas resulta ser más eficiente en el proceso de tratamiento de aguas residuales municipales. En la tabla 4 se presenta un comparativo de dichas técnicas empleando los resultados obtenidos por diversos investigadores en sus estudios.

Tabla 4.

Comparativo de eficiencia de remoción de contaminantes por tecnologías.

Tecnología de tratamiento	Referencia	Eficiencia de remoción (%)							Costos de implementación	Ventajas
		Coliformes ¹	SST ²	DBO ³	DQO ³	SDT ⁵	Turbidez ⁴	Cl residual ⁵		
Membranas de filtración	(Bohorquez & Sarmiento, 2017)	-	100	98			100		Tiene costos relativamente altos	Produce un efluente de alta calidad mediante proceso biológico
Nanotecnología	(García & González, 2019)	-	28,4			98,7	68,8		Costos muy altos	Buena superficie específica y alta capacidad de adsorción para contaminantes orgánicos y bacterias.
Pilas de combustible microbiana	(Racines & Santander, 2016)	-		91,7	97,9				Costosa	Permite obtener energía eléctrica a partir de materia orgánica obtenida en el tratamiento de aguas.
Sedimentación con lastre de magnetita	(S. M. Rojas & Torrado, 2007)	-	76,7		52,1		89,0		Costosa	Permite la remoción de un alto porcentaje de SST
Filtración en varias etapas	(Montoya, 2019)	86,0	67,0	81,7	76,8				Bajo costo	Permite una correcta filtración de residuos sólidos de diversos tamaños y remoción de SST.

1 unidades coliformes, 2 Concentración de SST (mg/L), 3 Concentración de DBO y DQO (mgO₂/L), 4 Unidades de turbidez (NTU), 5

Concentración de cloro residual (mg/L).

Fuente: Elaboración propia con información de diferentes referentes bibliográficos.

Avances e investigaciones en el tratamiento de ARM Colombia

En la actualidad se han implementado diferentes tecnologías para tratamiento de aguas residuales de formas no convencionales, buscando siempre un avance y una mejora en los resultados de las aguas que salen de las plantas, pues diversos estudios han mostrado que no basta con los tratamientos realizados en las PTAR, ya que las aguas tratadas continúan presentando altos niveles de contaminantes. Por ello, es importante mencionar las investigaciones que se han llevado a cabo con el fin de corregir estas falencias y lograr un tratamiento más eficiente en las aguas residuales.

A nivel mundial, gran cantidad de empresas están trabajando en conjunto en el desarrollo de nuevas tecnologías que, como se mencionó anteriormente, permitan descontaminar de manera más eficiente las aguas residuales; Colombia no es un país ajeno al estudio y el desarrollo de estas tecnologías por esto, en este capítulo se mencionan estudios que se han realizado y aplicado en el tratamiento de aguas residuales en otros países, posteriormente, se mencionan los realizados en Colombia para finalmente lograr llegar al análisis de los tratamientos de agua relacionados con la cuenca del río Bogotá.

Teniendo en cuenta lo anterior, (Berge et al., 2011) realizaron una investigación en Estados Unidos la cual se basa en la carbonización hidrotermal de aguas residuales municipales. La carbonización hidrotermal es una nueva tecnología de conversión térmica que permite convertir corrientes de desechos municipales en hidrocarburos esterilizados, lo cual conlleva a una disminución de gases efecto invernadero. Este es un método que se lleva a cabo en humedad, a temperaturas relativamente bajas (oscilan entre 180 °C a 350 °C) y que permite convertir carbohidratos en hidrocarburos. Esta técnica fue empleada en 1913 por primera vez, para producir carbón a partir de celulosa. Este método resulta ser muy eficiente en el tratamiento de

aguas residuales puesto que, cuando este líquido cambia de condiciones físicas, sus propiedades fisicoquímicas se asemejan a las de un disolvente orgánico. Además, porque en estudios previos se ha demostrado que durante el proceso la carbonización una gran porción de carbono permanece en el hidrocarburo, lo cual contribuiría significativamente a la emisión de gases de efecto invernadero.

Este método, a pesar de ser novedoso y aportar significativamente en el tratamiento de residuos y aguas residuales, se ha implementado en materias primas que van desde sustancias puras hasta madera y se ha motivado por la creación de nanomateriales de bajo costo. Además de esto, la carbonización hidrotermal puede degradar o transformar otros compuestos como productos farmacéuticos, disruptores endocrinos, productos químicos para el cuidado de la piel, el cabello, entre otros, que en la actualidad se presentan como un problema ambiental.

Teniendo en cuenta lo anterior, los investigadores tuvieron como objetivo analizar el modelo de carbonización hidrotermal (HTC) en corrientes de desechos municipales, evaluando las implicaciones ambientales del proceso, las propiedades físicas, químicas y térmicas del hidrocarburo y las energías de carbonización asociadas con el flujo de los residuos.

Para el estudio, los investigadores seleccionaron diversos residuos para simular algunos de los que llegan a las corrientes de aguas residuales; entre los residuos empleados se encontraron: papel, residuos alimentarios, residuos sólidos mixtos, comida de conejo, vidrio, plástico, latas de aluminio, todos en diferentes proporciones y los lodos fueron proporcionados por un digestor anaeróbico de una planta de tratamientos residuales. La carbonización la realizaron en reactores de 160 mL, en estos agregaron una carga de los sólidos secos con agua desionizada para concentrar al 20% y se añadieron los lodos en una proporción similar a la de la materia seca. Los reactores se calentaron a 250°C en un horno durante 20 horas. Una vez

terminada la reacción y el enfriamiento, se realizaron análisis de carbono 13, pH, DQO, carbono orgánico total, DBO, volúmenes de gases.

De este estudio los investigadores encontraron que en el agua había presencia de compuestos orgánicos, lo cual se lo atribuyeron a los productos de hidrolisis. Además, parámetros como DQO, DBO y TOC, fueron equivalente a los encontrados en procesos de lixiviación típicos de los vertederos, el pH ácido se lo atribuyeron a presencia de ácidos orgánicos resultantes de procesos de degradación de carbohidratos. (Berge et al., 2011).

Por otro lado, a nivel Colombia, una de las investigaciones que se han llevado a cabo se realizó en la ciudad de Rioacha en el año 2017, esta investigación tuvo como objetivo relacionar el aporte de ciertas especies de plantas acuáticas en la purificación y el tratamiento de aguas residuales. En esta investigación los autores evaluaron cómo las plantas *Pistia stratiotes* y *Eichhornia crassipes* contribuyeron en el tratamiento de aguas residuales municipales en Riohacha, Colombia. Esta investigación se planteó teniendo en cuenta que la fitorremediación es una forma de tratar las aguas residuales biológicamente, empleando plantas y otros organismos vegetales, lo cual resulta ser eficiente y económico. Además, las plantas utilizadas han tenido un amplio espectro en sus usos, ya que estas, principalmente, han sido estudiadas por otros investigadores y tienen una alta actividad fotosintética y su requerimiento de nitrógeno y fósforo es elevado, permitiendo así eliminar, en mayores concentraciones, diversos contaminantes de las aguas residuales municipales.

