



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior
de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural

NUEVAS TENDENCIAS EN SISTEMAS DE PURIFICACIÓN DE AGUAS

Universitat Politècnica de València (ETSIAMN)
Máster Universitario en Ingeniería Agronómica

Autor: D. Rubén Iriarte Mendivil

Tutor: Dr. Edgar Pérez Esteve

Cotutores: Dr. José Manuel Barat Baviera

D. Héctor Gómez Llorente

Referencia a la licencia de autorización de acceso y difusión del TFM

Curso académico: 2019-2020

Valencia 06.07.2020

Nuevas tendencias en sistemas de purificación de aguas

El acceso al agua potable por parte de individuos e industrias que preparan alimentos en cualquier parte del mundo es esencial para prevenir riesgos asociados con la ingesta de agua química y/o microbiológicamente contaminada. Tal es su importancia a nivel mundial, que el acceso a agua limpia y saneamiento es uno de los objetivos de desarrollo sostenibles para alcanzar antes de 2030. Durante más de un siglo, la filtración en arena y la cloración han puesto fin a la mayoría de las epidemias transmitidas por el agua en los países desarrollados. A pesar de su eficacia, su uso no siempre da como resultados aguas totalmente potables. Por una parte, las aguas filtradas a través de arena pueden todavía contener materiales perjudiciales como sedimentos, microorganismos, iones metálicos y compuestos orgánicos disueltos. Por otra parte, la cloración puede dar lugar a la formación de subproductos nocivos como las cloraminas. El objetivo del presente trabajo es identificar las últimas tendencias en purificación de agua y evaluar sus principales aplicaciones, ventajas, inconvenientes y capacidad de incorporarlas en diferentes partes del mundo. Tras revisar en la primera parte del trabajo cuáles son los métodos tradicionales y sus principales limitaciones, en la segunda parte se han identificado diferentes alternativas a los mismos. Entre ellas destacan el desarrollo de nuevas membranas de filtración, la adsorción de contaminantes sobre nuevos materiales nanoestructurados, el uso de nuevos coagulantes y agentes oxidantes y el empleo de enzimas. Estos resultados ponen de manifiesto que la purificación de agua es un campo donde la investigación y la innovación en la búsqueda de nuevos métodos más eficientes y respetuosos con el medio ambiente es posible y necesaria.

Palabras clave: purificación, agua, sistemas, nanotecnología, filtración, antimicrobianos

New trends in water purification systems

Access to drinking water by individuals and food industries anywhere in the world is essential to prevent risks associated with the intake of chemicals and / or microbiologically contaminated water. Such is its global importance that access to clean water and sanitation is one of the sustainable development goals to achieve by 2030. For more than a century, sand filtration and chlorination have ended most of waterborne epidemics in developed countries. Despite its effectiveness, its use does not always result in totally drinkable water. On the one hand, water filtered through sand may still contain harmful materials such as sediment, microorganisms, metal ions, and dissolved organic compounds. Furthermore, chlorination can lead to the formation of harmful by-products such as chloramines. The objective of this work is to identify the latest trends in water purification and evaluate its main applications, advantages, disadvantages and ability to incorporate them in different parts of the world. After reviewing in the first part of the work what are the traditional methods and their main limitations, in the second part different alternatives to them have been identified. These include the development of new filtration membranes, the adsorption of contaminants on new nanostructured materials, the use of new coagulants and oxidizing agents, and the use of enzymes. These results show that water purification is a field where research and innovation in the search for new, more efficient and environmentally friendly methods is possible and necessary.

Keywords: purification, water, systems, nanotechnology, filtration, antimicrobials

Autor: D. Rubén Iriarte Mendivil

Tutor: Dr. Edgar Pérez Esteve

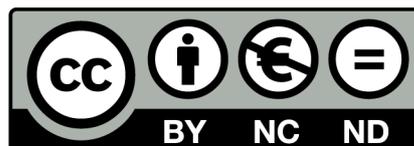
Cotutores: Dr. José Manuel Barat Baviera

D. Héctor Gómez Llorente

Referencia a la licencia de autorización de acceso y difusión del TFM

Curso académico: 2019-2020

Valencia 06.07.2020



Dedicatorias y agradecimientos

Agradecer en primer lugar al Dr. Edgar Pérez Esteve profesor del Master y tutor del presente trabajo por su profesionalidad y esfuerzo que pese a los acontecimientos vividos siempre ha estado para aconsejarme, enseñarme y guiarme en la elaboración del TFM.

A D. Héctor Gómez Llorente y al Dr. José Manuel Barat Baviera por su labor como cotutores ya que han sido una pieza clave a lo largo del proceso por medio de sus conocimientos y entrega.

Al grupo de investigación del departamento de tecnología de alimentos de la UPV por su acogida y plena disposición en todo momento.

A mi pareja Laura, con la cual he convivido durante el proceso y que siempre ha estado para apoyarme, aconsejarme y escucharme. Se cierra una etapa especial, pero comienza otra llena de grandes retos y oportunidades.

Por último agradecer a mis padres Javier y Merche y hermana María, sin ellos nada de esto hubiera sido posible, pilar y ejemplo de superación en la vida. Gracias a vosotros he logrado ser quien soy. A mi abuela Jerusalén que pese a no ser consciente del reto que ha supuesto es un ejemplo a seguir como abuela y madre.

INDICE

| | |
|---|----------|
| 1. Introducción | 1 |
| 2. Objetivo | 4 |
| 3. Metodología | 4 |
| 4. Resultados | 5 |
| 4.1 Sistemas tradicionales de purificación | 5 |
| 4.1.1 Sistemas físicos | 5 |
| 4.1.1.1 Desbaste | 5 |
| 4.1.1.2 Sedimentación | 5 |
| 4.1.1.3 Flotación | 5 |
| 4.1.1.4 Desengrasado | 6 |
| 4.1.1.5 Agitación | 6 |
| 4.1.1.6 Filtración | 6 |
| 4.1.1.7 Arrastre de Gases | 7 |
| 4.1.1.8 Osmosis | 7 |
| 4.1.2 Sistemas químicos | 8 |
| 4.1.2.1 Tamponación | 8 |
| 4.1.2.2 Adsorción | 8 |
| 4.1.2.3 Precipitación química | 9 |
| 4.1.2.4 Floculación/Coagulación | 10 |
| 4.1.2.5 Oxidación | 10 |
| 4.1.2.6 Intercambio iónico | 10 |
| 4.1.2.7 Agentes químicos de desinfección | 11 |
| 4.1.2.8 Decloración | 11 |
| 4.1.3 Sistemas biológicos | 12 |
| 4.1.3.1 Fangos activados | 13 |
| 4.1.3.2 Eliminación biológica de Nitrógeno | 14 |
| 4.1.3.3 Eliminación biológica de Fósforo | 15 |
| 4.2 Nuevas tendencias en sistemas de purificación | 16 |
| 4.2.1 Tratamientos físicos | 16 |
| 4.2.1.1 Desarrollo de nuevas membranas | 16 |
| 4.2.1.1.1 Desarrollo de nuevas membranas mediante electrohilado | 16 |
| A) Acetato de celulosa y quitina | 17 |
| B) Tereftalato de polietileno (PET) | 17 |
| 4.2.1.1.2 Desarrollo de nuevas membranas con nanotecnología | 18 |
| Membranas de nanofiltración | 18 |
| Membranas a base de aquaporina | 19 |
| 4.2.1.1.3 Desarrollo de nuevos materiales empleados en membranas | 19 |
| A) Nanocristales de celulosa de tunicado fibroso (TCNC) | 19 |
| B) Membrana de polifluoruro de vinilideno (PVDF) decorada con TiO ₂ | 20 |
| C) Microgranulos de carbono mesoporosos recubiertos de sílice nanoestructurados | 21 |
| 4.2.1.1.4 Aceites esenciales inmovilizados en micropartículas de sílice | 21 |
| 4.2.2 Tratamientos químicos | 22 |
| 4.2.2.1 Empleo de nuevos coagulantes | 22 |
| A) Quitosano | 23 |
| B) CO ₂ | 23 |
| 4.2.2.2 Métodos de oxidación | 24 |
| A) Oxidación mediante Fenton | 24 |
| B) Oxidación mediante Fotocatálisis | 25 |

| | |
|---|-----------|
| C) Oxidación mediante Ozono | 26 |
| 4.2.2.3 Sistemas de Nanoadsorción | 27 |
| A) Adsorción en nanotubos de carbono (CNT) | 27 |
| B) Nanoadsorbentes poliméricos | 28 |
| C) Adsorción mediante Zeolitas | 28 |
| 4.2.2.4 Nanometales y óxidos de nanometal | 28 |
| A) Plata coloidal y nano-dióxido de titanio | 29 |
| B) Nanopartículas de hierro cerovalente (Fe (0)) | 29 |
| 4.2.2.5 Luz Ultravioleta | 30 |
| 4.2.3 Tratamientos biológicos | 30 |
| 4.2.3.1 Enzimas en el tratamiento del agua | 30 |
| 4.2.3.2 Biofiltración | 31 |
| A) Ozono + biofiltración | 32 |
| B) Identificación de nuevas especies de bacterias para la eliminación de Nitrógeno. | 33 |
| 5. Conclusión | 34 |
| 6. Bibliografía | 36 |

Indice de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Principales elementos oxidantes y su potencial oxidativo. | 10 |
| Tabla 2. Características ideales para los desinfectantes químicos normalmente utilizados. | 11 |
| Tabla 3. Propiedades, aplicaciones y enfoques innovadores de las nanomembranas. | 19 |
| Tabla 4. Ventajas y desventajas del proceso oxidativo Fenton. | 25 |
| Tabla 5. Propiedades, aplicaciones y enfoques innovadores de los nanoadsorbentes. | 28 |
| Tabla 6. Propiedades, aplicaciones y enfoques para los nanometales y óxidos de nanometal. | 30 |
| Tabla 7. Eficiencia en % del uso de ozono u ozono+biofiltración. | 32 |

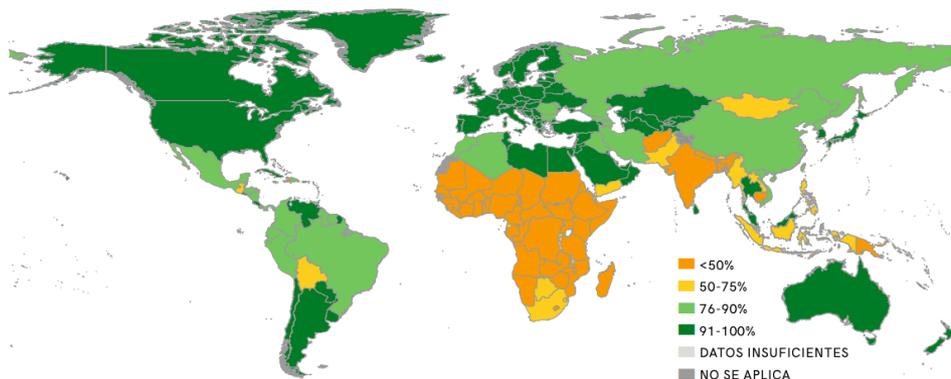
Indice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Frecuencia en el tratamiento de aguas para consumo humano. | 1 |
| Figura 2. Esquema funcional de la osmosis. | 7 |
| Figura 3. Tipos de poros en el carbón activo | 9 |
| Figura 4. Principales procesos biológicos en la depuración de agua residual | 12 |
| Figura 5. Esquema básico de un proceso de fango activado. | 13 |
| Figura 6. Ejemplos de fibras huecas. | 16 |
| Figura. 7. Fibras de acetato de celulosa electrohilada con nanocristales de quitina. | 17 |
| Figura 8. Fibras de Tereftalato de polietileno con biguadina de 2,1 y 0,5 nm | 18 |
| Figura 9. Efectividad de separación para los diferentes medios. | 20 |
| Figura 10. Resultados de la acción antimicrobiana de los diferentes aceites esenciales para diferentes tamaños de partícula | 22 |
| Figura 11. Esquema del proceso de filtración con CO ₂ | 24 |
| Figura 12. Efecto de múltiples barreras de partículas fotocatalíticas de dióxido de titanio en combinación con microfiltración. | 26 |
| Figura 13. Lacasa con un mediador redox en un ciclo degradante | 31 |

1. Introducción

El agua es el precursor de la vida en el planeta Tierra y uno de los recursos más valiosos para la civilización humana. El acceso confiable a agua limpia y asequible se considera uno de los objetivos humanitarios más básicos, y sigue siendo un gran desafío mundial para el siglo XXI. Según el Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia ([Organización Mundial de la Salud y UNICEF, 2015](#)), aproximadamente 663 millones de personas en todo el mundo carecen de acceso a una fuente de agua potable. Por ello es urgente implementar un tratamiento básico del agua en las áreas afectadas (principalmente en los países en desarrollo) donde el acceso al agua potable y/o la infraestructura para el tratamiento de aguas residuales son a menudo inexistentes.

El rápido crecimiento de la población mundial y la mejora del nivel de vida aumentan continuamente la demanda. Además, el cambio climático global acentúa la distribución ya desigual del agua dulce, desestabilizando el suministro ([ONU, 2018](#)). La creciente presión sobre los suministros de agua hace que el uso de fuentes de agua no convencionales (por ejemplo, aguas pluviales, agua dulce contaminada, agua salobre, aguas residuales y agua de mar) sea una nueva norma, especialmente en las regiones históricamente con escasez de agua. Además, las tecnologías e infraestructura actuales de tratamiento de agua y aguas residuales están llegando a su límite para proporcionar una calidad de agua adecuada para satisfacer las necesidades humanas y ambientales (Figura 1) ([OMS, 2020](#)).



*Figura 1. Frecuencia en el tratamiento de aguas para consumo humano.
(Organización Mundial de la Salud y UNICEF, 2015).*

Por otra parte, tanto en los países en desarrollo como en los industrializados, las actividades humanas juegan un papel cada vez mayor en la exacerbación de la escasez de agua al contaminar las fuentes naturales de agua ([Report, 2019](#)). Los estándares de calidad del agua cada vez más estrictos, compuestos por contaminantes emergentes, han llevado a un nuevo escrutinio a los sistemas existentes de tratamiento y distribución de agua ampliamente establecidos en los países desarrollados.

Frente a esta situación en 2015 Naciones Unidas junto con otros 195 países redactaron los ya más que conocidos 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible. Entre ellos, el número 6 cita textualmente:

“Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos” (ODS N° 6: Agua, 2015). Estos objetivos tienen una fecha límite (2015-2030) donde se establecen algunas metas como:

- Para 2030, lograr el acceso universal y equitativo al agua potable, a un precio asequible para todos.
- Para 2030, lograr el acceso equitativo a servicios de saneamiento e higiene adecuados para todos.
- En 2030, mejorar la calidad del agua mediante la reducción de la contaminación, la eliminación de vertidos y la reducción al mínimo de la descarga de materiales y productos químicos peligrosos, la reducción a la mitad del porcentaje de aguas residuales sin tratar y un aumento sustancial del reciclado y la reutilización en condiciones de seguridad a nivel mundial.
- Para 2030, poner en práctica la gestión integrada de los recursos hídricos a todos los niveles, incluso mediante la cooperación transfronteriza, según proceda.