Para este estudio, los investigadores simularon 6 sistemas para el tratamiento de aguas residuales de los cuales 5 eran de tratamiento y 1 de control, cada uno con una capacidad de 40 L. El tiempo evaluado para la retención fue de 7 días y constantemente controlaron el volumen

de las aguas ya que por la evaporación este podía disminuir un poco. La temperatura a la cual estuvieron expuestos los sistemas fue entre 25 °C y 38 °C.

Para cada sistema los investigadores combinaron las plantas seleccionadas de tal forma que les permitiera evaluar cuál era la más eficiente, empleando combinaciones como:

Sistema 1: 50% con *Pistia stratiotes*

Sistema 2: 50% con *Eichhornia crassipes*

Sistema 3: 50% *Pistia stratiotes* y 50% *Eichhornia crassipes*

Sistema 4: 100 % *Pistia stratiotes*

Sistema 5: 100 % *Eichhornia crassipes*

Sistema 6: control sin plantas.

Las plantas fueron tratadas durante 40 días para lograr una adaptación al sistema y al medio, para ello, el sustrato de las plantas fue cambiando su concentración de agua residual cada dos días variando entre 20%, 40%, 60%, 80% y 100%. Las plantas seleccionadas después de transcurrido el tiempo fueron aquellas que tenían una altura de 25 cm y 15 cm de diámetro. Una vez adaptadas las plantas, estas fueron añadidas a cada sistema durante 30 días, observándose un adecuado desarrollo de raíces y remoción de DQO en un 65 %. Cabe resaltar que el agua empleada para este estudio fue recolectada en la estación de bombeo No. 2 en la ciudad de Riohacha, por medio de la cual el agua llega al mar con residuos ya que no tiene un tratamiento previo.

Para el control de los sistemas, fueron evaluados in situ la temperatura, pH y oxígeno disuelto. En el laboratorio se analizaron parámetros como concentración nitritos, nitratos, amonios, fosfatos, DBO₅, DQO y número más probable de coliformes fecales y totales.

Los investigadores encontraron que no se observó una gran diferencia entre los sistemas que contenían las plantas y el control, por lo cual se concluyó que para el agua residual estudiada y las condiciones del medio no hubo un aporte importante por medio de las plantas en el tratamiento. Sin embargo, encontraron que los sistemas con 100% y 50% de *Pistia stratiotes* y 100% *Eichhornia crassipes* lograron alcanzar buenos niveles de remoción de contaminantes. (Mendoza & Pérez, 2018)

Además de la anterior, en Bogotá investigadores de la Universidad Javeriana diseñaron un bioadsorbente laminar con un hongo de la especie *Phanerochaete chrysosporium*, un hongo que presenta una hipertolerancia frente a metales como Cadmio, Níquel y Plomo, metales presentes en las aguas contaminadas de los ríos. Este estudio lo realizaron con el fin de tratar aguas procedentes de industrias como electroplateado, galvanoplastia, baterías, curtidos, textiles, etc., en las cuales se emplean tintes y productos que contienen los metales de interés en la investigación.

Los investigadores basan su estudio en otros reportados previamente, en los cuales se reporta que el uso de biomasa fúngica inmovilizada es viable para la adsorción y detoxificación de materiales que contengan metales.

Para el estudio se implementaron tres tipos de hongos diferentes: *P. ostreatus*, *T. vesicolor* y *P. chrysosporium*, los cuales fueron activados en cultivos de 8 días a una temperatura de 30 °C y en agar con extracto de salvado que tenía composición de glucosa, peptona, extracto de levadura, fosfato ácido de potasio, sulfato de magnesio heptahidratado, sulfato de manganeso hidratado y extracto líquido de salvado de trigo. Para analizar la tolerancia de las cepas a los metales Cd, Ni y Pb se realizaron dos experimentos, PTBC (prueba de tolerancia a bajas concentraciones) y PTEC (Prueba de Tolerancia a Elevadas Concentraciones). En la primera se

evaluaron rangos de concentración entre 0,02 mg/L y 1,5 mg/L y se midió el crecimiento a los 10 días, mientras que, en la segunda, las mediciones se realizaron diariamente y las concentraciones variaron entre 15 mg/L y 11000 mg/L. Para los análisis se añadieron sales de cloruro de níquel, sulfato de cadmio, acetato de plomo en concentraciones ascendentes.

El bioadsorbente se desarrolló a base de láminas de polietileno con biomasa fúngica y se evaluó su efectividad con columnas de burbujeo usando aguas residuales sintéticas que contenían los metales analizados en una concentración de 300 mg/L. además, se realizó un experimento extra que consistió en agregar la biomasa, agua sintética y metales libres en un matraz a una concentración de 300 mg/L.

Como resultados encontraron que la especie *Phanerochaete chrysosporium* fue la más adecuada para remover los metales, ya que alcanzó a tolerar altas concentraciones de las sales, por lo cual los investigadores concluyeron el desarrollo del sistema laminar a base de la biomasa fúngica de *Phanerochaete chrysosporium* como novedoso y como una alternativa para la remoción de metales en agua, ya que esta especie tolera niveles elevados de metales como Cd, Ni y Pb. (Martí et al., 2010)

A pesar de que en Colombia se han realizado significativos estudios con el fin de encontrar nuevas tecnologías para el tratamiento de aguas residuales, estos se han aplicado a gran escala y tampoco se han mantenido, hasta ahora únicamente se encuentran como investigaciones teóricas. Para poder aplicar y probar la eficiencia de estos desarrollos e innovaciones, diferentes entes de control ambiental como el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial se han enfocado en estudiar las diversas cuencas que hacen parte del territorio con el fin de determinar cuáles de éstas son las más contaminadas y con ello, buscar métodos eficaces y eficientes para su desinfección y/o aplicar los estudios realizados, ya que muchas de estas aguas

son implementadas en diversas comunidades para usos cotidianos. Los resultados de estos estudios han sido registrados en el Plan Nacional de Manejo de Aguas residuales Municipales, en este documento se menciona que en Colombia existen 10 cuencas hidrográficas que están siendo priorizadas para su desinfección, estas se mencionan a continuación: (Ministerio de Vivienda, s.f.)

Cuenca del Río Chinchiná

Cuenca del Río Otún Consota

Cuenca del Río Bogotá

Cuenca alta del Río Chicamocha

Cuenca Ubaté Suarez (Fúquene)

Cuenca Alta del Río Cauca

Cuenca Río La Vieja

Cuenca Río de Oro

Las cuencas mencionadas están situadas en zonas que presentan alta actividad agrícola, minera e industrial, como se observa en la figura 8.

Figura 8.

Cuencas priorizadas en Colombia para descontaminación.



Fuente: Ministerio de Vivienda.

Como se mencionó anteriormente y como se observa en la figura 8 una de las cuencas priorizadas para su desinfección y recuperación del caudal es la del Río Bogotá.