Los esfuerzos mundiales para proporcionar acceso al agua y al saneamiento en las últimas dos décadas resultaron en una disminución de la mortalidad infantil asociada con la mala calidad del agua y la higiene y el saneamiento inadecuado, disminuyendo de 1.5 millones de muertes en 1990 a aproximadamente 800,000 en 2012 (OMS, 2017). Sin embargo, los virus transmitidos por el agua siguen siendo los principales contribuyentes a la carga mundial de morbilidad y mortalidad por enfermedades diarreicas.

De acuerdo con el estudio Global Enteric Multicenter Study (GEMS, 2012), un estudio prospectivo y de casos y controles de varios países en África y Asia, el rotavirus, para el cual ahora existe una vacuna, es la principal causa de diarrea moderada a severa en los bebés y niños menores de cinco años (UNICEF, 2015). El estudio GEMS informó que el rotavirus aumenta el riesgo de muerte 8,5 veces y contribuye al retraso del crecimiento asociado con la enfermedad diarreica crónica. Otros virus transmitidos por el agua también contribuyen a la morbilidad y mortalidad en todo el mundo, como los norovirus, la principal causa mundial de diarrea, así como los adenovirus, los astrovirus y los virus de la hepatitis A y E. Por lo tanto, todos estos virus deben controlarse para proporcionar agua segura.

Pese a los avances aplicados en las últimas décadas respecto al tratamiento de aguas, los países más desarrollados también sufren en menor medida los problemas que conllevan la progresiva contaminación y proliferación de microorganismos patógenos en las aguas (Moragas and Bustos, 2017). Según el listado que aparece en las normas microbiológicas de los alimentos y aguas de consumo, que fue actualizada el 1 de enero de 2017, los principales microorganismos que podemos encontrar en las aguas son:

- Aeróbios mesófilos
- Enterobacterias Coliformes
- *Escherichia coli*
- *Staphylococcus aureus*
- *Salmonella spp.*
- *Shigella spp.*
- Mohos
- *Listeria monocytogenes*

Según el Boletín Oficial del Estado (BOE, 2016) las aguas se clasifican el agua en:

- Aguas minerales naturales: Aquellas microbiológicamente sanas que tengan su origen en un estrato o yacimiento subterráneo y que broten de un manantial o puedan ser captadas artificialmente mediante sondeo, pozo, zanja o galería, o bien, la combinación de cualquiera de ellos.
- Agua potable: Se entiende como agua potable la que es apta para la alimentación y uso doméstico: no deberá contener sustancia o cuerpos extraños de origen biológico, inorgánico o radiactivo en tenores tales que la hagan peligrosa para la salud. Deberá presentar sabor agradable y ser prácticamente incolora, inodora, limpia e incolora.
- Aguas de manantial: Son las de origen subterráneo que emergen espontáneamente en la superficie de la tierra o se captan mediante labores practicadas al efecto, con las características naturales de pureza que permiten su consumo; características que se conservan intactas, dado el origen subterráneo del agua, mediante la protección natural del acuífero contra cualquier riesgo de contaminación.
- Aguas preparadas envasadas para consumo humano: Aguas preparadas son las aguas distintas a las minerales naturales y de manantial que pueden tener cualquier tipo de procedencia y se someten a los tratamientos físicoquímicos autorizados necesarios para que reúnan las características de potabilidad.
- Aguas de consumo humano: Todo tipo de aguas destinadas a beber, cocinar, preparar alimentos y otros usos domésticos, así como la utilizada en las industrias alimentarias tanto de red distribución pública o privada de cisternas o depósitos.

A partir de estas definiciones se puede concluir que por normativa hay aguas que no pueden ser modificadas ni tratadas (minerales y de manantial). Éstas deben poseer la calidad y seguridad alimentaria suficiente para ser consumidas sin ningún tipo de tratamiento. Sin embargo, cuando las aguas de por sí no reúnen las características para ser consumidas como agua de bebida o agua para la preparación de alimentos, éstas pueden ser purificadas por una serie de procesos físicos, químicos y biológicos, que les otorgan la calidad físico-química, microbiológica o sensorial necesaria.

2. Objetivo

El objetivo del presente trabajo es identificar las últimas tendencias en purificación de agua y evaluar sus principales aplicaciones, ventajas, inconvenientes, así como la capacidad de incorporarlas en los diferentes procesos de tratamientos de aguas.

Para cumplir con este objetivo, se han planteado los siguientes objetivos específicos:

- Identificar los sistemas tradicionales para la purificación de aguas, clasificarlos de acuerdo a si son tratamientos físicos, químicos o biológicos y evaluar sus principales ventajas e inconvenientes.
- Identificar las tendencias actuales en el diseño de sistemas de purificación, clasificarlos de acuerdo a si son tratamientos físicos, químicos o biológicos y evaluar sus ventajas e inconvenientes respecto a los sistemas tradicionales.

3. Metodología

La metodología empleada en este trabajo de revisión se basa en el estudio y búsqueda exhaustiva de información mediante la lectura y síntesis de la información que se considere relevante y adaptación al nuevo documento. Esto se ha realizado sobre la mayor cantidad de documentos posibles, a fin de contrastar, complementar y verificar la información de distintas fuentes y autores.

La primera fase del trabajo ha consistido en una amplia búsqueda, tomando como punto de partida las palabras clave de este trabajo (purificación, agua, sistemas, nanotecnología, filtración, antimicrobianos) y relacionándolas con en el título y las palabras clave del propio documento de objetivo de búsqueda. De este modo se tiene conocimiento de la posible relación con el objetivo y tema principal del trabajo. Seguidamente, si el título era de interés, se ha leído el apartado del resumen y las conclusiones, para tener una mayor concreción de la información y asegurar el interés del documento. Las herramientas de búsqueda han sido los buscadores web de Google Scholar, Polibuscador de la UPV y Scopus.

Para la clasificación de los sistemas, se han empleado dos criterios diferentes: su línea temporal (tradicionales y nuevas tendencias) y los principios del sistema de purificación (físicos, químicos y biológicos). Respecto a su clasificación temporal no ha sido fácil clasificar algunos sistemas ya que su descubrimiento tiene decenas de años, pero su empleo en el tratamiento de aguas es relativamente actual, por todo ello el criterio seleccionado para clasificarlo en **novedoso** o **tradicional** ha sido la última década. En el caso de los principios activos, los criterios seleccionados son: **físicos** (cambios en las características y propiedades del agua por medio de fuerzas físicas), **químicos** (alteraciones en la composición química del medio) y **biológicos** (utilización de microorganismos capaces de asimilar o inactivar las sustancias en suspensión o disueltas en el agua).

4. Resultados

4.1 Sistemas tradicionales de purificación

Aunque el trabajo se centre en nuevos sistemas de purificación, en la siguiente sección se muestra de manera resumida los sistemas tradicionales de purificación de aguas, ya que su análisis permite entender la necesidad de crear nuevos sistemas, así como posibles vías de innovación en este sector.

4.1.1 Sistemas físicos

Se conocen como tratamientos físicos de purificación de aguas aquellos que tienen por objetivo modificar las características y propiedades del agua por medio de fuerzas físicas, eliminando las partículas sólidas en suspensión que acompañan al agua residual, así como los aceites y las grasas. Además, simultáneamente se elimina parte de la materia orgánica (Hendricks *et al.*, 2010).

4.1.1.1 Desbaste

Tienen como objetivo eliminar las partículas sólidas en suspensión que acompañan al agua residual, así como los aceites y las grasas. Además, simultáneamente se elimina parte de la materia orgánica (Wegelin, 1996). Se lleva a cabo mediante rejillas (rejas, mallas, tamices o cribas), que pueden ser de tipos muy variados.

4.1.1.2 Sedimentación

La sedimentación es una operación unitaria que consiste en la separación, por acción de la gravedad, de las fases sólida y líquida de una suspensión diluida, de manera que se obtiene una suspensión concentrada y un líquido claro. La eliminación de los sólidos mediante sedimentación se basa en la diferencia de peso específico entre las partículas sólidas y el líquido donde se encuentran (O'Melia, 1998). Cuanto mayor sea la diferencia entre la densidad de ambas fases (sólido y fluido), más fácil será la separación. Se utilizan sedimentadores circulares y rectangulares, con tiempos de residencia comprendidos entre 30 minutos y 4 horas.

4.1.1.3 Flotación

La flotación, al igual que la sedimentación, es un proceso de separación sólido-líquido de una suspensión de ambos elementos, basado en la diferencia de densidades (Jiang *et al.*, 2002). La diferencia con la sedimentación consiste en que mediante la flotación se pretende separar de la suspensión aquellos elementos sólidos que, por su menor densidad respecto al líquido, pueden flotar. Esta menor densidad de las partículas sólidas puede ser real o provocada. En la actualidad tres son los diferentes modos de flotación empleados:

1. Aireación a presión atmosférica (**flotación por aireación**).
2. Saturación con aire a la presión atmosférica, seguido de la aplicación del vacío al líquido (**flotación por vacío**).
3. Inyección de aire en el líquido sometido a presión y posterior liberación de la presión a que está sometido el líquido (**flotación por aire disuelto**).

4.1.1.4 Desengrasado

Uno de los compuestos más problemáticos en los sistemas de depuración es la grasa, ya que es el actor principal en la obstrucción de rejillas y tamices (Cassano *et al.*, 1997). También es encargada de formar en los sedimentos una capa superficial que atrae a las pequeñas partículas de materia orgánica y dificulta la aireación en los procesos biológicos reduciendo su rendimiento.

El procedimiento más frecuente para eliminar las grasas consta de 2 etapas:

1: **Aireación del caudal en el desarenador:** las burbujas se adhieren a las partículas y la fuerza ascensional hace que suban hasta la superficie (flotación), permitiendo su separación.

2: **Eliminación de las grasas** residuales en los sedimentadores mediante rasquetas superficiales.

4.1.1.5 Agitación

Muchos son los tipos de agitadores y forma de agitación para los diferentes depósitos, pero todos ellos persiguen una meta en común: la de mantener en suspensión los sólidos para favorecer la floculación. Entre ellos cabe citar los agitadores mecánicos de hélice, turbina o paletas, los sistemas neumáticos por inyección de gases (uso de bombas y los dispositivos Venturi) (Rogalla *et al.*, 1996).

4.1.1.6 Filtración

La filtración es un procedimiento en el que se utiliza el paso de una mezcla sólido-líquido a través de un medio poroso (filtro) que retiene los sólidos y deja pasar los líquidos (filtrado).

La operación completa de filtración consta de dos fases: filtración y lavado o regeneración. La fase de filtración en la que se elimina la materia en suspensión se lleva a cabo haciendo circular el agua a través de un lecho granular, con o sin la adición de reactivos químicos. Es conveniente lavar el filtro o lecho granular a contracorriente con agua depurada para eliminar los sólidos retenidos (IngeExpert, 2017).

Los filtros pueden clasificarse en dos tipos en función del mecanismo filtrante o lugar de retención del sólido:

- **Filtros de torta:** el mecanismo utilizado para retener los sólidos es el efecto tamiz, esto es, el tamaño de las partículas retenidas es mayor que el de los poros o huecos del medio filtrante. La separación se realiza sobre la superficie de un soporte, sobre el cual se van reteniendo los sólidos formando una capa adicional o torta, a través de la cual tiene que pasar la suspensión. El espesor de esta torta va aumentando según progresa la filtración y puede actuar también como medio filtrante, dependiendo del grado de compactación y porosidad de dicha torta. Estos filtros se utilizan para separar grandes cantidades de sólidos de diferentes suspensiones líquidas.

- **Filtros de profundidad o clarificadores:** el mecanismo es de adhesión y/o atrapamiento de las partículas sólidas por el medio filtrante. Los sólidos atrapados pueden tener un tamaño de partícula inferior a los poros o huecos del medio filtrante, pero éste tiene un espesor mucho mayor que los anteriores para permitir que los fenómenos de adhesión y/o atrapamiento se produzcan en la extensión deseada. Se utilizan para eliminar pequeñas cantidades de sólidos en algunos líquidos transparentes.

La filtración se emplea en el tratamiento de agua para eliminar los sólidos presentes en las aguas superficiales, precipitados del ablandamiento del agua con cal, y precipitados de hierro y manganeso presentes en muchos suministros de agua de pozo. En el tratamiento de agua residual, la filtración se emplea para eliminar el floculo biológico del efluente secundario decantado, precipitados de fosfatos y los sólidos que permanecen después de la coagulación química de las aguas residuales en los procesos de tratamiento fisicoquímicos.

4.1.1.7 Arrastre de Gases

La finalidad de este proceso es la eliminación de ciertos microcontaminantes como compuestos orgánicos volátiles antes de aplicar otros tratamientos, para evitar su emisión a la atmósfera. Para ello, se introduce gas a presión (aire, vapor de agua, o gases inertes) en la corriente, pasando dichos compuestos volátiles al agente lavador. La mezcla gaseosa resultante debe ser tratada antes de su emisión a la atmósfera (Bin, 1988).

4.1.1.8 Osmosis

La ósmosis es el fenómeno que se produce cuando dos soluciones con diferente concentración son separadas por una membrana semipermeable y el solvente difunde a través de la membrana del líquido de menor concentración al de mayor, hasta equilibrar las concentraciones. Este fenómeno se produce de forma espontánea sin gasto energético (Malaeb, 2001). En el caso de aplicar una fuente externa de presión (Figura 2), el método recibe el nombre de ósmosis inversa.

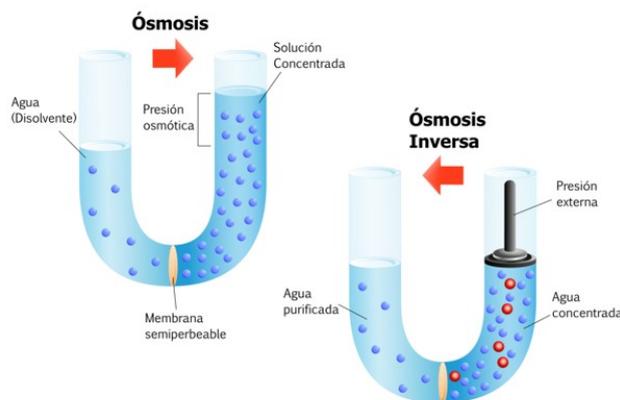


Figura 2. Esquema funcional de la osmosis.
(Spear and James, 1994)

4.1.2 Sistemas químicos

Se conoce como tratamiento químico al proceso en el cual alguna de las características del agua se ve modificada por la adición de algún compuesto químico que reacciona con alguno de los componentes de la misma. Como resultado de ello, se suele producir un incremento neto de los constituyentes disueltos en el agua residual. Su uso implica unos costes de funcionamiento importantes, ya que los precios de muchos productos químicos están vinculados al coste de la energía utilizada en su producción (Karuppiah and Grossmann, 2005).

4.1.2.1 Tamponación

La finalidad de la tamponación es la modificación del pH del agua para que sea adecuado para un tratamiento posterior o para que cumpla la legislación ante su vertido al lugar que corresponda (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011). Para ello se puede agregar ácido o álcali al efluente cuando éste tiene un pH no adecuado. En general, el pH adecuado se sitúa entre 7 y 8.

El proceso de tamponación se lleva a cabo normalmente en los tanques de homogeneización, con pequeñas descargas temporizadas en el que se introduce un pHmetro con un mecanismo eléctrico, de forma que cuando el agua alcanza $\text{pH} \leq 7$ se envía una orden a la válvula de un recipiente debidamente colocado para que deje “gotear” carbonato sódico o sosa cáustica o hidróxido de potasio. Por el contrario, cuando el agua en el depósito de espera se encuentra a $\text{pH} \geq 8$ lo que “gotea” es ácido sulfúrico o ácido clorhídrico (Barling and Moore, 1994).