Tendencias en el tratamiento de aguas residuales domésticas

Reúso de aguas residuales

Las aguas residuales no deberían ser vistas como una carga para los gobiernos y la sociedad, sino como una oportunidad económica que puede convertirse en un recurso valioso. En el 2018 el Banco Mundial lanzó la iniciativa “Agua residual: de residuo a recurso” en la región de América Latina y el Caribe para abordar el desafío de las aguas residuales y crear conciencia entre los tomadores de decisiones sobre el potencial de estas como recurso.

Las aguas residuales pueden tratarse hasta lograr diversas calidades para satisfacer la demanda de diferentes sectores, incluidos la industria y la agricultura. Pueden emplearse para mantener el flujo ambiental, e incluso pueden reutilizarse como agua potable. El reúso del agua residual es una solución al problema de escasez de agua. Además, los productos secundarios del tratamiento de las aguas residuales pueden convertirse en valiosos para la agricultura y la generación de energía, haciendo que las plantas de tratamiento de aguas residuales sean más sostenibles ambiental y financieramente (Banco Mundial, 2020).

El reúso del agua residual municipal es una alternativa que cada vez más se adopta en diferentes regiones con problemas de escasez de agua, poblaciones urbanas crecientes y con una mayor demanda de agua de riego (Jaramillo, Cardona, & et al , 2020). Según (Villa Hoyos, 2020) el reúso de las aguas residuales se puede implementar como una medida para enfrentar el estrés hídrico que permita satisfacer la demanda hídrica en diferentes sectores productivos, que consiste en que estas aguas se conviertan en un residuo aprovechable, minimizando la necesidad de demandar recurso hídrico de fuentes de agua que pueden ser destinadas para la potabilización. El reúso del agua se puede clasificar en dos categorías:

Agua reciclada o reutilizada: Aguas residuales tratadas que pueden utilizarse en condiciones controladas para fines beneficiosos dentro del mismo establecimiento o industria.

Agua regenerada o reusada: Aguas residuales tratadas que pueden utilizarse en condiciones controladas para fines beneficiosos tales como riego. El término de agua regenerada o reusada, no siempre se distinguen entre aguas residuales tratadas, parcialmente tratadas o no tratadas.

Aguas residuales como recurso para la generación de energía

Según la descripción que se realizó para la composición química de las aguas residuales en el capítulo 1, es evidente que a nivel mundial existe una problemática muy fuerte para lograr una buena disposición final de los vertimientos que se producen a nivel doméstico e industrial en los centros urbanos y rurales. Todo este panorama actual ha incentivado a los diferentes expertos en el tema a encontrar soluciones basadas en la tecnología para el tratamiento fisicoquímico y biológico con el fin de reducir los impactos sobre el medio ambiente. Aunque, para la mayoría de los casos el tratamiento no es completamente efectivo y la aplicación de esas tecnologías resulta completamente costoso e inoperante a largo plazo.

Considerando todas esas razones, algunos investigadores encontraron que las aguas residuales tienen un potencial interesante para la generación de energía. La humanidad produce alrededor de 380 mil millones de litros de aguas residuales al año y se estima que aproximadamente el 80 % de la energía latente en esas aguas puede ser térmica, el 20 % química y menos del 1 % del potencial existe en la generación hidráulica (Fluence, 2020).

El mundo está trabajando hacia el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, incluido el ODS 6 que tiene como propósito reducir a la mitad las aguas residuales. Como beneficios para la producción de energía a partir de aguas residuales se encuentran:

Producción de energía: El uso de residuos para obtener energía es una forma de energía barata, renovable y fácilmente disponible para muchas ciudades. Dado que las plantas de tratamiento de aguas residuales pueden utilizar biogás generado a partir de sus propios lodos para impulsar sus operaciones, les permite ser autosuficientes energéticamente.

Reducción de emisiones: El metano representa el 16% de las emisiones globales de gases efecto invernadero y es extremadamente potente, unas 30 veces más potente que el dióxido de

carbono. Los sistemas de conversión de lodo a energía aprovechan este metano para obtener energía en lugar de dejarlo escapar a la atmósfera. Aunque el metano libera dióxido de carbono cuando se aprovecha para obtener energía, las emisiones netas son insignificantes si se utiliza biogás rico en metano en lugar de combustibles fósiles.

Gestión de residuos: En algunos países en desarrollo carecen de la infraestructura necesaria para gestionar adecuadamente los residuos sólidos y los lodos. Situación que genera diversas problemáticas ambientales y de salud pública, porque muchos de esos residuos se vierten sin tratamiento en la tierra o en las aguas cercanas. Un enfoque de lodo a energía proporcionaría una solución adecuada.

Beneficios económicos: Los sistemas de conversión de lodo en energía reducen la necesidad de formas de energía más costosas y contaminantes, como los combustibles fósiles. Además, quienes trabajan en operaciones de conversión de residuos pueden beneficiarse directamente desde el punto de vista financiero de la venta del gas y del digestato sólido.

**Capítulo III. Gestión de las aguas residuales municipales en la Cuenca Alta del Río
Bogotá**

.

Estado de la calidad del agua en la Cuenca Alta del Río Bogotá

Durante los últimos años la descontaminación del río Bogotá, se ha convertido en una prioridad para las autoridades ambientales, como parte de las estrategias para recuperar este importante ecosistema hídrico en la zona hidrográfica Magdalena-Cauca. Este río con un trayecto de más de 300 km recorre el Departamento de Cundinamarca de Norte a Sur y beneficia a un número aproximado de siete millones de habitantes. Las estrategias para su recuperación responden a la Sentencia del Consejo de Estado del 28 de marzo del 2014, en la cual se ordenó el diseño y la implementación de medidas para descontaminar el río Bogotá y evitar la contaminación a futuro (MINAMBIENTE, 2014).

La finalidad de la sentencia tiene un enfoque de saneamiento para recuperar y conservar la cuenca hidrográfica del río Bogotá de una manera integral a partir de tres componentes:

El mejoramiento ambiental y social de la Cuenca Hidrográfica del Río Bogotá.

La articulación y coordinación institucional, intersectorial y económica.

La profundización de los procesos educativos y de participación ciudadana.

Si bien, es interesante el aval jurídico como soporte principal para encontrar mecanismos encaminados a recuperar la salud de nuestros cuerpos de agua. En el caso del río Bogotá, las acciones tienen que estar acopladas y articuladas con los diferentes actores involucrados desde la Cuenca Alta hasta la Cuenca baja. Será muy difícil lograr el objetivo, si los esfuerzos se concentran estrictamente en reducir la presión sobre el recurso en la zona urbana o más bien en el área que le corresponde al Distrito Capital.

Es de conocimiento e interés público que el Río Bogotá presenta una contaminación importante en la cuenca alta, desde que atraviesa los municipios de Villapinzón y Chocontá, como consecuencia de los vertimientos de aguas servidas y curtiembres, situación que reduce

desde el inicio de su recorrido la calidad e incrementa la cantidad de contaminantes como materia orgánica, sólidos suspendidos, metales, microorganismos patógenos, entre otros.

Figura 9.

Municipios con descargas al Río Bogotá.



Fuente. (El Espectador, 2016).