Algunos ejemplos de su uso en la actualidad son:

- Neutralización del agua tratada para ajustar su pH antes de ser vertida.
- Es frecuente corregir el valor del pH durante el proceso de purificación de aguas para facilitar algunas de sus etapas como es el caso de la coagulación donde se beneficia de pH bajos.
- Elevar el pH tras la coagulación/floculación y la cloración.
- La eliminación de Fe^{2+} y Mn^{2+} se produce mejor a pH elevado, por lo que se realiza una alcalinización previa del agua a tratar.

4.1.2.2 Adsorción

La adsorción es un proceso por el cual átomos, iones o moléculas de gases, líquidos o sólidos disueltos son atrapados o retenidos en una superficie. Un contaminante soluble (adsorbato) es eliminado del agua mediante el contacto con una superficie sólida (adsorbente) (Martín Martínez, 1990). Respecto al proceso de adsorción, uno de los filtros más empleados son los de carbón activo, ya que presentan una amplia variedad de utilidades (eliminar malos olores, sabores o color desagradable del agua, compuestos orgánicos volátiles y plaguicidas). El carbón activo tiene una gran área superficial y por lo tanto alta capacidad de adsorción de compuestos, que quedan adheridos a la superficie a lo largo de sus diferentes tamaños de poro como se puede observar en la Figura 3.

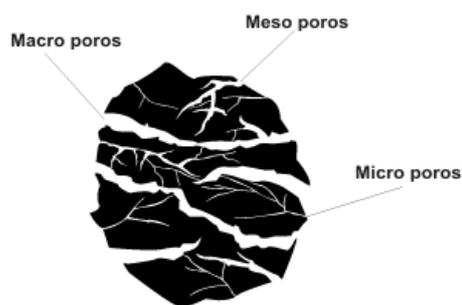


Figura 3. Tipos de poros en el carbón activo

En la actualidad este proceso se realiza por medio de la adsorción sobre carbón activo para lograr un mayor grado de pureza. Este proceso se puede realizar de 3 maneras:

- **Lecho fijo:** el carbón se mantiene quieto mientras el agua circula de arriba abajo.
- **Lecho móvil:** el carbón es mantenido en suspensión por los fenómenos hidrodinámicos creados por el agua que entra en el sistema por el fondo.
- **Aplicación directa:** el carbón activado en polvo se dosifica directamente en el agua de tratamiento, teniendo que eliminarse posteriormente por sedimentación o filtración (que a veces se tiene que favorecer mediante la aplicación de un coagulante).

Estos filtros son económicos, fáciles de mantener y operar, por lo que su uso es muy común. Entre las limitaciones que presentan es que deben recibir mantenimiento frecuente y periódico para evitar obstrucción de tuberías. Es difícil percibir cuándo un filtro ha dejado de funcionar adecuadamente, por lo que una de sus limitaciones es que pueden haber dejado de funcionar y que el usuario no se haya percatado de ello. Otras limitaciones están relacionadas a que no remueven bacterias, metales, nitratos, pero principalmente que generan un residuo el carbón ya saturado- que no es de fácil disposición, especialmente si el agua contiene compuestos orgánicos tóxicos que son retenidos en el filtro de carbón activo (Simpson, 2008).

4.1.2.3 Precipitación química

La precipitación química pretende separar sólidos en suspensión que ha sido precipitado por medio de la adición de un agente químico. Puede realizarse por una reacción química, por evaporación del disolvente, por enfriamiento repentino de una disolución caliente, o por cambio de polaridad del disolvente (Matlock *et al.*, 2002). El sólido así obtenido se denomina precipitado y puede englobar impurezas. Algunos de sus usos objetivos son:

- Favorecer la eliminación de compuestos orgánicos y de los nutrientes (nitrógeno y fósforo) contenidos en el agua residual.
- Ayudar en el proceso de sedimentación.
- Mejorar el rendimiento de las plantas de tratamiento,
- Eliminar los sólidos en suspensión y la reducción de la DBO.

4.1.2.4 Floculación/Coagulación

La floculación y la coagulación son dos operaciones que tienen por objetivo facilitar la retirada de las sustancias en suspensión y de las partículas coloidales (Bratby, 1980). Debido a que comparten función, es frecuente confundir ambos conceptos. Por este motivo, cabe señalar que la coagulación es la desestabilización de las partículas coloidales causadas por la adición de un reactivo químico llamado coagulante el cual, neutralizando sus cargas electrostáticas, hace que las partículas tiendan a unirse entre sí. Por su parte, la floculación es la aglomeración de partículas desestabilizadas en microfloculos y después en los floculos más grandes que tienden a depositarse en el fondo de los recipientes construidos para este fin, denominados sedimentadores.

4.1.2.5 Oxidación

Como su propio nombre indica, la oxidación es un fenómeno en el cual se produce una pérdida de electrones por parte de una molécula, átomo o ion en presencia de oxígeno. Cuando esto ocurre, decimos que la sustancia ha aumentado su estado de oxidación (Herrmann and Bucksch, 2014). La oxidación posee una tasa muy alta de efectividad en la purificación de aguas, pero su empleo se reserva como último recurso debido a lo elevado de su coste (Ahammad *et al.*, 2008). Pese a ello, la oxidación presenta diferentes usos como:

- Oxidar materia orgánica para eliminar barreras naturales que dificultan la eficacia de los procesos.
- Oxidar los compuestos olorosos, tales como el sulfuro de hidrógeno en etapas finales.
- Eliminar metales pesados en las primeras etapas.
- Desinfectar en etapas iniciales y finales.

Los elementos oxidantes más comunes, junto con sus potenciales de oxidación a 25°C se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Principales elementos oxidantes y su potencial oxidativo. (Mejía *et al.*, 2014).

| Elementos | Compuesto químico | Potencial de oxidación (V) |
|------------------|-------------------------------|----------------------------|
| Oxígeno | O ₂ | 0,4 |
| Agua oxigenada | H ₂ O ₂ | 0,87 |
| Hipoclorito | HOCl | 0,9 |
| Bromo | Br ₂ | 1,07 |
| Dióxido de cloro | ClO ₂ | 1,15 |
| Cloro | Cl ₂ | 1,39 |
| Ozono | O ₃ | 1,87 |

4.1.2.6 Intercambio iónico

El intercambio iónico consiste en reemplazar los iones contenidos en una solución por aquellos que constituyen un lecho (cargado de cationes o aniones) a través del cual se hace pasar el agua, hasta que se alcanza el equilibrio (Johnson and Singer, 2004). Este proceso se emplea principalmente en el tratamiento doméstico e industrial para evitar los problemas causados por el carbonato cálcico, insoluble en el agua. Una de las opciones más frecuentes para eliminar el carbonato cálcico (CaCO₃) es el empleo de cloruro sódico (NaCl). El principio es el siguiente:

a) El Na^+ del cloruro sódico se combina con el CO_3^{2-} del carbonato cálcico formando carbonato sódico Na_2CO_3 , elemento que permanece disuelto en el agua.

b) el Cl^- del cloruro sódico se combina con el Ca^{2+} del carbonato cálcico formando cloruro cálcico CaCl_2 , que precipita formando los depósitos blandos recogidos por la maquinaria.

4.1.2.7 Agentes químicos de desinfección

La desinfección consiste en la incorporación de elementos químicos con la finalidad de eliminar de forma selectiva a los organismos causantes de enfermedades (Gheraout and Gheraout, 2010). En la Tabla 2 se puede apreciar un breve resumen de los principales agentes químicos y sus características. Los organismos entéricos de origen humano presentes en las aguas residuales y que pueden implicar la aparición de enfermedades son:

- **Bacterias:** Transmiten tifus, cólera, paratífus y disentería bacilar.
- **Virus:** Poliomielitis, hepatitis infecciosa, etc.
- **Amebas:** Producen quistes amebianos.

Tabla 2. Características ideales para los desinfectantes químicos normalmente utilizados.

| Características | Cloro | Hipoclorito de calcio | Hipoclorito de sodio | Dióxido de sodio | Cloruro de bromo |
|----------------------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|---------------------------|
| Toxicidad para microorganismos | Alta | Alta | Alta | Alta | Alta |
| Solubilidad | Ligera | Alta | Alta | Alta | Ligera |
| Estabilidad | Estable | Ligeramente estable | Relativamente estable | Inestable | Ligeramente estable |
| Homogeneidad | Homogéneo | Homogéneo | Homogéneo | Homogéneo | Homogeneo |
| Interacciones | Oxida la materia organica | Oxidante activo | Oxidante activo | Alta | Oxida la materia orgánica |
| Toxicidad a temperatura ambiente | Alta | Alta | Alta | Alta | Alta |

4.1.2.8 Decloración

La adición de cloro a las aguas favorece a aparición de compuestos tóxicos como consecuencia de la reacción del cloro con los compuestos orgánicos presentes en el agua residual compuestos tóxicos, que pueden tener efectos adversos a largo plazo sobre los usos de las aguas a las que se descargan. La decloración consiste en la eliminación total del cloro residual presente en el agua después del tratamiento con cloro, con el objetivo de reducir los efectos tóxicos de los efluentes descargados a los cursos de agua receptores o destinados a la reutilización (Muftikian *et al.*, 1995).

En la actualidad dos son las formas más conocidas para la decloración:

- **Uso de SO_2 :** Las reacciones del dióxido de azufre con el cloro y las cloraminas son casi instantáneas. Elimina sucesivamente el cloro libre, la monocloramina, la dicloramina, el tricloruro de nitrógeno, y los compuestos policlorados.
- **Uso de carbón activado:** El uso de carbón activado proporciona una adsorción completa del cloro libre y combinado.

4.1.3 Sistemas biológicos

Los tratamientos biológicos se basan en la utilización de microorganismos capaces de asimilar las sustancias en suspensión o disueltas presentes en el agua residual, a fin de incorporarlas al metabolismo celular y de obtener energía para sus funciones vitales y promover el desarrollo somático (Ottengraf, 1987).

El principio del tratamiento biológico de las aguas residuales es el mismo que el de la purificación espontánea en aguas naturales (Poljsak *et al.*, 2010). Se realiza en reactores diseñados especialmente para mantener los microorganismos bajo condiciones controladas, acelerando el proceso natural de descomposición y neutralización de los residuos, antes de que las aguas sean finalmente vertidas a las masas de agua receptoras. En el proceso participan distintas reacciones microbiológicas para eliminar o transformar diferentes tipos de materia orgánica, nutrientes y muchos otros elementos químicos tales como el sulfuro y los metales. Estas reacciones pueden ser realizadas bajo condiciones aerobias (presencia de oxígeno disuelto), anóxicas (ausencia de oxígeno disuelto, presencia de nitratos) o anaerobias (ausencia de oxígeno disuelto y nitratos), dependiendo de la vía de degradación empleada. Asimismo, la biomasa empleada en el tratamiento se puede mantener en suspensión o adherida a un material de soporte (Lee, 1996; Droste, 2018). A continuación, en la Figura 4 se puede apreciar un breve resumen de los procesos junto a sus tipologías.

| | | | | |
|---|-----------------------|---|----------------------|-----------------|
| Procesos Aerobios | Cultivo en suspensión | Fangos Activados | Continuos | Flujo en pistón |
| | | Lagunas aireadas | Discontinuos | Mezcla completa |
| Procesos Anóxicos | Cultivo fijo | Biodiscos rotativos | Aireación prolongada | |
| | | Filtros percoladores | Canales de oxidación | |
| Procesos Anaerobios | Cultivo en suspensión | Digestión anaerobia | Alta carga | |
| | Cultivo fijo | Filtro anaerobio | Baja carga | |
| Procesos combinados (anaerobios-anóxicos-aerobios) | | | Doble etapa | |
| | | | | |
| | | Nitrificación-desnitrificación | | |
| | | Nitrificación-desnitrificación-eliminación de fósforo | | |

Figura 4. Principales procesos biológicos en la depuración de agua residual (Agua *et al.*, 1997)

Tras introducir los diferentes procesos que existen para el tratamiento de aguas con sistemas biológicos, nos centraremos únicamente en los fangos activados y procesos combinados, ya que es el sistema más extendido debido a sus ventajas que presenta frente al resto:

- Efluente de gran calidad y menor cantidad de sólidos en suspensión, debido, a la decantación estática y controlada que permite el sistema, influyendo en una reducción directa en otros parámetros de control de calidad del efluente.
- Mayor resistencia frente a variaciones bruscas de temperatura.
- Bajo requerimiento de espacio, debido a que se requiere un solo tanque para realizar todo el proceso. Evitamos los procesos de decantación convencionales y reactores auxiliares de desnitrificación.

- Permiten mayor control sobre el crecimiento de microorganismos filamentosos y problemas de decantación.
- Los costes de inversión son menores ya que no requieren de los típicos decantadores secundarios.

4.1.3.1 Fangos activados

El proceso de fangos activados es el sistema de tratamiento biológico más habitual en el tratamiento de las aguas residuales. Fue desarrollado en Inglaterra en 1914 por Arden y Lockett, quienes realizaron experimentos con un cultivo biológico en suspensión en un tanque aireado e introdujeron la idea de recircular la biomasa suspendida formada durante la aireación (Figura 5). Esta suspensión fue llamada fangos activados y correspondía a la biomasa activa responsable del proceso de depuración (Van Haandel *et al.*, 2007).

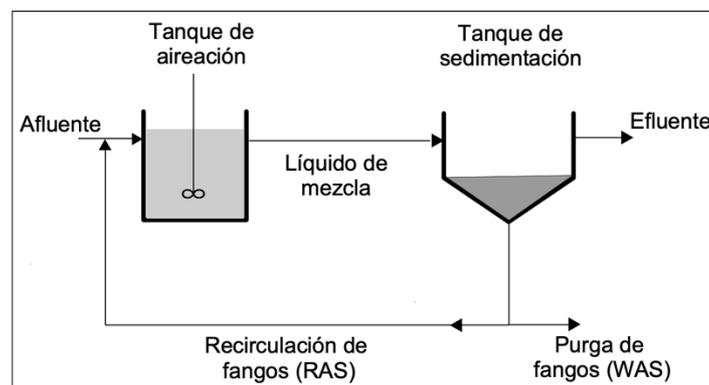


Figura 5. Esquema básico de un proceso de fango activado. (Aguas *et al.*, 1997)

Los primeros reactores de fangos activados fueron operados en régimen discontinuo, como una unidad de "llenado-vaciado". Sin embargo, la necesidad de tratar grandes caudales de aguas residuales y los problemas de control de estas unidades (grandes descargas de caudal frente al caudal afluente, obstrucción de los difusores de aireación durante la sedimentación, operación manual del ciclo cuando no se disponía de automatización), obligaron rápidamente a su transformación en reactores de flujo continuo, abandonándose su uso en discontinuo durante cerca de 50 años (Droste, 2018).

La diferencia entre un reactor de flujo continuo y uno de flujo discontinuo (llenado- vaciado) es que el funcionamiento del primero obedece a una secuencia espacial, mientras que el del segundo sigue una secuencia temporal. Es decir, un tratamiento de tipo continuo consta de diferentes depósitos, cada uno con características particulares en los que tiene lugar una fase determinada del tratamiento.