En la figura 9 se presenta un mapa con todos los municipios que tienen vertimientos directos al Río Bogotá en la Cuenca Alta. Esta cuenca con una extensión aproximada de 27.809 hectáreas comprende el territorio que va desde el nacimiento del río Bogotá hasta la confluencia del río San Francisco (Embalse del Sisga). Previa entrada a Bogotá el río ha recibido las aguas residuales y residuos sólidos de 18 municipios situados en la parte alta, con un gran número de población urbana, rural y varios complejos industriales (CAR, S.F).

La calidad del agua en la Cuenca alta es monitoreada a través de 32 puntos que hacen parte de la red de monitoreo de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. De acuerdo con el boletín de calidad de la CAR (2017) y según las muestras tomadas durante las campañas de muestreo para el año 2017, se determinó que el cumplimiento frente a los objetivos de calidad no es completo.

Según los determinantes estudiados, se encontró incumplimiento en diferentes puntos frente a los objetivos de calidad asignados a cada clase y usos del agua para cada tramo del río. Para el caso del oxígeno disuelto, considerado como un indicador de vida acuática, se puede decir que prácticamente de los 13 puntos, el 50 % no cumplió con los objetivos de calidad. Lo que se convierte en una situación preocupante y se traduce en una salud pobre para esta fuente hídrica.

Seguido a lo anterior, otro indicador importante de los puntos monitoreados fue el de coliformes totales, si bien, el cumplimiento fue variable entre periodos; los valores más críticos en la primera campaña se reportaron cerca al municipio de Chocontá con un dato de 2.4×10^6 NMP/100 mL. Mientras para la segunda campaña el punto más crítico fue Río Negro con un valor de 2.4×10^7 NMP/100 mL. Los demás parámetros como DBO5, nitritos y nitratos, se presentan en la figura 10, en la cual se puede observar que existe incumplimiento en varios puntos de la cuenca respecto a los objetivos de calidad propuestos para el río Bogotá. Esta situación, puede ser una consecuencia de los tratamientos deficientes en las plantas de tratamiento de los municipios que hacen parte de la Sabana de Bogotá o de los vertimientos industriales.

Figura 10.

Resultados campaña de monitoreo CAR 2017



Fuente. (CAR, 2017).

Por otro lado, en cuanto a contaminantes no convencionales, en el río Bogotá se establecieron como sustancias de interés sanitario contaminantes como el aluminio, boro, cloruros, cobalto, cromo hexavalente, hierro, litio, manganeso, mercurio, molibdeno y níquel. Encontrando que, para la mayoría de ellos, y según informe de la CAR (2017), tanto en los afluentes como en la corriente principal, existe cumplimiento, frente a los objetivos de calidad. Aunque para el manganeso no se evidenció cumplimiento para los puntos de Aguas abajo Río Negro (Punto No. 30) y Estación LG Puente Vargas (Punto No. 32). Para el caso del mercurio, no fue posible realizar el análisis porque los valores de los objetivos de calidad fueron inferiores a los límites mínimos de detección del equipo.

El caso del manganeso que excede los límites de calidad en dos puntos de monitoreo, puede ser una consecuencia de los tratamientos deficientes de algunos vertimientos en industrias, porque es un elemento que se puede encontrar en aguas provenientes de manufacturas como las siderúrgicas, metalúrgicas, abonos, pinturas, cosméticos, etc.

Manejo municipal de las aguas residuales en la Cuenca Alta del Río Bogotá

Diferentes estudios se han realizado desde los años 70's en las aguas del río Bogotá que atraviesan municipios de la cuenca alta del río. Desde entonces, diversos investigadores han llegado a la conclusión de que actividades agrícolas mal tratadas, las curtiembres y otras desarrolladas en estos municipios afectan significativamente la calidad del agua y el subsuelo, ya que, como lo afirmaban en sus estudios, a largo plazo estos residuos afectarían todo el caudal. (Campos Segura, 2010).

Uno de los estudios realizados por (Campos Segura, 2010) consistió en analizar y caracterizar los metales pesados en las aguas de la cuenca alta del río Bogotá. Los investigadores tuvieron como objetivo principal diagnosticar los problemas de contaminación en estas aguas, especialmente por metales pesados como plomo y cromo. El muestreo fue realizado en dos puntos diferentes del municipio de Chocontá en los cuales se tomaron muestras de suelo en los que existen cultivos de arveja, habas y pasto para evaluar si existía un nivel de contaminación por los metales mencionados gracias al riego diario de las plantas. De estos análisis los investigadores encontraron que los suelos no poseían para ese entonces concentraciones elevadas de los metales, menores a 150 mg/kg, lo cual, según organismos como la EPA, no es peligroso, pues estas son las concentraciones que suelen presentarse por acumulación en las arcillas y en suelos con cantidades elevadas de materia orgánica. Sin embargo, en el estudio afirman los investigadores, que la presencia de estos metales en esta zona de la cuenca alta del río Bogotá provenían, principalmente, de las curtiembres que se ubican aguas arriba del río y que, a futuro, las concentraciones de los metales podrían aumentar si no se capacita a las personas sobre la contaminación y si en las plantas de tratamiento de aguas residuales los procesos de desinfección.

Considerando todo lo anterior, es importante mencionar cómo funcionan las plantas de tratamiento de aguas residuales en la cuenca de interés en este capítulo y analizar cómo influyen dichos tratamientos aguas abajo del río. La Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) se ha encargado durante varios años de construir PTAR a lo largo de la cuenca del río Bogotá con el fin de cumplir algunos objetivos dentro de los que se encuentran el cumplimiento de la normatividad para vertimientos y de esta manera brindar protección a la salud de los ciudadanos mitigando la transmisión de enfermedades o la aparición de vectores, reutilización de las aguas y cuidado del medio ambiente. (Carreño & Méndez, 2011).

Es por tal motivo, y en el marco del plan de descontaminación del río Bogotá, que todos los municipios con vertimientos directos e indirectos al río tienen plantas de tratamiento de aguas residuales para la remoción de contaminantes de interés sanitario como materia orgánica, sólidos suspendidos y nutrientes.

De acuerdo con la información que se presenta en la tabla 5, para la mayoría de estos municipios el proceso de descontaminación de las aguas residuales se lleva a cabo con la aplicación de tecnologías para el tratamiento preliminar y secundario. Algunos municipios como Cogua, Gachancipá y Tocancipá cuentan en la actualidad con sistemas de tratamiento terciario para eliminar contaminantes remanentes, en estado coloidal o suspendido.