Desde el punto de vista biotecnológico, una planta de fangos activados es un bioproceso de funcionamiento continuo, en donde el tratamiento biológico de aguas residuales para su depuración es realizado por un reactor biológico o birreactor, mediante un proceso de cultivo continuo de fangos activados, que se realiza a través de un cultivo bacteriano aerobio mixto de microorganismos en suspensión: bacterias filamentosas y formadoras de flóculos; cuyo accionar causa la oxidación de la materia orgánica en suspensión. El contenido del reactor se conoce con el nombre de "líquido mezcla".

El ambiente aerobio se consigue mediante la aireación o difusión forzada de aire dentro del medio fluido, por el uso de difusores de aire que, a su vez, permiten mantener el líquido mezcla perfectamente agitado y en movimiento continuo (estado de mezcla completa). Debe pasar un

periodo de tiempo determinado, llamado tiempo de retención, para que, la mezcla de células nuevas con células viejas, conduzca a la oxidación completa de la materia orgánica. De ahí, parte del líquido mezcla es pasado desde la parte superior del tanque, hasta un tanque de sedimentación para su separación del agua residual tratada. Este proceso es llamado clarificación del agua. Otra parte del líquido mezcla, es pasado desde la parte baja del tanque (que contiene las células sedimentadas) y se recircula para mantener en el birreactor, una concentración de células equilibrada (Escaler *et al.*, 2001).

Finalmente, la otra parte se purga del sistema (fango en exceso) hacia otro proceso en donde son tratados los fangos. Las bacterias filamentosas y las formadoras de flóculos son los microorganismos encargados de la descomposición de la materia orgánica del afluente. El agua procedente del tratamiento primario, al tanque de aireación, en donde es mezclada con el aire disuelto que sale por los difusores. El suministro de aire a lo largo de toda la longitud del tanque debe ser uniforme para lograr una mezcla completa. Durante el periodo de aireación se produce la absorción, floculación y oxidación de la materia orgánica en suspensión. Los sólidos del fango activado se separan en un decantador secundario. Este proceso necesita de una carga orgánica reducida y un largo periodo de aireación.

4.1.3.2 Eliminación biológica de Nitrógeno

La presencia de nitrógeno en las descargas de aguas residuales puede ser indeseable por varias razones: 1) el amoníaco libre es tóxico para los peces y muchos otros organismos acuáticos y 2) el nitrógeno amoniacal ejerce una demanda de oxígeno muy elevada pudiendo agotar el oxígeno disuelto de la masa de agua. La toxicidad del amoníaco en solución es directamente atribuible a la especie NH_3 , cuya concentración aumenta con el pH y la temperatura del agua (Horan, 1993; Sedlak, 1991).

La transformación de estos compuestos puede ocurrir por diferentes mecanismos: fijación, amonificación, síntesis, nitrificación y desnitrificación.

- **La fijación** de nitrógeno indica la incorporación de nitrógeno gaseoso en un compuesto químico (NH_4^+) que pueda ser utilizado por plantas y animales.
- **La amonificación** es el proceso de cambio del nitrógeno orgánico a formas amoniacales y ocurre normalmente durante la descomposición de tejidos animales y vegetales y de la materia fecal animal.
- **La síntesis** es un proceso bioquímico que usa el amonio o el nitrato para formar proteínas vegetales y otros compuestos que contienen nitrógeno.
- **La nitrificación** es la oxidación biológica del nitrógeno amoniacal. Este proceso se realiza en dos etapas, en la primera el ion amonio se oxida a nitritos y luego estos son oxidados a nitratos. Las reacciones de transformación las realizan principalmente dos géneros de bacterias autótrofas aerobias llamadas nitrificantes, que utilizan el carbono inorgánico como fuente de carbono celular
- **La desnitrificación** es un proceso de reducción biológica del nitrato a nitrógeno gas. Durante el proceso de reducción, el nitrato se transforma inicialmente en nitrito y éste en óxido nítrico, óxido nitroso y finalmente en nitrógeno gas que se libera a la atmósfera. Los organismos responsables de esta reacción son principalmente heterótrofos aerobios facultativos, que pueden adaptarse a las condiciones del medio en que se encuentran.

4.1.3.3 Eliminación biológica de Fósforo

La incorporación de fósforo en las masas de agua ha aumentado de forma notable en los últimos tiempos como consecuencia de su uso en abonos agrícolas, en actividades industriales y en detergentes y productos de uso doméstico. El fósforo es esencial para la vida, siendo imprescindible para la síntesis de los ácidos nucleicos y de los fosfolípidos. Una baja concentración de fósforo en el medio limitará el crecimiento biológico e impedirá la eliminación del sustrato orgánico (Grady y Lim, 1980).

El fósforo presente en las aguas residuales urbanas proviene principalmente de la materia fecal humana (50-65%), de los vertidos de residuos alimenticios y de los compuestos de fosfato inorgánico contenidos en los detergentes y los productos de limpieza (30-50%). El fósforo se puede encontrar en tres formas distintas: fósforo orgánico (especies particuladas), ortofosfatos y polifosfatos (especies disueltas). El proceso de eliminación biológica de fósforo consta de dos fases.

1. La primera fase requiere condiciones anaerobias y la disponibilidad de compuestos orgánicos de bajo peso molecular como los ácidos grasos volátiles de cadena corta que son fácilmente almacenables por los microorganismos encargados del proceso, principalmente en forma de acetato y propionato.

2. En una segunda fase, en condiciones aerobias, las células consumen los compuestos orgánicos almacenados en la fase anterior, utilizándolos como fuentes de energía y carbono para el crecimiento celular y para la acumulación, en forma de polifosfatos, de los ortofosfatos disponibles en el líquido de mezcla.

La eliminación biológica de fósforo se atribuye generalmente al género *Acinetobacter*. Estas bacterias tienen un crecimiento lento y en la fase anaerobia utilizan normalmente los sustratos más simples de la fermentación, como el acetato.

4.2 Nuevas tendencias en sistemas de purificación

Tras la breve visión de las principales técnicas en purificación de aguas empleadas de forma tradicional, en la presente sección se muestran los sistemas más novedosos que están en fase de investigación y desarrollo, o incluso, que ya se están utilizando. Para su clasificación se ha seguido el mismo criterio empleado en los sistemas tradicionales: sistemas de purificación basados en tratamientos físicos, químicos y biológicos.

4.2.1 Tratamientos físicos

Respecto a los tratamientos físicos, las nuevas tendencias que se estudian a continuación nacen de las carencias observadas de las técnicas tradicionales que se centran en la eliminación de partículas sólidas en suspensión, aceites y grasas por medio de herramientas principalmente mecánicas que requieren una inversión inicial elevada, un mantenimiento continuo y un gran espacio para su instalación. Frente a todo ello las nuevas tendencias donde destacan las nuevas membranas formadas con materiales novedosos por medio del electrohilado y el uso de la nanotecnología junto a nuevos materiales que buscan mecanismos más económicos, sencillos de implementar y con una baja necesidad de mantenimiento sin olvidar el incremento de la efectividad.

4.2.1.1 Desarrollo de nuevas membranas

En términos de filtración líquida, las membranas porosas hechas por métodos convencionales tienen limitaciones intrínsecas, como bajo flujo y alto ensuciamiento debido a la estructura física de los poros y la distribución del tamaño (Wang *et al.*, 2005). Las membranas formadas por el método de electrohilado pueden superar algunas de estas limitaciones debido a la naturaleza altamente interconectada y asimétrica de los poros. Por ello en la siguiente sección se explica en que consiste el proceso por el cual se forman las membranas y cuales son los materiales más empleados junto a sus cualidades.

4.2.1.1.1 Desarrollo de nuevas membranas mediante electrohilado

Una de las formas comunes de producir fibras huecas para procesos de membrana es el hilado seco-húmedo. Esta técnica permite alcanzar fibras huecas de diámetro interno del orden de cientos de μm con un grosor del orden de $100\ \mu\text{m}$. Por lo tanto, disminuir el diámetro de las fibras huecas permite incluir un mayor número de fibras huecas en un volumen dado y, por lo tanto, aumenta sustancialmente el área activa de la membrana. La técnica de electrohilado (ES) permite producir fibras a partir de una amplia variedad de polímeros como el acetato de celulosa, la quitina y el tereftalato de polietileno que se explican a continuación y que alcanzan valores desde unos pocos nm hasta más de $1\ \mu\text{m}$ de diámetro (Figura 6) (Tong *et al.*, 2015).

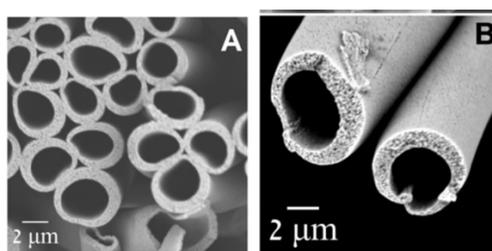


Figura 6. Ejemplos de fibras huecas.
(Wang *et al.*, 2012).

En el proceso de preparación de las membranas mediante electrohilado, se bombea una solución de polímero a través de una pipeta y, como resultado, emerge una gota colgante. Se aplica un campo eléctrico alto de 1 kV / cm a la gota. Esto hace que las cargas libres en la superficie libre de la gota se repelen entre sí y, por lo tanto, trabajen contra la tensión superficial y la elasticidad del fluido, lo que da como resultado la deformación de la gota en forma de cono (cono de Taylor). Al aumentar el campo eléctrico aplicado por encima de un valor crítico, se produce la emisión de un chorro desde la punta del cono de Taylor. Debido a la inestabilidad de la flexión, el chorro se mueve en una trayectoria en bucle hacia la superficie de recolección. A medida que el chorro se mueve, se vuelve más estrecho debido al estiramiento y la evaporación del solvente. Cuando el chorro alcanza la superficie colectora, ya es una fibra sólida (Haloui *et al.*, 2017).

A continuación, se presentan diferentes materiales que se están utilizando para la generación de membranas para la purificación de agua:

A) Acetato de celulosa y quitina

En el caso de las membranas de acetato de celulosa son una alternativa respetuosa con el medio ambiente y eficiente para producir membranas altamente hidrofílicas con alto flujo de agua y bajo ensuciamiento para el proceso de purificación de agua por microfiltración. En este caso una de sus posibles aplicaciones sería el agua de lavado de la industria alimentaria para contaminantes biológicos.

Para su elaboración es necesario preparar esferas aleatorias de acetato de celulosa electrohilada (CA) recubriendo la superficie con nanocristales de quitina (ChNC) para obtener membranas de filtración de agua con características de superficie adaptadas (Goetz *et al.*, 2016). Los nanocristales de quitina se autoensamblan en la superficie de las fibras de CA en redes homogéneas nanoestructuradas durante el secado que se estabilizan mediante enlaces de hidrógeno y se forman estructuras de película reticulada en las uniones de las fibras electrohiladas (Figura 7) (Gopalan Nair y Dufresne, 2003).

El recubrimiento superficial de nanocristales de quitina impacta significativamente las propiedades de la superficie de las membranas, produciendo una membrana superhidrófila (ángulo de contacto 0°). Las membranas recubiertas también muestran una reducción significativa en la bioincrustación y la formación de biopelículas.

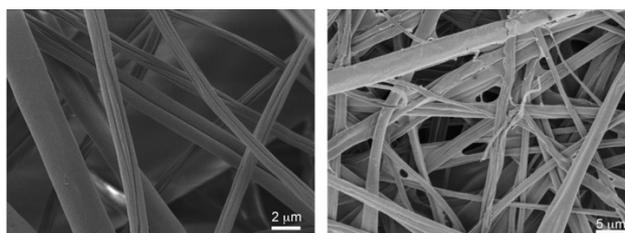


Figura. 7. Fibras de acetato de celulosa electrohilada con nanocristales de quitina. (Goetz *et al.*, 2016).

B) Tereftalato de polietileno (PET)

Las membranas de filtración de nanofibra representan un medio filtrante no tejido de próxima generación debido a sus propiedades únicas. Algunos de los usos más comunes del tereftalato de polietileno (PET) es el envasado de agua y otros materiales de uso común, lo que lleva a una gran cantidad de desechos plásticos a menudo con un incentivo limitado para el reciclaje (pocos usos de valor agregado) (Webb *et al.*, 2013). Algunas de sus principales cualidades son:

- Alta resistencia al desgaste y corrosión.
- Muy buen coeficiente de deslizamiento.
- Buena resistencia química y térmica.
- Muy buena barrera a CO₂, aceptable barrera a O₂ y humedad.
- Compatible con otros materiales barrera que mejoran en su conjunto la calidad barrera de los envases y por lo tanto permiten su uso en mercados específicos.
- Aprobado para su uso en productos que deban estar en contacto con productos alimentarios.

Por todas sus cualidades que presenta desde organizaciones públicas se incentivó la necesidad de dar un uso más eficiente a dicho material. Tuvieron que pasar varios años hasta que en 2016 junto con la técnica del electro hilado se descubrió la eficacia de filtración que posee el PET (Yoon *et al.*, 2006). Las membranas de nanofibras de PET se forman mediante electrohilado con unos diámetros de fibra de 100 nm. La eficacia de filtración ronda el 99% para tamaños de 500 nm (Figura 8). Para reducir la bioincrustación, las esteras se funcionalizan con biocidas de amonio cuaternario y biguanida logrando una reducción de 7 log tanto para bacterias gram negativas como gram positivas.

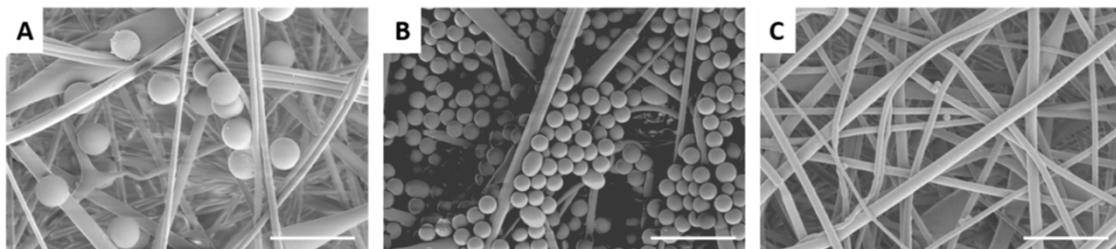


Figura 8. Fibras de Tereftalato de polietileno con biguanida de 2,1 y 0,5 nm (Zander *et al.*, 2016).

Su empleo todavía se encuentra en fase experimental, pero se deslumbra como uno de los materiales más prometedores en el tratamiento de agua debido a su bajo coste de producción y durabilidad.

4.2.1.1.2 Desarrollo de nuevas membranas con nanotecnología

La tecnología de membrana está bien establecida en el área de agua y aguas residuales como un proceso confiable y en gran medida automatizado. Las nuevas actividades de investigación con respecto a la nanotecnología se centran en mejorar la selectividad y la eficiencia del flujo, por ejemplo, mediante el desarrollo de capas antiincrustantes.

Membranas de nanofiltración

La nanofiltración es una de las técnicas de filtración de membrana y puede definirse como un proceso impulsado por presión en el que las moléculas y partículas de menos de 0.5 nm a 1 nm son rechazadas por la membrana.

Las membranas de nanofiltración se caracterizan por un mecanismo único de repulsión basado en la carga que permite la separación de varios iones (Sharma y Sharma, 2013). Se aplican principalmente para la reducción de la dureza, el color, el olor y los iones de metales pesados del agua subterránea. La conversión de agua de mar en agua potable (desalinización) es otro campo de aplicación próspero ya que las tecnologías de desalinización comparables son muy costosas (Jagadevan *et al.*, 2012).

En la Tabla 3 podemos encontrar las diferentes membranas que existentes en la actualidad y que emplean la nanotecnología junto a sus principales propiedades, aplicaciones y enfoques.

Tabla 3. Propiedades, aplicaciones y enfoques innovadores de las nanomembranas.

| Nanomembranas | Propiedades | | Aplicaciones | Enfoques novedosos |
|--------------------------------|---|--|--|---|
| | Positivas | Negativas | | |
| Membrana de nanofiltración | Repulsión basada en carga Baja presión relativa Alta selectividad | Bloqueo de membrana | Reducción de dureza, color y olor Eliminación de metales pesados | Desalinización de agua de mar |
| Membranas nanocompuestas | Mayor hidrofilia Permeabilidad al agua Resistencia a la suciedad Robustez térmica y mecánica | Liberación de nanopartículas | Osmosis inversa Eliminación de micropoluyentes | Membranas bionanocompuestas |
| Membranas de autoensamblaje | Nanoporos homogéneos Membranas a medida | Pequeñas cantidades | Ultrafiltración | Escala de proceso |
| Membranas de nanofibras | Alta porosidad Tamaño a medida Mayor eficiencia de permeado Bactericida | Bloqueo de poros Liberación de nanofibras | Cartucho de filtro Ultrafiltración y prefiltrado Dispositivo independiente | Membrana de nanofibras compuestas Membranas de bionanofibras |
| Membranas a base de aquaporina | Alta selectividad iónica Permeabilidad al agua | Debilidad mecánica | Desalinización a baja presión | Procesos de estabilización |

Membranas a base de aquaporina

Las aquaporinas son proteínas formadoras de poros y ubicuas en las células vivas. Bajo ciertas condiciones, forman canales de agua altamente selectivos que pueden rechazar la mayoría de las moléculas iónicas.

La combinación entre la alta permeabilidad al agua y el rechazo selectivo convierte a las aquaporinas en un material ideal para crear nuevas membranas biomiméticas de alto flujo. Para estabilizar las aquaporinas, se incorporan en vesículas. Dado que las membranas autónomas basadas en estas vesículas son demasiado débiles mecánicamente para sus aplicaciones técnicas previstas, como la ósmosis, están incrustadas en una matriz polimérica o depositadas sobre sustratos poliméricos como las membranas de nanofiltración (Tang *et al.*, 2013).

4.2.1.1.3 Desarrollo de nuevos materiales empleados en membranas

Tras la descripción de las nuevas membranas formadas por el proceso de fotocatalisis y las formadas por nanotecnología es preciso destacar la aparición de nuevos materiales que se emplean para formar membranas y/o recubrir zonas de difícil acceso y diversas morfologías. Para este fin destaca el uso algunas materias primas de origen animal como el tunicado y el polifloruro de vinilideno que posee el caparazón del mejillón sin olvidar el carbón mesoporoso recubierto de sílice. Todos ellos buscan mejorar las propiedades que nos ofrecen las membranas descritas anteriormente y buscan fuentes de materias primas renovables y fáciles de conseguir para reducir costes de producción.

A) Nanocristales de celulosa de tunicado fibroso (TCNC)

Los tunicados o también definidos como urocordados son un subfilo de especie animal encerrados dentro del filo de la especie cordados, que a su vez forman parte de los vertebrados. Contiene aproximadamente 2.800 especie y presentan diversos tamaños desde mm hasta algunos cm, su color es diferente según la especie. Su extracción es sencilla y abundante y sus propiedades hidrófilas le convierten en un material codicioso para diferentes fines. En el caso de los sistemas de purificación la finalidad con el que se emplea es la separación de agua/aceite, ya sea para diferentes tipos de grasas como para el agua y el petróleo (Cheng *et al.*, 2017).

Su valor reside en la celulosa que podemos encontrar en su caparazón. Los nanocristales de celulosa de tunicado fibroso (TCNC) se pueden preparar por hidrólisis ácida y exhiben un alto grado de cristalinidad y un comportamiento de cristal líquido colestérico (Šturcová *et al.*, 2005). Uno de los parámetros más importantes en estos casos es la durabilidad de las membranas de TCNC, donde tras varios experimentos se puede establecer una vida útil de 100 ciclos sin que baje del 95% su efectividad. Este descubrimiento proporciona una estrategia simple, de bajo costo y respetuosa con el medio ambiente para la construcción de dispositivos de separación de agua y aceite altamente efectivos.

B) Membrana de polifluoruro de vinilideno (PVDF) decorada con TiO₂

Tras el descubrimiento del Tunicado muchas han sido las vías de investigación relacionadas con las propiedades de permeabilidad y antiincrustación de materiales procedentes de especies marinas. Un claro ejemplo es el método inspirado en el caparazón del mejillón donde se logró anclar nanopartículas de TiO₂ directamente en la superficie de la membrana de polifluoruro de vinilideno (PVDF), haciendo que la membrana intrínseca de polímero hidrofóbico se volviera hidrófila. El método se ha modificado mediante la introducción de un agente de acoplamiento de silano KH550, y la membrana preparada pasó de un estado hidrofílico común a un estado superhidrófilo (Shi *et al.*, 2016).

Llegados a este punto se ha demostrado que la membrana de PVDF presenta un buen comportamiento en la separación de varios tipos de emulsión de aceite en agua estabilizada con tensioactivo con una eficiencia muy elevada de casi el 99%, también muestra una resistencia duradera al aceite y un rendimiento antiincrustantes en la Figura 9.

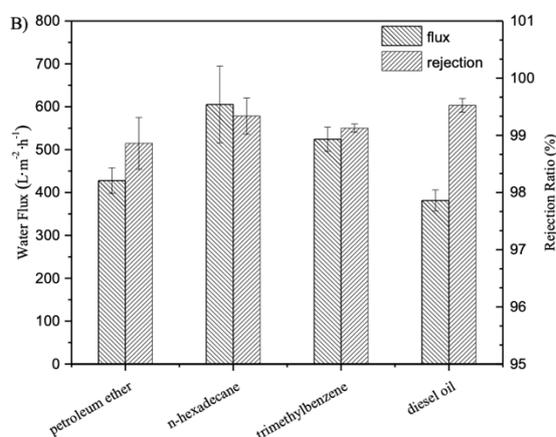


Figura 9. Efectividad de separación para los diferentes medios. (Shi *et al.*, 2016).

Finalmente se puso a prueba la membrana de PVDF llegando a la conclusión de que mantiene una excelente estabilidad frente a medios ácidos y salados, pero no es buena en medios alcalinos. Estos resultados deben tenerse en cuenta a la hora de incorporarlos en los diferentes procesos de tratamientos ya que quizá requiera un ajuste de pH. Respecto a su durabilidad presenta una vida útil de 30 días.

C) Microgranulos de carbono mesoporosos recubiertos de sílice nanoestructurados

Una de las innovaciones más recientes es la síntesis de un novedoso microgránulo esférico nanocompuesto utilizando una técnica fácil de ensamblaje inducido por evaporación de solvente de nanopartículas.

El microgránulo esférico está compuesto por una capa nanoestructurada de sílice hidrofílica que encapsula un carbono mesoporoso hidrófobo en el núcleo. La estructura jerárquica de tales microgránulos núcleo-cubierta se ha caracterizado rigurosamente utilizando técnicas de dispersión de rayos X y neutrones de ángulo pequeño y complementada con microscopía electrónica de barrido (Shi *et al.*, 2016).

Los microgránulos de nanocompuestos de carbono mesoporosos recubiertos de sílice se han sintetizado utilizando la técnica de secado por pulverización. La cubierta hidrofílica de nano-sílice altamente correlacionada no solo proporciona una superficie humectante para una incorporación conveniente en la membrana polimérica, sino que también permite el transporte de agua a través de los poros intersticiales. Tales nuevos microgránulos sintetizados se han fundido en una membrana de polisulfona de ultrafiltración.

El aspecto más importante de esta incorporación es lograr una mayor permeabilidad al agua (en ~ 20%) a través de la membrana compuesta sin sacrificar ninguna característica de separación. De hecho, la incorporación de gránulos de carbono recubiertos de sílice hace que el rechazo del agua sea casi del 100%, lo que tiene un gran impacto según las características de separación de la membrana. La membrana compuesta sintetizada, en comparación con la membrana polimérica estándar, se puede utilizar para obtener los beneficios de las propiedades de adsorción del carbono mesoporoso que se combina con sus propias características de separación por ultrafiltración y, además, con un flujo mejorado.

4.2.1.1.4 Aceites esenciales inmovilizados en micropartículas de sílice

Las tecnologías de filtración pueden mejorarse mediante la inmovilización de agentes antimicrobianos en elementos filtrantes, que retienen e inactivan microorganismos. Un claro ejemplo es la plata al ser un agente antimicrobiano que ha sido inmovilizado en diferentes superficies para inactivar bacterias coliformes (Dankovich y Gray, 2011 ; Oyanedel-Craver y Smith, 2008). Siguiendo este enfoque de investigación, los componentes de aceites esenciales (COE) fueron elegidos como antimicrobianos naturales para diseñar nuevos elementos filtrantes debido a su capacidad antioxidante, actividad antimicrobiana, antifúngica, antiviral e insecticida. Los aceites esenciales y sus compuestos activos se han incorporado en diferentes superficies, como película o papel, para aplicarse en envases de alimentos activos mediante impregnación o inmovilización.

Recientemente, un grupo de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) ha investigado sobre la inmovilización covalente de componentes de aceites esenciales en soportes de sílice para preservar y mejorar su efecto antimicrobiano contra el patógeno y el deterioro microorganismos en estudios *in vitro* e *in situ* como una nueva aplicación, este estudio tuvo como objetivo evaluar estos innovadores soportes funcionalizados con carvacrol, eugenol, timol y vainillina (Figura 10) como nuevos elementos de filtrado antimicrobianos para tratamiento de aguas (Peña-Gómez *et al.*, 2019).

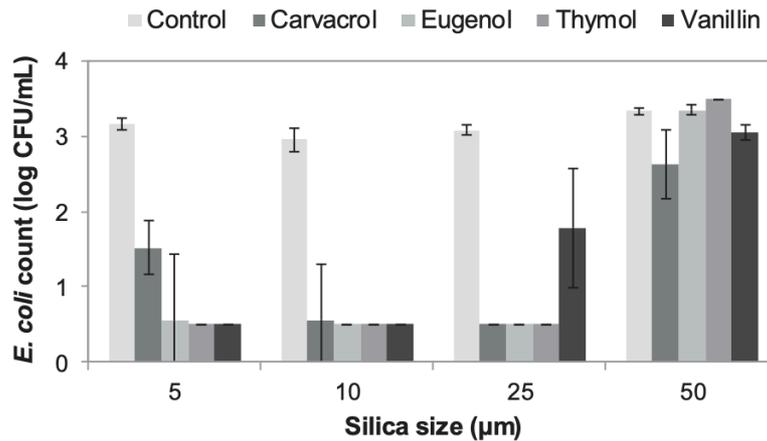


Figura 10. Resultados de la acción antimicrobiana de los diferentes aceites esenciales para diferentes tamaños de partícula (Peña-Gómez *et al.*, 2019).

Como se puede apreciar en la figura anterior, el grupo de investigación logró cuantificar la cantidad de *E. coli* presente en el agua tras hacerla circular por cada filtro llegando a resultados importantes. cuando se utilizaron partículas de una tamaño de 5-25 µm de diámetro, se logró reducir entorno a 3 ciclos logarítmicos la carga microbiana. Para valores de 50 µm y superiores quedó demostrado que no resulta tan eficaz.

4.2.2 Tratamientos químicos

Los sistemas tradicionales empleados para el tratamiento de aguas basados en métodos químicos presentan algunos retos relacionados con la eficiencia y sobre todo con el uso de productos químicos que afectan al ecosistema acuático y terrestre tras su vertido. Estas aguas cumplen los requisitos impuestos por las normativas. Por tanto, como se presenta en la presente sección, se está investigando en los últimos años en el desarrollo de métodos que apuestan sobre todo por el uso de nuevos coagulantes y nuevas formas de oxidación más respetuosos con el medio ambiente y que generen menos efectos secundarios en la población a largo plazo.

4.2.2.1 Empleo de nuevos coagulantes

La investigación en prácticas de tratamiento de aguas ha enfatizado cada vez más la necesidad de alternativas ampliamente accesibles y ambientalmente sostenibles a los químicos potencialmente tóxicos y persistentes que se usan actualmente donde destacan el **quitosano** y el **CO₂** que serán explicados a continuación. El desarrollo de coagulantes más efectivos y respetuosos con el medio ambiente puede mejorar potencialmente la reducción de contaminantes en los procesos de tratamiento posteriores, incluida la filtración y la desinfección química o UV, así como reducir los costes y el consumo de energía al tiempo que minimiza los residuos de sólidos tóxicos y persistentes.

A) Quitosano

El quitosano es un polímero orgánico no tóxico y biodegradable derivado de tratamientos químicos simples de la quitina. Una de las principales fuentes de la quitina son las conchas sobrantes de mariscos de crustáceos, (Lalley *et al.*, 2014). Según los objetivos de eliminación de microbios basados en la salud de la OMS para la tecnología de tratamiento de agua en el hogar, la coagulación con quitosano logró objetivos de protección de la salud tanto para virus como para bacterias.

Los biopolímeros de quitosano se producen a través de la desacetilación de quitina, que es el segundo polisacárido más abundante en todo el mundo (Rinaudo, 2006). La quitina se puede extraer de especies fúngicas o del exoesqueleto de crustáceos como cangrejos, langostas, langostinos, cangrejos y camarones. Por lo tanto, la quitina es una fuente natural de biomasa que es abundante, no tóxica y biodegradable (Chakraborty *et al.*, 2015).

Los polímeros de quitina consisten en unidades de N-acetil glucosamina (GlcNAc) y glucosamina (GlcN), que contienen grupos amino (-NH₂). El proceso de desacetilación influye en la cantidad de grupos amino a lo largo de la estructura de glucosamina. Cuando se disuelven, los grupos amino en las unidades de glucosamina protonarán, dando como resultado una mayor solubilidad y carga positiva (propiedad catiónica). La carga positiva es una propiedad crítica para un coagulante, ya que un coagulante con alta densidad de carga positiva en agua a pH neutro o casi neutro, resulta en la eliminación eficiente de turbidez y microbios cargados negativamente, más que un coagulante de menor densidad de carga positiva o negativa. La mayoría de los coloides naturales en el agua, por ejemplo, arcillas, limos, bacterias, virus, protozoos, etc., tienen una carga negativa en el rango de pH típico de las aguas naturales, aproximadamente pH 5-9 (Crittenden, J.C., 2012)

Juntas, estas propiedades químicas hacen que el quitosano sea un biopolímero único y efectivo para el puente entre partículas, la agregación de partículas de flóculos y la precipitación, y por lo tanto, un candidato ideal para su uso en el tratamiento del agua (Renault *et al.*, 2009). Dados estos atributos favorables, se está investigando sistemáticamente los quitosanos derivados de la quitina para su uso en la eliminación de microbios del agua como tratamiento previo para el punto de uso (POU) o tratamiento de agua a escala comunitaria utilizando filtros cerámicos.