Tabla 5.*Información PTAR municipios Cuenca Alta.*

Municipio	Tramo de la cuenca	Fuente receptora	Tipo de tratamiento	Tipo de sistema secundario	Caudal de diseño (L/s)
Chocontá	2	Río Bogotá	Preliminar y secundario	Lagunas facultativas (2)	50.0
Suesca	3	Río Bogotá	Preliminar, secundario, manejo de lodos	Laguna facultativa primaria, laguna facultativa secundaria	18.0
Guatavita	3	Embalse Tominé	Preliminar, secundario, manejo de lodos	Lodos activados/Zanjón de oxidación	12.0
Sesquilé	3	Río Bogotá	Preliminar, secundario	Lagunas facultativas	9.98
Gachancipá	3	Río Bogotá	Preliminar, secundario, manejo de lodos, terciario	Laguna facultativa (1), filtros percoladores (2), laguna facultativa (1)	20.0
Tocancipá	3	Río Bogotá	Preliminar, secundario, manejo de lodos, terciario	Lagunas facultativas en serie (2)	36.0
Cogua	4	Quebrada San Antonio	Preliminar, secundario, manejo de lodos, terciario	Lodos activados con aireación extendida, sedimentación activación	26.0
Nemocón	4	Río Checua	Preliminar, secundario, manejo de lodos	Zanjones de oxidación (2), sedimentadores espesamiento de lodos (2)	15.0
Zipaquirá 1	4	Quebrada Salinas	Preliminar, secundario	Laguna anaerobia, laguna facultativa aireada, laguna de maduración	121.99
Zipaquirá 2	5	Río Negro	Preliminar, secundario	Laguna anaerobia y laguna facultativa	165
La Calera	5	Río Teusacá	Preliminar, secundario, manejo de lodos	Reactor SBR, tanque digestor de lodos	32.0
Sopó	5	Quebrada Mi Padre Jesús	Preliminar, secundario	Laguna facultativa	17.0
Cajicá	6	Río Bogotá	Preliminar, secundario	Lagunas aireadas, 3 lagunas facultativas	23.9
Chía	6	Río Bogotá	Preliminar, secundario	Lagunas aireadas (2), laguna facultativa (1)	100
Cota	6	Río Bogotá	Preliminar, secundario, manejo de lodos	Tanques de aireación (2), sedimentadores (2)	5.00

Fuente. (Mejia Puentes & Pérez Novoa, 2017).

En la tabla 5, también se puede observar que los sistemas lagunares como las lagunas facultativas son el tipo de sistema secundario más empleado para el tratamiento de las aguas residuales en los municipios de la cuenca alta. Este tipo de sistemas son recomendables como unidad de tratamiento secundario después de las lagunas anaerobias o aireadas, para cumplir con el propósito de procesar sus efluentes aun grado mayor. Se utilizan en climas fríos, especialmente cuando la carga de diseño es tan baja que permite una adecuada remoción de bacterias (Romero Rojas, 2004).

Sin embargo, este tipo de unidades tienen ciertas desventajas, porque requieren de una superficie relativamente grande, ya que la penetración de oxígeno depende de dos factores: la difusión del aire promovido por el viento y la generación por parte de las algas, que requieren de energía solar (luz) para llevar a cabo su fotosíntesis (Comisión de las Comunidades Europeas, S.F). Otras desventajas, están asociadas a los malos olores, pérdidas de agua por evaporación, tiempos de retención hidráulica extendidos, bajos porcentajes de remoción, contaminación de acuíferos por infiltración, etc.

Las principales ventajas para las lagunas facultativas según estudio de la (Comisión Nacional del Agua, 2007) están relacionadas a los bajos consumos de energía, bajos costos de operación, mantenimiento sencillo, equipos y accesorios simples, amortiguamiento de picos hidráulicos, remoción eficiente de bacterias patógenas, etc.

Análisis del desempeño de los sistemas de tratamiento (STAR)

Si bien, la implementación de estos sistemas de tratamiento representa un gran avance en materia de gestión ambiental a nivel municipal y departamental, son muchos los desafíos a los que se enfrentan las autoridades ambientales para descontaminar el río Bogotá. Situación que suscita la gestión de recursos del estado y de cooperación internacional para mejorar las capacidades técnicas y operativas de las plantas de tratamiento.

En un estudio realizado por (Carreño & Méndez, 2011) se estudió la confiabilidad de las plantas de tratamiento de aguas residuales en la cuenca alta y media del río Bogotá. En su estudio, los investigadores analizaron datos de 5 años, obtenidos de 14 Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) ubicadas en zonas diferentes como: Cajicá, Cogua, Chía, Chocontá, Gachancipá, Madrid I, Madrid II, Mosquera, Subachoque, Suesca, Tocancipá Tabio y Zipaquirá I y II. En este estudio, los investigadores tuvieron en cuenta los valores de DBO Y SST de los caudales de entrada y de salida, para analizar la confiabilidad de las plantas teniendo en cuenta el porcentaje de remoción. En la tabla 6 se presentan algunos de los datos analizados por los investigadores:

Tabla 6.

Información STAR municipios Cuenca Alta Río Bogotá.

PTAR	Caudal promedio(L/s)	DBO(mg/L)			SST(mg/L)		
		Afluente	Efluente	Eficiencias (%)	Afluente	Efluente	Eficiencias (%)
Cajicá	35	252	21	92	148	31	79
Chía	36	258	55	79	205	59	71
Chocontá	35	166	28	83	183	40	78
Cogua	17	173	20	89	132	31	77
Gachancipá	30	285	28	90	238	34	86
Madrid 1	50	306	36	88	236	72	69
Madrid 2	15	320	79	75	339	95	72
Mosquera	80	259	66	75	220	75	66
Subachoque	8	276	56	80	169	64	62
Suesca	15	430	63	85	689	109	84
Tabio	13	251	55	78	268	57	79
Tocancipá	35	324	34	90	238	41	83
Zipaquirá 1	20	260	50	81	290	82	72
Zipaquirá 2	63	297	42	86	319	65	80

Fuente: (Carreño & Méndez, 2011).

Como se observa en la tabla 6, 10 de 14 PTAR analizadas para la época presentaban eficiencias mayores al 80% en remoción, lo cual estaba acorde y era permitido por los parámetros establecidos en las normativas. Por ejemplo, teniendo en cuenta la resolución 631 de 2015, el vertimiento de las aguas tratadas cumple con lo establecido en el artículo 8 para el parámetro DBO, ya que las 14 plantas analizadas cumplen con un fluente que presenta DBO menor a 90 mg/L, sin embargo, para SST, solamente 13 de las 14 plantas cumple con el máximo permitido, que es menor o igual a 90 mg/L y una sobrepasa los límites (Resolución 631 de 2015, 2015).

Por otro lado, teniendo en cuenta el Decreto 1076 de 2015, para la remoción de SST solamente 4 de las 14 plantas analizadas cumple con la normativa ya que en esta se exige que la

remoción sea mayor al 80%, para DBO, 10 de las 14 cumple con el parámetro ya que superan el 80% de remoción. (Ministerio de ambiente y desarrollo, 2015)

Con estos datos los investigadores realizaron una serie de análisis estadísticos que les permitieron determinar la confiabilidad de los tratamientos en dichas plantas; de estos análisis obtuvieron los datos presentados en la tabla 7. Para la interpretación del coeficiente de confiabilidad los investigadores ajustaron una distribución normal teniendo en cuenta datos de DBO y DQO de efluentes de cada sistema de tratamiento de aguas durante 5 años. Con esta distribución obtuvieron un parámetro objetivo con base en las normativas de la EPA de reutilización de aguas residuales con nivel de confiabilidad del 80%, es decir, se basa en que los porcentajes de remoción sean superiores a este porcentaje, de allí que los estándares objetivo sean de 10 mg/L y 30 mg/L de DBO₅ y SST.

Con los datos determinados, los investigadores llegaron a la conclusión que de las plantas que cumplía con el objetivo y, por ende, su confiabilidad en el tratamiento de aguas residuales eran las de Cajicá, Cogua, Chocontá y Gachancipá, por el contrario, los otros sistemas estudiados no cumplían con la norma específica y por ello se determinó que no son buenas fuentes para el tratamiento de las aguas residuales.

Tabla 7.

Coefficientes de confiabilidad y objetivos de reutilización de DBO₅.

PTAR	Coefficiente de Confiabilidad	Coefficiente de variación	Parámetro Objetivo 10 mg/L	Parámetro Objetivo 30 mg/L	Media geométrica
<i>Cajicá</i>	0,89	0,81	8,86	26,59	20,74
<i>Chía</i>	0,91	0,98	9,11	27,32	54,7
<i>Chocontá</i>	1	0,53	9,98	29,93	28,86
<i>Cogua</i>	1,02	0,61	6,85	20,54	20,48
<i>Gachancipá</i>	0,88	0,78	8,83	26,5	28,57
<i>Madrid 1</i>	0,75	1,85	7,53	22,59	36,64
<i>Madrid 2</i>	0,71	0,81	7,08	21,24	78,61
<i>Mosquera</i>	0,7	0,95	7,02	21,06	66,01
<i>Subachoque</i>	0,87	0,56	8,71	26,14	56,89
<i>Suesca</i>	0,71	0,74	7,13	21,4	63,51
<i>Tabio</i>	0,88	0,73	8,78	26,35	55,43
<i>Tocancipá</i>	0,72	0,66	7,23	21,68	33,76
<i>Zipaquirá 1</i>	0,71	1,38	7,14	20,13	68,6
<i>Zipaquirá 2</i>	0,7	0,9	7,03	21,1	41,8

Fuente: (Carreño & Méndez, 2011).

El estudio mencionado puede tenerse como referencia para comprender por qué las aguas de la cuenca media y baja del río Bogotá presentan elevados índices de contaminación, puesto que desde los municipios cercanos al nacimiento del río no se realiza un buen uso de las aguas, ni un buen tratamiento de desinfección de estas en las respectivas PTAR, lo que se suma a todos los factores contaminantes que acompañan al río a lo largo de su cauce.

Por otro lado, algunos artículos presentados por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) muestran resultados de análisis de operación de PTAR ubicadas en la cuenca alta del río Bogotá. Para mencionar algunos de los resultados obtenidos se encuentra que:

Entre las plantas de tratamiento de aguas residuales de la cuenca alta del río Bogotá se encuentran las de Cajicá, Chía Chocontá Facatativá, Funza, Gachancipá, Guatavita, Madrid, Mosquera, Sesquilé Sopó, Subachoque, Tocancipá y Zipaquirá. (CAR, 2008) Algunos análisis realizados los resultados de los tratamientos de aguas residuales en estas plantas demuestran que

la calidad de estas no es la adecuada según lo que exige la normatividad. En estos estudios es posible encontrar, por ejemplo, que en la PTAR de Gachancipá que los índices de DQO están por encima de los límites permisibles para este parámetro en las aguas tratadas; en Tocancipá valores de DQO Y SST superan significativamente a los permitidos, mientras que BDO y Oxígeno disuelto están entre las medidas permitidas. En la PTAR de Subachoque el único parámetro adecuado es el de DBO, mientras que los demás están desfasados.

De lo anterior es posible mencionar y analizar que, al igual que en el estudio realizado por (Carreño & Méndez, 2011), las aguas que son tratadas en las PTAR mencionadas no cumplen a cabalidad con los parámetros exigidos en las normativas mencionadas en capítulos anteriores, lo cual es preocupante, ya que muchas de estas aguas son utilizadas para cultivos o actividades que requieren contacto directamente humano, por esto es importante preguntarse si los procedimientos que se llevan a cabo en las plantas permiten remover y tratar completamente los contaminantes de estas aguas o simplemente permiten descontaminar una porción de la masa de agua que ingresa. Además, permite visibilizar que en la actualidad es necesario implementar nuevas tecnologías que permitan remover de manera más eficiente los contaminantes que afectan las aguas y que impiden su reutilización.

Conclusiones y recomendaciones

A nivel mundial se ha encontrado que los tratamientos para aguas residuales convencionales actualmente son ineficientes en cuanto a la depuración de contaminantes que han aparecido debido al avance de la industria, como compuestos de derivados orgánicos, metales, organoclorados y demás, lo cual ha generado un gran impacto a nivel ambiental ya que no solo los ecosistemas acuáticos se han visto afectados sino también los terrestres. Esto ha llevado a que diversos investigadores propongan nuevas tecnologías que permitan la reducción máxima de dichos contaminantes en las aguas residuales municipales, de lo cual se ha encontrado que las tecnologías basadas en membranas de filtración, nanotecnología o la sedimentación múltiple son más eficientes que las convencionales para el tratamiento de las aguas residuales.

Diversos estudios han demostrado que las tecnologías que se basan en los nanomateriales para el tratamiento de aguas residuales resultan ser eficientes y permiten el tratamiento de diferentes materiales que las tecnologías convencionales no permiten, tal es el caso de las nanopartículas de Ag que tienen alto poder antimicrobiano, nanopartículas de Fe , Zn y TiO₂ que son capaces de degradar contaminantes halogenados y metales pesados.

Teniendo en cuenta las tecnologías analizadas, es posible concluir que la mayoría de estas requieren que las aguas a tratar tengan variables como pH, el tipo de materia orgánica que se encuentra estas, parámetros como DBO Y DQO y un tamaño de partícula determinado, pues de ello depende la eficiencia del método y el costo.

Para el tratamiento de las aguas residuales de la Cuenca alta del Río Bogotá, se encontró, en los artículos relacionados, que las tecnologías que mejor permitirán la descontaminación de estas aguas deben estar basadas en las membranas de filtración, puesto que a estas aguas llegan residuos de industrias agrícolas o de cueros agregando nuevos contaminantes al agua que las

membranas permiten tratar mejor de que, los tratamientos de las PTAR que se ubican en los diferentes municipios que rodean la cuenca.

Teniendo en cuenta el análisis realizado, en la Cuenca alta del Río Bogotá, cerca de 10 plantas de tratamiento de aguas residuales, ubicadas en los municipios de Cajicá, Chocontá, Cogua, Gachancipá, Madrid, Subachoque, Suesca, Tocancipá y Zipaquirá, cumplen con las condiciones establecidas en la Resolución 631 de 2015 y el Decreto 1076 de 2015, en los cuales se exige que la eficiencia en remoción sea mayor al 80 % en cuanto a parámetros como DBO Y DQO.

Es importante realizar más estudios en los cuales se permita analizar la viabilidad y la eficiencia de la implementación de nuevas tecnologías en diversas PTAR que tratan las aguas residuales provenientes de la Cuenca Alta del Río Bogotá, ya que, hasta hoy, la mayoría de estas realizan tratamientos convencionales que no permiten una correcta desinfección de las aguas, aumentado así el nivel de contaminación del efluente principal que es el Río Bogotá.