B) CO₂

La disolución de CO₂ en la suspensión crea gradientes de solutos que impulsan el movimiento forético de las partículas. Debido al gran potencial de difusión generado por la disociación del ácido carbónico, las partículas coloidales se alejan o se dirigen hacia la interfaz gas-líquido, dependiendo de su carga superficial. Como se aprecia en la Figura 10 solamente usando el movimiento dirigido de partículas inducidas por la exposición al CO₂, se ha conseguido un proceso de filtración de partículas sin membrana, de flujo continuo y escalable que exhibe bajo consumo de energía, tres órdenes de magnitud más bajo que los procesos convencionales de microfiltración / ultrafiltración, y está esencialmente libre de incrustaciones.

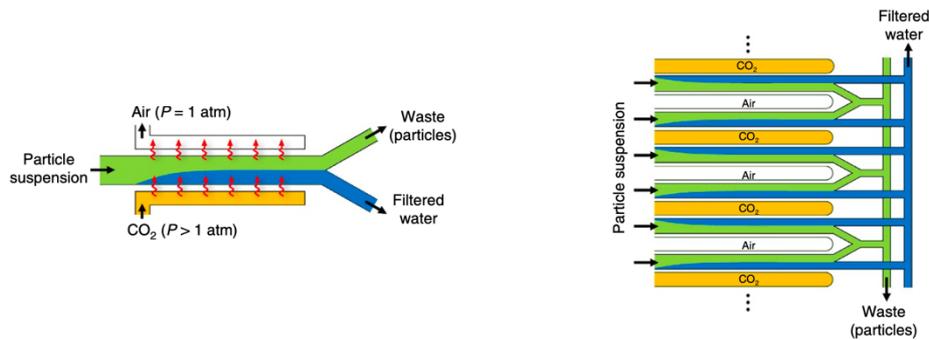


Figura 11. Esquema del proceso de filtración con CO_2 (Shin et al., 2017).

Si nos fijamos en la Figura 11 se aprecia un dispositivo de filtración de partículas de flujo continuo donde la dinámica coloidal observada sugiere una ruta alternativa para separar partículas sin el uso de membranas o filtros, que es exponiendo la suspensión coloidal a CO_2 para concentrar las partículas localmente como en el fraccionamiento de flujo de campo (Giddings, 2016). Para ello una suspensión coloidal fluye a través de un canal recto en un material permeable a los gases, en este caso, polidimetilsiloxano (PDMS) (Teranaka et al., 2017). Separado por una pared delgada, un canal de gas CO_2 pasa paralelo al canal de flujo principal. El gas penetra a través de la pared y se disuelve en la corriente de flujo, induciendo un movimiento de partículas transversal a la dirección del flujo; la dirección del movimiento depende de la carga superficial de las partículas. Un canal de aire en el otro lado de la pared evita la saturación de CO_2 en la suspensión, manteniendo así un mayor gradiente de concentración y permitiendo una mayor migración de partículas por difusioforesis. Después de que todas las partículas se hayan concentrado en un lado del canal, se separan dividiendo el flujo cerca de la salida.

La tasa de eliminación de partículas en términos de valor de reducción logarítmica se aproxima a 5,3 siendo comparable a los valores para las técnicas convencionales de microfiltración y ultrafiltración (Shin et al., 2017). Como el método demostrado no incluye ningún filtro, su consumo de energía es bajo en comparación con los métodos de filtración convencionales. La disipación de energía se reduce al menos 3 órdenes de magnitud porque el fluido puede fluir a través de un canal que es mucho más ancho que las partículas en lugar de pasar por los poros que son más pequeños que las partículas. Pese a todas sus potenciales ventajas su uso todavía es limitado y está en fase de desarrollo.

4.2.2.2 Métodos de oxidación

Los procesos de oxidación se basan en procesos químicos capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes, que involucran la generación y uso de especies poderosas transitorias, principalmente el radical hidroxilo (OH). En este caso se explicarán tres métodos de oxidación, alguno de ellos más conocidos como son la fotocatalisis y el uso de ozono y otros menos conocidos como el Fenton, que consiste en la incorporación de sales de hierro.

A) Oxidación mediante Fenton

El proceso de oxidación Fenton fue descrito por primera vez en 1894 por Henry J. Fenton, cuando descubrió que el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) podía activarse con iones ferrosos para oxidar ácido tartárico (Pignatello et al., 2006). Este proceso consiste en la adición de sales de hierro en

presencia de $H^2 O^2$, en medio ácido, para la formación de radicales OH. A la combinación de $H^2 O^2$ y sales de hierro se denomina reactivo Fenton (Rubio *et al.*, 2014). En aspectos generales, los contaminantes presentes en las aguas residuales de origen petroquímico presentan baja solubilidad en el agua y se bioacumulan a lo largo de la cadena trófica, representando una seria amenaza para los ecosistemas. A continuación, en la Tabla 4 se representan las principales ventajas e inconvenientes que presenta el uso de la oxidación por medio del Fenton.

Tabla 4. Ventajas y desventajas del proceso oxidativo Fenton.

| Ventajas | Inconvenientes |
|--|--|
| Gran polibalencia en la degradación de contaminantes en efluentes petroquímicos | En ocasiones no se consigue la mineralización completa |
| Los reactivos empleados son abundantes, asequibles y de fácil manejo | Requiere ajustes de pH antes y después del tratamiento |
| No existen limitaciones en la transferencia de masa, reactores sencillos de utilizar | Tratamiento posterior para eliminar el hierro |
| No precisa de fuente de energía | Formación de complejos de hierro estables |
| Reacción a temperatura y presión ambiente | |

Aunque el sistema Fenton ha mostrado ser efectivo en el tratamiento de afluentes derivados de la industria del petróleo, este proceso presenta inconvenientes ligados fundamentalmente al uso de grandes cantidades de hierro para conseguir altos rendimientos.

B) Oxidación mediante Fotocatálisis

La fotocatálisis es un proceso de oxidación avanzado que se emplea en el campo del tratamiento de aguas y aguas residuales, en particular para la eliminación oxidativa de micropoluyentes y patógenos microbianos (Friedmann *et al.*, 2010).

Debido a su alta disponibilidad, baja toxicidad, la eficiencia de costes, y propiedades de los materiales bien conocidos, TiO_2 es ampliamente utilizado como un fotocatalizador (Qu *et al.*, 2013). Cuando el TiO_2 se irradia con luz ultravioleta con una longitud de onda apropiada en el rango de 200–400 nm, los electrones serán fotoexcitados y pasarán a la banda de conducción. Como resultado de la excitación fotónica, se crean pares de electrones, que conducen a una compleja cadena de reacciones oxidativas-reductoras (Azrague *et al.*, 2007). Por lo tanto, la biodegradabilidad de las sustancias altamente descomponibles se puede aumentar en una etapa de pretratamiento.

Principalmente, los compuestos persistentes como los antibióticos u otros micropolutantes pueden eliminarse fotocatalíticamente en los procesos de pulido, como los pasos de clarificación terciaria en las plantas municipales de tratamiento de aguas residuales. Sin embargo, como la radiación ultravioleta es solo alrededor del 5% de la luz solar, la eficiencia del fotón es bastante baja, lo que limita el uso a escala industrial. La activación de TiO_2 generalmente es inducida por una lámpara ultravioleta, pero también se permite la luz solar además de las fuentes de luz artificial.

Una solución para el rechazo de las nanopartículas fotocatalíticas es su inmovilización en materiales definidos mediante el uso de procesos de recubrimiento adecuados, como la deposición física o química de vapor, así como procesos de recubrimiento químico húmedo. Cuando se usa un material de microfiltro como sustrato, se obtiene un efecto beneficioso de múltiples barreras que comprende filtración mecánica y descontaminación química (Figura 11).

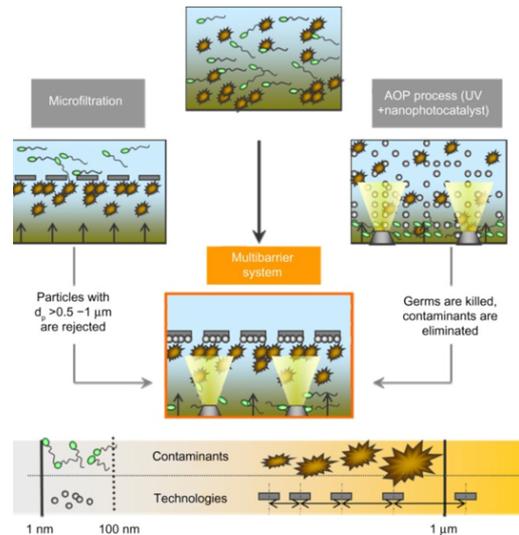


Figura 12. Efecto de múltiples barreras de partículas fotocatalíticas de dióxido de titanio en combinación con microfiltración. (Qu *et al.*, 2013).

C) Oxidación mediante Ozono

En la actualidad el uso de ozono se podría clasificar como técnica novedosa pese a que su descubrimiento y uso en la desinfección de aguas data de 1893 con la primera instalación en Ousbaden (Holanda) para la desinfección y potabilización de aguas para el consumo humano (Fowler *et al.*, 2016). En el caso de España no ha sido hasta la última década cuando se ha ido incorporando dicho material a los sistemas de purificación de aguas. En este caso uno de los usos más interesantes respecto al ozono es la eliminación de compuestos farmacéuticos en el medio ambiente acuático.

Disuelto en el agua, el ozono forma radicales hidroxilo (HO) que son los responsables de reaccionar con los microorganismos para inactivarlos. Sin embargo, la acción de las reacciones directas del ozono con los contaminantes, tienen un mayor rendimiento de desinfección, que el radical hidroxilo (Hansen *et al.*, 2016). Las principales ventajas que nos ofrece este proceso son:

- Elimina los olores y sabores del agua.
- No deja residuos.
- Es compatible con otros tratamientos.
- No afecta el pH.
- No colorea el agua.

En los últimos años las tendencias al uso de ozono han propiciado nuevas investigaciones respecto a los sistemas de purificación donde destacan algunos como:

- Uso de O₃ para controlar el ensuciamiento de la membrana de ultrafiltración en el tratamiento de agua potable: aplicación de ozono a dosis bajas en un tanque de membrana sumergida.
- Inhibición de la formación de bromato mediante la ozonización en el proceso de electroperoxona.
- Reducción del número de algas incrustadas en los filtros de cerámica.
- Eliminación de productos farmacéuticos y productos de cuidado personal.

4.2.2.3 Sistemas de Nanoadsorción

La adsorción es la capacidad de todas las sustancias sólidas para atraer a sus superficies moléculas de gases o soluciones con las que están en contacto cercano. Los sólidos que se usan para adsorber gases o sustancias disueltas se llaman adsorbentes, y las moléculas adsorbidas generalmente se denominan colectivamente como el adsorbato ([Adsorption surface phenomenon Britannica, 2020](#))

Debido a su alta superficie específica, los nanoadsorbentes muestran una tasa de adsorción considerablemente más alta para los compuestos orgánicos en comparación con el carbón activado granular o en polvo. Tienen un gran potencial para procesos de descontaminación novedosos, más eficientes y más rápidos destinados a la eliminación de contaminantes orgánicos e inorgánicos como metales pesados y micropolutantes ([Gehrke et al., 2015](#)). Además del ahorro de materiales adsorbentes, la eficacia superior del proceso permite la implementación de dispositivos de tratamiento de agua y aguas residuales más compactos con huellas ecológicas más pequeñas, particularmente para aplicaciones descentralizadas y sistemas de punto de uso. Las actividades de investigación actuales se centran en los siguientes tipos de nanoadsorbentes:

- Nanoadsorbentes a base de carbono, es decir, nanotubos de carbono (CNT)
- Nanoadsorbentes a base de metal
- Nanoadsorbentes poliméricos
- Zeolitas

A) Adsorción en nanotubos de carbono (CNT)

Los nanotubos de carbono (CNT) son alótropos de carbono con una nanoestructura cilíndrica. Dependiendo de su proceso de fabricación, los CNT se clasifican como nanotubos de pared simple y nanotubos de pared múltiple. Además de tener un área superficial específica alta y una química de superficie ajustable. Debido a su superficie hidrofóbica, los CNT deben estabilizarse en suspensión acuosa para evitar la agregación, la cual reduce la superficie activa. Se pueden usar para la adsorción de contaminantes persistentes, así como para preconcentrar y detectar contaminantes ([Pan y Xing, 2008](#)). Los iones metálicos son absorbibles por CNT a través de la atracción electrostática y la unión química ([Cerezo, 2013](#)).

Además, los CNT exhiben propiedades antimicrobianas al causar estrés oxidativo en las bacterias y destruir las membranas celulares. Aunque se produce oxidación química, no se producen subproductos tóxicos, lo cual es una ventaja importante sobre los procesos de desinfección convencionales como la cloración y la ozonización ([Liu et al., 2013](#)). Se pueden regenerar simplemente mediante ajustes apropiados de las condiciones de funcionamiento, como el cambio de pH.

Otra de sus posibles aplicaciones es la de implementar los CNT en membranas multifuncionales que pueden eliminar no solo la sal sino también contaminantes orgánicos y metálicos. Se espera que los dispositivos de purificación de agua potable de próxima generación equipados con estos nuevos CNT tengan propiedades superiores de desalinización, desinfección y filtración.

Recientemente, un equipo de investigadores estadounidenses desarrolló una esponja hecha de CNT puro con una pizca de boro que muestra una notable capacidad para absorber el aceite del agua. El aceite puede almacenarse en la esponja para su posterior recuperación o quemarse para que la esponja pueda reutilizarse. Si logran generar láminas grandes o encuentran una manera de soldar las láminas, el material de esponja se puede aplicar para eliminar los derrames de petróleo para su remediación ([Hashim et al., 2012](#)).

Aunque las CNT tienen ventajas significativas sobre el carbón activado, su uso a escala industrial para grandes plantas municipales de tratamiento de agua y aguas residuales no se espera en el mediano plazo debido a los altos costos de producción.

B) Nanoadsorbentes poliméricos

Los nanoadsorbentes poliméricos, como los dendrímeros (moléculas repetidamente ramificadas) son utilizadas para eliminar compuestos orgánicos y metales pesados. Los compuestos orgánicos pueden ser adsorbidos por las capas hidrofóbicas interiores, mientras que los metales pesados pueden ser adsorbidos por las ramas exteriores (Khajeh *et al.*, 2013). Un ejemplo de ello se observa en el estudio de (Diallo *et al.*, 2005) donde integraron nanoadsorbentes poliméricos en un dispositivo de ultrafiltración para eliminar el cobre del agua. Casi todos los iones de cobre se recuperaron mediante el uso de este sistema combinado de dendrímero-ultrafiltración. El adsorbente se regenera simplemente a través de un cambio de pH. Sin embargo, debido a la compleja síntesis de múltiples etapas de los dendrímeros, hasta ahora no hay proveedores comerciales, a excepción de algunas empresas recientemente fundadas en la República Popular de China.

Por otra parte, (Sadeghi-Kiakhani *et al.*, 2013) produjeron un bioadsorbente altamente eficiente para la eliminación de compuestos aniónicos como el tinte del agua residual textil mediante la preparación de una nanoestructura combinada de quitosano-dendrímero. El bioadsorbente es biodegradable, biocompatible y no tóxico alcanzando tasas de eliminación para ciertos colorantes de hasta el 99%.