Como recomendación, las PTAR que reciben las aguas residuales podrían diseñar un modelo que permita tratar los efluentes teniendo en cuenta los tipos de contaminantes que llegan a las aguas residuales provenientes de los municipios que rodean la Cuenta alta del Río Bogotá, ya que esto permitiría implementar tecnologías y metodologías más eficaces y reducir costos.

Referencias bibliográficas

Amengual, L. (2010). *Nitratos en las aguas subterráneas*. <https://www.lenntech.es/agua-subterranea/nitratos.htm>

Arranz, A. E. (2017). *Síntesis, caracterización y aplicación de nanomateriales de carbono para el tratamiento de aguas residuales* [Universidad Nacional de Educación a Distancia (España)]. <https://dialnet-unirioja-es.bdigital.udistrital.edu.co/servlet/tesis?codigo=254614>

Banco Mundial. (19 de Marzo de 2020). Banco Mundial. Obtenido de Agua Residual: De Residuo a Recurso: <https://www.bancomundial.org/es/topic/water/publication/wastewater-initiative>

Berge, N. D., Ro, K. S., Mao, J., Flora, J. R. V, Chappell, M. A., & Bae, S. (2011). *Hydrothermal Carbonization of Municipal Waste Streams*. 5696–5703.

Bohorquez, C., & Sarmiento, D. (2017). ANÁLISIS DEL USO DE BIORREACTORES DE MEMBRANA PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES Y POSIBLE IMPLEMENTACIÓN EN COLOMBIA. In *Universidad Catolica De Colombia* (Issue 3).

Cabello, C. B., & Hervás Ramírez, M. E. (2001). *Contaminación de las aguas por nitratos y efectos sobre la salud* (3rd ed.).

Calvo Brenes, G., Mora Molina, J., Quesada Kimzey, J., & Quesada Carvajal, H. (2010). Aplicación de la tecnología de membranas en el tratamiento de algunos residuos líquidos altamente peligrosos. *Tecnología En Marcha*, 23(1), 94–106.

Campos Segura, R. (2010). Contaminación en la cuenca alta del río Bogotá: diagnóstico y ensayo. *Revista Épsilon*, 15, 191–202.

CAR, C. A. R. de C. (2008). *Programa de restauración ambiental de la Cuenca Alta del*

Río Lerma.

c:%5CBiblioteca%5CAcademico%5CHidrología%5CLerma%5CPresentaciones%5C[Gob edomex] Programa restauración ambiental CARL [2008].ppt

CAR. (2017). Boletín de Calidad Hídrica Primera y Segunda Campaña. Bogotá D.C.

CAR. (S.F). SIE (Diosa Muisca del Agua). Obtenido de Centro de Documentación Ambiental:<http://sie.car.gov.co/bitstream/handle/20.500.11786/36903/02848.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Cárdenas, G. L., & Sánchez, I. A. (2013). Nitrogen in wastewater: origins, effects and removal mechanisms to preserve the environment and public health. *Universidad y Salud*, 15(1), 72–88.

Carreño, F., & Méndez, J. (2011). Estimación de la confiabilidad de las plantas de tratamiento de aguas residuales que operan con lagunas de estabilización en la cuenca alta y media del Río Bogotá. *Ingeniería de Recursos Naturales y Del Ambiente*, 10, 55–64.

Comisión de las Comunidades Europeas. (S.F). *El Tratamiento Anaerobico de los Residuos del Café: Una Alternativa* . Obtenido de Google Books:
<https://books.google.com.co/books?id=--YNAQAAIAAJ&pg=PA35&dq=lagunas+facultativas&hl=en&sa=X&ved=2ahUKEwjDudO-v8PyAhULQTABHcmwA3QQ6AEwAnoECAIQAg#v=onepage&q=lagunas%20facultativas&f=true>

Comisión Nacional del Agua. (Diciembre de 2007). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. Obtenido de Diseño de Lagunas de Estabilización:
<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/Libros/10DisenoDeLagunasDeEstabilizacion.pdf>

Cristancho Montenegro, D. L., Gámez Posada, W., Guerra Alfaro, J. A., & Dueñas Escudero, M. F. (2019). Estimación de los gases efecto invernadero generados por las plantas de tratamiento de aguas residuales ubicadas en la cuenca del río Bogotá. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 18(34), 25–44. <https://doi.org/10.22395/rium.v18n34a2>

CYTED. (2015). *Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados al tratamiento de aguas residuales industriales*. Barcelona.

Diguero, P., & Juárez, M. (2018). Celdas de combustible microbianas como alternativa para atender los retos de la sostenibilidad: Agua , energía y contaminación. *Revista de Ingeniería Innovativa*, 2(5), 18–34. www.ecorfan.org/republicofperu

Doorn, M. R. J., & Irving, W. (2006). Tratamiento y eliminación de aguas residuales. In *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero* (pp. 1–31).

Dursun, S., OMS, Arévalo, I., González Santamaria, D. H., & Echeverri Villa, J. A. (2017). Aguas Residuales: el Recurso desaprovechado. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. In *Ecos de Economía: A Latin American Journal of Applied Economics* (Vol. 8, Issue 18). <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247647>

El Espectador. (26 de Abril de 2016). *Las cuentas pendientes con el Rio Bogotá*. Obtenido de <https://blogs.elespectador.com/actualidad/el-rio/las-cuentas-pendietes-con-el-rio-bogota>

EPA. (2012). Emerging technologies for wastewater treatment and in-plant wet weather management. *Emerging Technologies in Wastewater Treatment*, 1–144.

Ezugbe, E., & Sudesh, R. (2020). Membrane Technologies in Wastewater Treatment: A review. *MDPI*.

Fluence . (23 de April de 2020). *Fluence Corp*. Obtenido de How Much Energy Exits in Wastewater: <https://www.fluencecorp.com/how-much-energy-exists-in-wastewater/>

García, C., & González, C. (2019). OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA DE FILTRACIÓN CON NANOMATERIALES PARA LA MEJORA DE LOS INDICES DE CALIDAD DEL AGUA. In *Universidad Católica De Colombia* (Vol. 8, Issue 5).

Gaya, U., & Abdullah, A. (2008). Heterogeneous photocatalytic degradation of organic contaminantes over titanium dioxide: a review of fundamentals, progress and problems. *Photochem*, 1-12.

Haijiao, L., Jingkan, W., & et al. (2016). An Overview of Nanomaterials for Water and Wastewater Treatment. *Advances in Materials Science and Engineering*, 1-8.

Hernández-Padilla, F., Margni, M., Noyola, A., Guereca-Hernandez, L., & Bulle, C. (2017). Assessing wastewater treatment in Latin America and the Caribbean: Enhancing life cycle assessment interpretation by regionalization and impact assessment sensibility. *Journal of Cleaner Production*, 142, 2140–2153. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.068>

Huiling, X., Chengwei, L., & et al. (2021). A review of microwave-assisted advanced oxidation processes for wastewater treatment. *Chemosphere*, 1-70.

Janet, M., Adriana, G., Soto, M., Iván, J., Omar, U., & Gutiérrez, D. (2012). *Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos*. 7(2), 52–73.

Jaramillo, M. F., Cardona, D., & et al . (2020). Reutilización de las aguas residuales municipales como estrategia de prevención y control de la contaminación hídrica. Caso de estudio: Cuencas de los ríos Bolo y Frayle (Colombia). *Environmental Engineering*, 1-21.

Jáuregui, C., Ramírez, S., Espinosa, M. A., Tovar, R., Quintero, B., & Rodríguez, I. (2007). Impacto de la descarga de aguas residuales en la calidad del río Mololoa (Nayarit, México) y propuestas de solución. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 3(1), 65–73.

Keerti, J., Anand, P., & et al. (2021). Nanotechnology in Wastewater Management: A New Paradigm. *Molecules MDPI*, 2-26.

Martí, M., Bertha, A., Morales-fonseca, D., Ruiz-tovar, K., & Marina, A. (2010). *Revista Iberoamericana ' a de Micologi Desarrollo de un bioadsorbente laminar con Phanerochaete chrysosporium ' quel y al plomo para el tratamiento de aguas hipertolerante al cadmio, al ni ' guez Va.* 27(3), 111–118. <https://doi.org/10.1016/j.riam.2010.02.002>

MAVDT. (2010). Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico. In *Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.* (Vol. 1).

Mejía Puentes, L., & Pérez Novoa, L. (2017). *Análisis del Estado de las Plantas de Tratamiento de Agua Residual de la Cuenca Alta del Río Bogotá Dentro de la Jurisdicción de la CAR.* Bogotá D.C: Universidad de la Salle.

Mendoza, Y. I., & Pérez, J. I. (2018). *Evaluación del Aporte de las Plantas Acuáticas Pistia stratiotes y Eichhornia crassipes en el Tratamiento de Aguas Residuales Municipales Evaluation of the Contribution of the Aquatic Plants Pistia stratiotes and Eichhornia crassipes in the Municipal Wast.* 29(3), 205–214.

MINAMBIENTE. (2014). *Observatorio Colombiano de Gobernanza del Agua.* Obtenido de Sentencia del Río Bogotá: <http://www.ideam.gov.co/web/ocga/sentencia>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Resolución 631.* Bogotá D.C.

Ministerio de ambiente y desarrollo. (2015). *DECRETO 1076 de 2015* (p. 653). http://www.minambiente.gov.co/images/Atencion_y_participacion_al_ciudadano/consultas_publicas

cas_2015/juridica/Proyecto_de_Decreto_7_5_15.pdf

Montoya, T. (2019). *Evaluación de filtro en múltiples etapas como alternativa de tratamiento de aguas residuales domésticas para la cuenca baja del río Tambo.*

Noyola, A., Morgan, J. M., & Güereca, L. P. (2015). *Selección de Tecnologías para el Tratamiento de Aguas Residuales Municipales.* México : Instituto de Ingeniería UNAM.

Pacheco Ávila, J., & Cabrera Sansores, A. (2003). Artículo de Divulgación Fuentes principales de nitrógeno de nitratos en aguas subterráneas. *Ingeniería*, 7(2), 47–54.

Pearce , G. (2007). Introducción a las membranas: filtración para tratamiento de aguas y aguas residuales. *Filtración y separación*, 24-27.

Peña, L. E., Muñoz, M., & Espinosa, A. (2001). Tratamientos de aguas residuales municipales y su impacto ambiental sobre un ecosistema. *Tecnura*, 5(9), 37–45.

<https://doi.org/10.14483/22487638.6116>

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2016). *Objetivos de Desarrollo Sostenible.* <https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/goal-6-clean-water-and-sanitation.html>

Racines, Y., & Santander, M. (2016). *IMPLEMENTACIÓN DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANO A PARTIR DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA.*

Resolución 631 de 2015, 2015 Diario Oficial No. 49.486 de 18 de abril de 2015 73 (2015). http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1-res_631_marz_2015.pdf

Reyes, Y., Torres, O., Díaz, M., & Edgar, G. (2016). CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS: IMPLICACIONES EN SALUD, AMBIENTE Y SEGURIDAD ALIMENTARIA Heavy. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 16(2), 66–77.

<https://doi.org/10.1007/BF02796157>

Rojas, S. M., & Torrado, D. F. (2007). Implementación de una unidad piloto de floculación lastrada para evaluar su comportamiento en el tratamiento de aguas residuales domesticas. *Universidad de La Salle, Facultad de Ingenieria Ambiental y Sanitaria*, 152.

Rojas, T. (2018). *Contaminación Odorífera: Causas , Efectos Y Posibles Soluciones a Una Contaminación Invisible Odour Pollution : Causes , Effects and Possible Solutions*. 9.

Romero Rojas, J. A. (2004). *Tratamiento de Aguas Residuales Teoría y Principios de Diseño*. Bogotá D.C: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Roy, A., & Bhattacharya, J. (2015). *Nanotechnology in Industrial Wastewater Treatment*. London: IWA.

Sáenz, L. E., Zambrano, D. A., & Calvo, J. A. (2016). Percepción comunitaria de los olores generados por la planta de tratamiento de aguas residuales de El Roble-Puntarenas, Costa Rica. *Revista Tecnología En Marcha*, 29(2), 137. <https://doi.org/10.18845/tm.v29i2.2697>

Sánchez, M., Elpidio, J., Jasso, C., Eugenia, M., Eugenia, M., & Cristina, N. C. (2012). Desinfección y purificación de agua mediante nanopartículas metálicas y membranas compósitas. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, III, 87–100.

Shah, S. (2016). Wastewater Management: New Technologies for treatment. *Waterdigest*, 48(801), 23–24.

Singh, R., & Hankins, N. (2016). Emerging Membrane Technology for Sustainable Water Treatment. *Elsevier*.

Suarez, L., Rodríguez, J., & Torres, P. (2011). *Tratamiento De Aguas Residuales Municipales En El Valle Del Cauca Tratamiento De Aguas Residuales Municipales En El Valle Del Cauca Tratamiento De Aguas Residuales Municipales En El Valle Del Cauca Tabla De*

Contenido.

Taylor, P., Oneby, M. A., Bromley, C. O., Borchardt, J. H., Harrison, D. S., Oneby, M. A., Bromley, C. O., Borchardt, J. H., & Harrison, D. S. (2013). Ozone Treatment of Secondary Effluent at U.S. Municipal Wastewater Treatment Plants. *The Journal of the International Ozone Association*, August 2013, 37–41. <https://doi.org/10.1080/01919510903482780>

UNESCO. (2019). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019. No dejar a nadie atrás. In *Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura*. <http://www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2019/>

Villa Hoyos , J. F. (2020). *Reúso de las Aguas Residuales como Alternativa al Estrés Hídrico en Colombia*. Medellín: Universidad de Antioquia.

Water Technology. (5 de February de 2021). *Water Technology* . Obtenido de Latest water purification technologies-top five: <https://www.water-technology.net/features/latest-water-purification-technologies-top-five/>

World Health Organization. (2013, 9 julio). OMS | Manejo ambiental para el control de vectores. Organización Mundial de la Salud. https://www.who.int/water_sanitation_health/resources/envmanagement/es/