C) Adsorción mediante Zeolitas

Las zeolitas en combinación con los átomos de plata se conocen desde principios de los años ochenta (Baker, Ozin and Godber, 1985). La zeolita tiene una estructura muy porosa en la que se pueden incrustar nanopartículas como iones de plata. Allí se liberan de la matriz de zeolita mediante intercambio con otros cationes en solución (Egger *et al.*, 2009). Otra posibilidad es aplicar las propias zeolitas como nanopartículas, como lo demuestran (Tiwari *et al.*, 2014) que prepararon nanozeolitas mediante fragmentación inducida por láser de micropartículas de zeolita usando nanozeolitas en la secuenciación de reactores discontinuos para el tratamiento de aguas residuales (Jung *et al.*, 2004)

En la Tabla 5 se comparan las propiedades, aplicaciones y enfoques innovadores más importantes de los tres tipos de nanoadsorbentes descritos en esta sección.

Tabla 5. Propiedades, aplicaciones y enfoques innovadores de los nanoadsorbentes.

| Nanoadsorbentes | Propiedades | | Aplicaciones | Enfoques novedosos |
|-----------------------------|--|---|---|---|
| | Positivas | Negativas | | |
| Nanotubos de carbón | Bactericida y reutilizables | Alto coste y posibles riesgos para la salud | Contaminantes altamente degradables | Nanotubos de carbono ultra largos con adsorción alta de sal |
| Nanoadsorbentes poliméricos | Bifuncional y reutilizable | Proceso complejo de producción | Remoción de orgánicos y metales pesados | Bioadsorbente biodegradables y no tóxico |
| Zeolitas | Liberación controlada de nanosilver, bactericida | Superficie activa reducida | Proceso de desinfección | Nanozeolitas por fragmentación inducida por láser. |

4.2.2.4 Nanometales y óxidos de nanometal

Los óxidos metálicos a nanoescala son alternativas prometedoras al carbón activado y nanoadsorbentes efectivos para eliminar metales pesados y radionucleidos. Además de tener un área superficial específica alta, presentan una distancia de difusión intrapartícula corta y son compresibles sin una reducción significativa del área superficial. Algunos de estos óxidos metálicos a nanoescala (p. Ej., Nanomaghemita y nanomagnetita) son superparamagnéticos, lo

que facilita la separación y recuperación mediante un campo magnético de bajo gradiente. Se pueden emplear para la creación de filtros de medios de adsorción y reactores de suspensión (Alvarez y Li, 2013).

A) Plata coloidal y nano-dióxido de titanio

La plata coloidal o plata en forma de nanopartículas se ha utilizado en el proceso de revelado de fotografías desde finales de 1800 y se ha registrado en la Agencia de Protección Ambiental para su uso en alcantaras para piscinas desde 1954 y filtros de agua potable desde la década de 1970. Aunque la plata coloidal exhibe una actividad antimicrobiana fuerte y de amplio espectro, apenas tiene efectos dañinos en los humanos. Ya se aplica a los sistemas de desinfección del agua en el punto de uso y a las superficies antiincrustantes (Nowack *et al.*, 2011). Por su parte, el dióxido de nano-titanio (TiO_2), es otro nanomaterial con alta estabilidad química y baja toxicidad humana a un precio económico.

La principal ventaja del nano- TiO_2 sobre nanoplata es el tiempo de vida casi interminable de tales recubrimientos, ya que el TiO_2 como catalizador permanece sin cambios durante el proceso de degradación de compuestos orgánicos y microorganismos. El efecto antimicrobiano de la plata coloidal se basa en la liberación continua de iones de plata. Después de un cierto período de operación, dependiendo del grosor y la composición de las capas de nano-plata, el revestimiento debe renovarse o el dispositivo completo, incluido el material a granel, debe eliminarse, lo que conlleva costos de reemplazo significativos. La principal desventaja que presenta el TiO_2 frente a la plata coloidal es la necesidad de una fuente de energía para su activación y su posterior liberación de iones de plata ya que la plata coloidal mata las bacterias sin necesidad de dispositivos adicionales que consumen energía. Eso hace que la nanoplata sea un desinfectante favorable para áreas remotas.

B) Nanopartículas de hierro cerovalente (Fe (0))

Como alternativa a la plata coloidal y al TiO_2 , las nanopartículas de hierro cerovalente se puede usar para la recuperación de aguas subterráneas contaminadas con fluidos de hidrocarburos clorados y percloratos. Para su generación en las últimas décadas muchas han sido las investigaciones para la síntesis de las partículas nanométricas de Fe (0) donde destacan diversos métodos como: vía mecánica (uso del molino de bolas), arco de plasma de hidrógeno, descomposición térmica, sonoquímica y en fase acuosa por reducción química; estas técnicas difieren en el grado de efectividad, complejidad y costo (Ni *et al.*, 2005; Schüth *et al.*, 2007). De entre los diferentes métodos de obtención, la reducción química de iones de Fe (II) o Fe (III) en medio acuoso resulta ser un método rápido y fácil; que por lo general usa borohidruro de sodio (NaBH_4) como agente reductor (Zhang, 2003).

Las nanopartículas de hierro cerovalente se puede inyectar una suspensión de hierro cerovalente en el agua subterránea, lo que permite el tratamiento *in situ* del agua subterránea (Matlochová *et al.*, 2013). Por un lado, debido a su alta superficie específica, el hierro cerovalente es mucho más reactivo en comparación con el hierro granular convencional; Por otro lado, como resultado de su alta reactividad, el tiempo de vida del hierro nano-cero valent es muy bajo, por lo que es necesario un mayor trabajo de investigación, por ejemplo, sobre modificaciones de la superficie, para la estabilización de estas nanopartículas (Homhoul *et al.*, 2011). En la Tabla 6 se puede encontrar un breve resumen comparativo de sus propiedades, aplicaciones y enfoques para los diferentes materiales explicados anteriormente.

Tabla 6. Propiedades, aplicaciones y enfoques para los nanometales y óxidos de nanometal.

| Nanometales y óxidos de nanometal | Propiedades | | Aplicaciones | Enfoques novedosos |
|------------------------------------|--|-------------------------------------|---|--|
| | Positivas | Negativas | | |
| Nanosilver y nano-TiO ₂ | Bactericida y baja toxicidad humana | Durabilidad limitada del Nanosilver | Desinfección del agua en el punto de uso | Modificación de TiO ₂ para activación por luz visible |
| | Nano-TiO ₂ alta estabilidad química | Requiere activación ultravioleta | Superficies anticrustantes | Nanotubos de TiO ₂ |
| | Larga vida útil | | Descontaminación de compuestos orgánicos | |
| | | | Áreas remotas | |
| Hierro Nano Zero-Valent | Altamente reactivo | Requiere estabilización | Remediación de aguas subterráneas (hidrocarburos, clorados, percolados) | Atrapamiento en matrices poliméricas para estabilización |

4.2.2.5 Luz Ultravioleta

El uso de luz ultravioleta para la purificación de agua potable no es reciente, es un concepto que ha existido desde hace decenas de años, pero no ha sido hasta la última década cuando se ha empleado en ámbitos de desinfección de fluidos (Song, 2016). La radiación ultravioleta se genera con una lámpara especial. Cuando la radiación penetra la pared celular de un organismo, el material genético es modificado y la célula es incapaz de reproducirse. La luz ultravioleta destruye virus y bacterias, sin embargo, como en el caso del ozono, es necesario del uso posterior de cloro, para prevenir el recrecimiento de bacterias. La luz ultravioleta provee un método de operación y mantenimiento sencillo, es útil con tiempos cortos de contacto y no genera residuos tóxicos o subproductos (Garvey *et al.*, 2015) (Hijnen *et al.*, 2006).

Entre sus principales limitaciones se encuentran su incapacidad de inactivar protozoarios, y su ineficiencia para tratar aguas turbias con sólidos suspendidos, color o materia orgánica soluble. En estos casos la radiación será absorbida por estas sustancias y la desinfección se verá seriamente limitada. La efectividad de la radiación ultravioleta con vías a desinfectar agua depende de la dosis absorbida por los organismos, en función de la intensidad de la lámpara utilizada y el tiempo de exposición. Si la dosis no es suficiente, el material genético puede verse dañado pero no destruido, lo que permitirá el recrecimiento bacteriano una vez que cese el tratamiento (Sassi *et al.*, 2005).

4.2.3 Tratamientos biológicos

En el caso de los tratamientos biológicos es necesario recordar como en los sistemas biológicos tradicionales destaca el uso de bacterias para sus tratamientos como es el caso de los fangos activados y al género *Acinetobacter* entre otros. Frente a las limitaciones que presentan los sistemas mencionados han surgido en la última década nuevas tendencias como el uso de enzimas o la biofiltración combinada con ozono o donde se usan nuevas especies de bacterias (nitrosomonas) capaces de solucionar aspectos como la degradación de moléculas complejas, el rendimiento y la vida útil de los filtros.

4.2.3.1 Enzimas en el tratamiento del agua

La principal fuente de estas enzimas extracelulares son los hongos ligninolíticos (Kuhad, R. C, 2007). El uso de una sola enzima o una asociación de enzimas relacionadas puede permitir la inactivación de moléculas complejas, antibióticos y otros compuestos disruptores endocrinos (EDC) en los efluentes de aguas residuales, eliminando así tales compuestos del agua y del medio ambiente (Abhijit M, 2015)

En la actualidad se ha demostrado que los tratamientos con enzimas son más ecológicos y energéticamente eficientes en comparación con los tratamientos químicos. En lo referente al tratamiento de las aguas residuales destacan las siguientes enzimas:

- **Oxidorreductasas** (polifenol oxidasas, peroxidasas y **lacasas**).
- **Hidrolasas** (proteasas, celulasas, esterases y lipasas).

Las oxidorreductasas son una clase importante de enzimas para la desintoxicación de los efluentes de la industria textil y las aguas residuales que contienen compuestos disruptores endocrinos (EDC), mientras que las hidrolasas tienen el potencial de tratar solo los desechos biológicos que pueden ser eliminados de manera más efectiva por microorganismos en lodos o aguas residuales. (Cabana *et al.*, 2007). Las oxidorreductasas, peroxidasas y lacasas son capaces de atacar una amplia gama de sustratos contaminantes. En el caso de las peroxidasas existen algunas limitaciones como:

- Son específicas del sustrato.
- Hay un número limitado de sustratos donde catalizan la reacción de degradación, p. carbamazepina (Hata *et al.*, 2009).
- Requieren la presencia de H_2O_2 como cofactor para iniciar las reacciones de degradación.

En vista de las características mencionadas anteriormente, las lacasas se consideran la enzima más prometedora para una tecnología de purificación de agua más ecológica y menos costosa (Singh *et al.*, 2018).

Las lacasas se utilizan para la desintoxicación de aguas residuales de las industrias de productos de papel y pulpa y para la degradación casi completa de productos químicos sintéticos o artificiales (Widsten y Kandelbauer, 2008).

Respecto a la degradación de compuestos químicos complejos (farmacéuticos) el método de empleo más estudiado consiste en agregar un mediador redox con la intención de aumentar su actividad enzimática y alargar su vida útil. Estos mediadores (redox) reaccionan con la lacasa para generar intermedios muy reactivos, que agotarán los sustratos contaminantes relativamente rápido. Lo mejor de todo ello es que la lacasa es capaz de regenerarse y es capaz de realizar hasta 50 ciclos sin alterar de forma relevante su efectividad como puede apreciarse en la Figura 13.

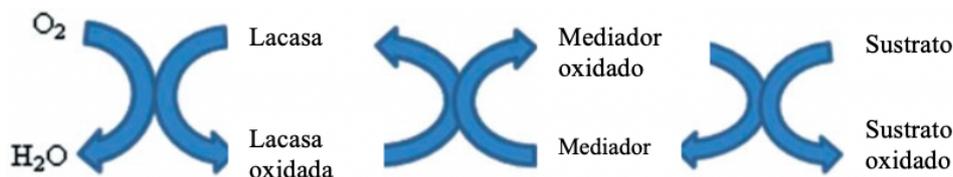


Figura 13. Lacasa con un mediador redox en un ciclo degradante

El uso de lacasa junto con sus mediadores redox también aumenta la tasa de agotamiento de los compuestos disruptores endocrinos (EDC). Sin embargo, la adición de estos mediadores a la mezcla de reacción aumenta los costos del proceso. Por lo tanto, el tratamiento a gran escala mediante la adición de mediadores no es una alternativa económicamente viable para el tratamiento continuo de aguas residuales. Además, la adición de algunos de estos mediadores puede ser tóxica y, posteriormente, plantear dificultades para eliminarlos de la mezcla de reacción.

4.2.3.2 Biofiltración

La biofiltración es un proceso en el que un filtro granular convencional está diseñado para eliminar no solo partículas finas, sino también compuestos orgánicos disueltos a través de la degradación microbiana. La biofiltración puede reducir la necesidad de productos químicos en el tratamiento del agua potable y, por lo tanto, las aplicaciones mejoradas de la biofiltración en el

tratamiento del agua potable pueden verse como una tecnología de ingeniería ecológica o sostenible.

Las tendencias recientes en la tecnología de biofiltración para el tratamiento del agua potable persiguen extender el rendimiento de los biofiltros obteniendo una mejor comprensión de las limitaciones operativas. Los parámetros operativos más importantes que influyen en el rendimiento de la biofiltración son: la carga hidráulica (HLR), el tiempo de contacto del lecho vacío (EBCT), la temperatura, el tipo de medio y las condiciones de retrolavado (Basu, Dhawan and Black, 2016). Las últimas tendencias en biofiltración son: utilización de ozono de manera conjunta a la biofiltración y el uso de nuevas bacterias para la eliminación del nitrógeno.

A) Ozono + biofiltración

La combinación de ozono y filtro biológico aireado (O₃ / BAF) ha sido ampliamente estudiada y aplicada en el pulido de diferentes efluentes secundarios biológicos. O₃ / BAF tiene las ventajas de una alta tasa de eliminación de contaminantes, bajo costo operativo y tipos de combinación flexibles.

El ozono puede romper macromoléculas refractarias en fragmentos pequeños y biodegradables, aumentando la biodegradación. El acoplamiento de ozonización y BAF es eficiente en la eliminación de contaminantes orgánicos refractarios de diferentes aguas residuales. La ozonización también se puede utilizar como la opción de postratamiento después de BAF para garantizar las cualidades del efluente (Gunten, 2003).

La ozonización puede ocurrir a través de dos vías; directa o indirecta. La vía directa favorece reacciones principalmente con insaturados de dobles enlaces y compuestos aromáticos, aunque a menudo ocurren reacciones con las aminas o sulfuros (C. Gottschalk, 2000). En el caso de la vía indirecta los radicales hidroxilos se forman y reaccionan con la materia orgánica natural (NOM) ya que los radicales de hidroxilo son oxidantes fuertes, no selectivos.

Pese a que el indirecto presenta mejores prestaciones a pH bajos el método directo del O₃/BAF integrado ha atraído cada vez más atención por sus importantes ventajas (Qi et al. 2011 ; He et al. 2013). Por ejemplo, puede ahorrar el suministro de aire y la ocupación de la tierra por su configuración compacta. Más importante aún, muchos estudios previos han informado que una baja concentración de O₃ en el efluente de ozonización puede mejorar el rendimiento de la biopelícula en el BAF, por lo que puede mejorar la capacidad de tratamiento completo (Wang et al. 2009a ; Fu 2017). A continuación, en la Tabla 7 se compara la eficiencia que tiene el proceso de ozonificación + biofiltración frente a solo la ozonificación.

Tabla 7. Eficiencia en % del uso de ozono u ozono+biofiltración.
(Basu et al., 2016)

| Características | Eficiencia | |
|--|-----------------------------|------------------------------|
| | Oxidación con Ozono | Ozono + Biofiltración |
| Color | 52-74% | 85% |
| Carbon orgánico disuelto | 2-33% | 14-50% |
| Carbón orgánico disuelto biodegradable | Incrementa de un 5 a un 50% | Incrementa de un 10 a un 50% |
| UVA (254 nm) | 28-75% | 60-80% |
| Eliminacion de Trihalometanos | 5-55% | 40-80% |

Tal y como se puede observar, tras implementar la biofiltración al proceso de ozonificación el porcentaje de eficiencia incrementa entorno al 20-30% para los diferentes escenarios. Pese a que los resultados sean prometedores no debemos olvidar como muchos de ellos continúan en fase experimental y cada empresa debe evaluar si es posible implementarlo desde el punto de vista económico.

B) Identificación de nuevas especies de bacterias para la eliminación de Nitrógeno.

El nitrógeno se encuentra en las aguas superficiales y subterráneas en forma de amoníaco, nitritos y nitratos. Todas estas formas son indeseables en el agua potable. Tradicionalmente, la cloración de punto de ruptura se ha utilizado para eliminar el amoníaco. Sin embargo, esto puede ser una forma de inhibición de alto de coste y también puede afectar en una disminución en la demanda de cloro a corto plazo (Wert *et al.*, 2007).

El desarrollo de la nitrificación en la filtración biológica es un método rentable para lograr la eliminación simultánea de amoníaco. Dicho método se basa en la aplicación de dosis de la bacteria *nitrosomonas* capaces de convertir el amoníaco en nitrito sin la necesidad de pasos intermedios a los cuales estamos habituados con la oxidación del amoníaco a nitrito con la ayuda de enzimas como amonio monooxigenasa (AMO) e hidroxilamina oxidoreductasa (HAO). Además, la bacteria presenta ventajas respecto al coste productivo, los inputs necesarios para su proliferación y la durabilidad (Olańczuk-Neyman and Bray, 2000).

En la actualidad varios son los estudios que siguen esta tendencia en las que investigan las dosis óptimas al igual que ajustan los escenarios adecuados para obtener una tasa de eficiencia por encima del 96%. Pese a sus descubrimientos entorno al año 2000 no ha sido hasta el 2016 donde se ha empezado a explotar con fines humanitarios.

5. Conclusión

El acceso al agua potable por parte de toda la población es un derecho fundamental. Sin embargo, todavía quedan muchas zonas geográficas donde el agua es escasa o no es apta para el consumo, siendo por tanto el acceso al agua potable por parte de toda la población uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible para alcanzar antes de 2030.

Con el fin de purificar el agua, y hacerla apta el consumo humano, existen diferentes sistemas basados en principios físicos, químicos y biológicos, los cuales se han empleado desde años. Algunos de estos sistemas poseen algunas limitaciones como son el empleo de grandes estructuras, que actualmente se consideran obsoletas; el empleo de sustancias químicas (coagulantes, oxidantes...) que, pese a cumplir las normativas, son capaces de alterar a corto plazo los ecosistemas adyacentes y a largo plazo la salud humana; o el uso de microorganismos capaces de afectar a la salud humana (aerobios mesófilos, enterobacterias coliformes ...). Por último, hay que destacar el gran mantenimiento de los equipos, siendo necesario un gran número de operarios de mantenimiento, así como de piezas de recambio.

En respuesta a estas limitaciones, en la última década, muchas han sido las vías de investigación que buscan solventar las limitaciones citadas anteriormente. Respecto a las nuevas tendencias en sistemas de purificación de agua basados en principios **físicos**, caben destacar:

- Los sistemas relacionados con el uso de nuevos materiales para la construcción de membranas (acetato de celulosa, quitina y el tereftalato de polietileno) por medio de la técnica del electrohilado, que nos aportan buena resistencia al desgaste, a la corrosión y además presentar la capacidad de autoregenerarse.
- El uso de la nanotecnología para generar membranas capaces de mejorar parámetros como la reducción de la dureza, el color, el olor y los iones de metales pesados del agua subterránea y agua salada.
- Los nuevos materiales de origen animal (extractos de tunicado y polifluoruro de vinilideno) que permiten generar membranas con propiedades muy valoradas como son la permeabilidad y la antiincrustación.
- La funcionalización de superficies con aceites esenciales con propiedades antimicrobianas, los cuales permiten generar sistemas de filtración esterilizante sin modificar otras propiedades del agua.

En el caso de los sistemas **químicos**, destaca el desarrollo de nuevos coagulantes basados en quitosano y CO₂, que ofrecen mayor eficiencia, menor coste y son más respetuosos con el medio ambiente. Respecto a la oxidación, se han descrito diferentes métodos (Feton, fotocatalisis y ozono), los cuales no alteran el olor y color del agua y son compatibles con otros tratamientos. Además, gracias a la nanotecnología se han podido desarrollar materiales más eficientes para la adsorción de contaminantes orgánicos y metálicos presentes en el agua como son los nanotubos de carbono (CNT), nanoadsorbentes a base de metales, nanoadsorbentes poliméricos y zeolitas.

Por último, en el caso de las nuevas tendencias en sistemas **biológicos** para la purificación de agua, cabe destacar la sustitución de grandes tanques de fangos activos por el de pequeños reactores donde se utilizan enzimas, como la lacasa, capaces de degradar casi completamente los productos químicos sintéticos o artificiales presentes en el agua. Por otra parte, se han identificado nuevas bacterias como las nitrosomas, capaces de convertir el amoníaco en nitrito el amoníaco en nitrito sin la necesidad de pasos intermedios a los cuales estamos habituados con la oxidación del

amoníaco a nitrito con la ayuda de enzimas como amonio monooxigenasa (AMO) e hidroxilamina oxidoreductasa (HAO)

Todos estos sistemas novedosos de purificación de aguas nos ofrecen avances sustanciales respecto a la duración de los tratamientos y la especificidad a la hora de eliminar compuestos no deseados, contribuyendo a que el acceso al agua potable por parte de toda la población sea un objetivo cada vez más alcanzable.

6. Bibliografía

Abhijit M, A. C. (2015) 'Screening and Isolation of Laccase Producers, Determination of Optimal Condition for Growth, Laccase Production and Choose the Best Strain', *Journal of Bioremediation & Biodegradation*, 06(04).

Adsorption | surface phenomenon | *Britannica* (2020) *Encyclopedia Britannica*. Available at: <https://www.britannica.com/science/adsorption> (Accessed: 17 June 2020).

Agua, E. L. *et al.* (1997) 'Depuración Biológica De Las Aguas'.

Ahammad, S. Z.; Gomes, J.; Sreekrishnan, T. R. (2008) 'Wastewater treatment for production of H₂S-free biogas', *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 83(May), pp. 1163–1169. d

Azrague, K. *et al.* (2007) 'A new combination of a membrane and a photocatalytic reactor for the depollution of turbid water', *Applied Catalysis B: Environmental*, 72(3–4), pp. 197–204.

Baker, M. D., Ozin, G. A. and Godber, J. (1985) 'Far-infrared studies of silver atoms, silver ions, and silver clusters in zeolites A and Y', *Journal of Physical Chemistry*, 89(2), pp. 305–311.

Barling, R. D. and Moore, I. D. (1994) 'Role of buffer strips in management of waterway pollution: A review', *Environmental Management*, 18(4), pp. 543–558.

Basu, O. D., Dhawan, S. and Black, K. (2016) 'Applications of biofiltration in drinking water treatment - a review', *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 91(3), pp. 585–595.

Bin, A. K. (1988) 'Gas Entrainment By Plunging Liquid Jets.', *VDI Forschungsheft*, (648).

Bratby, J. (1980) 'Coagulation and flocculation: with an emphasis on water and wastewater treatment.'

C. Gottschalk, J. A. L. A. S. (2000) 'Ozono of water and Waste Water', p. 7.

Cabana, H. *et al.* (2007) 'Elimination of endocrine disrupting chemicals nonylphenol and bisphenol A and personal care product ingredient triclosan using enzyme preparation from the white rot fungus *Coriolopsis polyzona*', *Chemosphere*, 67(4), pp. 770–778.

Cassano, A., Drioli, E. and Molinari, R. (1997) 'Recovery and reuse of chemicals in unhairing, degreasing and chromium tanning processes by membranes', *Desalination*, 113(2–3), pp. 251–261.

Cerezo, P. (2013) *Nanocomposites de quitosano/montmorillonita como promotores de la permeabilidad celular de oxitetraciclina*.

Chakraborty, M. *et al.* (2015) 'Enhanced cooling by an oscillating droplet on DMF platform', *Engineering Sciences and Fundamentals 2015 - Core Programming Area at the 2015 AIChE Annual Meeting*, 1, pp. 162–169.

Cheng, Q. *et al.* (2017) 'Facile fabrication of superhydrophilic membranes consisted of fibrous tunicate cellulose nanocrystals for highly efficient oil/water separation', *Journal of Membrane Science*. Elsevier, 525(September 2016), pp. 1–8.

Diallo, M. *et al.* (2005) 'Dendrimer enhanced ultrafiltration. 1. Recovery of Cu (II) from aqueous solutions using', *Environ. Sci. Technol*, 39(Ii), pp. 1366–1377.

Egger, S. *et al.* (2009) 'Antimicrobial properties of a novel silver-silica nanocomposite material', *Applied and Environmental Microbiology*, 75(9), pp. 2973–2976. doi: 10.1128/AEM.01658-08.

Friedmann, D., Mendive, C. and Bahnemann, D. (2010) 'TiO₂ for water treatment: Parameters

affecting the kinetics and mechanisms of photocatalysis', *Applied Catalysis B: Environmental*. Elsevier B.V., 99(3–4), pp. 398–406.

Gehrke, I., Geiser, A. and Somborn-Schulz, A. (2015) 'Innovations in nanotechnology for water treatment', *Nanotechnology, Science and Applications*. Dove Medical Press Ltd, p. 1.

Ghernaout, D. and Ghernaout, B. (2010) 'From chemical disinfection to electrodisinfection: The obligatory itinerary?', *Desalination and Water Treatment*, 16(1–3), pp. 156–175.

Giddings, J. C. (1966) 'A New Separation Concept Based on a Coupling of Concentration and Flow Nonuniformities', *Separation Science*, 1(1), pp. 123–125.

Goetz, L. A. *et al.* (2016) 'Superhydrophilic anti-fouling electrospun cellulose acetate membranes coated with chitin nanocrystals for water filtration', *Journal of Membrane Science*. Elsevier, 510, pp. 238–248.

Gopalan Nair, K. and Dufresne, A. (2003) 'Crab shell chitin whisker reinforced natural rubber nanocomposites. 1. Processing and swelling behavior', *Biomacromolecules*, 4(3), pp. 657–665.

Gunten, U. Von (2003) 'Ozonation of drinking water: Part I. Oxidation kinetics and product formation', *Water research*, 37, pp. 1443–1467.

Haloui, R. *et al.* (2017) 'Polymeric microtubes for water filtration by co-axial electrospinning technique', *Polymers for Advanced Technologies*, 28(5), pp. 570–582.

Hansen, K. M. S. *et al.* (2016) 'Ozonation for source treatment of pharmaceuticals in hospital wastewater - Ozone lifetime and required ozone dose', *Chemical Engineering Journal*. Elsevier B.V., 290, pp. 507–514.

Hashim, D. P. *et al.* (2012) 'Covalently bonded three-dimensional carbon nanotube solids via boron induced nanojunctions', *Scientific Reports*, 2, pp. 1–8.

Hata, T. *et al.* (2009) 'Title Page'.

Herrmann, H. and Bucksch, H. (2014) 'Contaminant', *Dictionary Geotechnical Engineering/Wörterbuch GeoTechnik*, pp. 286–286.

Homhoul, P., Pengpanich, S. and Hunsom, M. (2011) 'Treatment of Distillery Wastewater by the Nano-Scale Zero-Valent Iron and the Supported Nano-Scale Zero-Valent Iron', *Water Environment Research*, 83(1), pp. 65–74.

IngeExpert (2017) *Tratamientos físicos en las tecnologías de depuración de aguas residuales - Ingeoexpert*. Available at: <https://ingeoexpert.com/articulo/tratamientos-fisicos-las-tecnologias-depuracion-aguas-residuales>

Jagadevan, S. *et al.* (2012) 'A novel hybrid nano zerovalent iron initiated oxidation - Biological degradation approach for remediation of recalcitrant waste metalworking fluids', *Water Research*. Elsevier Ltd, 46(7), pp. 2395–2404.

Jiang, J. Q. *et al.* (2002) 'Laboratory study of electro-coagulation-flotation for water treatment', *Water Research*, 36(16), pp. 4064–4078.

Johnson, C. J. and Singer, P. C. (2004) 'Impact of a magnetic ion exchange resin on ozone demand and bromate formation during drinking water treatment', *Water Research*, 38(17), pp. 3738–3750.

Jung, J. Y. *et al.* (2004) 'Enhanced ammonia nitrogen removal using consistent biological regeneration and ammonium exchange of zeolite in modified SBR process', *Water Research*, 38(2), pp. 347–354.

Karuppiah, R. and Grossmann, I. E. (2005) 'Global optimization for the synthesis of integrated

- water systems in chemical processes', *AIChE Annual Meeting Conference Proceedings*, 2005.
- Khajeh, M., Laurent, S. and Dastafkan, K. (2013) 'Nanoadsorbents: Classification, preparation, and applications (with emphasis on aqueous media)', *Chemical Reviews*, 113(10), pp. 7728–7768.
- Lalley, J. *et al.* (2014) 'Silver-based antibacterial surfaces for drinking water disinfection - An overview', *Current Opinion in Chemical Engineering*, 3, pp. 25–29.
- Liu, X. *et al.* (2013) 'Application potential of carbon nanotubes in water treatment: A review', *Journal of Environmental Sciences (China)*. The Research Centre for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, 25(7), pp. 1263–1280.
- Malaeb, L. and Ayoub, G. M. (2011) 'Reverse osmosis technology for water treatment: State of the art review', *Desalination*. Elsevier B.V., 267(1), pp. 1–8.
- Martín Martínez, J. M. (1990) *Porosidad de Carbones I Distribución de Tamaños de Poros Histeresis a Baja Presión, Adsorción Física de Gases y Vapores por Carbones*.
- Matlochová, A., Plachá, D. and Rapantová, N. (2013) 'The application of nanoscale materials in groundwater remediation', *Polish Journal of Environmental Studies*, 22(5), pp. 1401–1410.
- Matlock, M. M., Howerton, B. S. and Atwood, D. A. (2002) 'Chemical precipitation of heavy metals from acid mine drainage', *Water Research*, 36(19), pp. 4757–4764. doi: 10.1016/S0043-1354(02)00149-5.
- Mejía, E., Osorno, L. and Ospina, J. (2014) 'Revista CINTEX ciencia, tecnología e innovación', *Revista CINTEX*, 19, pp. 63–77. Available at: <http://www.pascualbravo.edu.co:5056/cintexpb/index.php/cintex/article/view/40>.
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2011) 'Real Decreto 60/2011 de 21 de enero sobre las normas de calidad ambiental en el ámbito de la política de aguas.', *B.O.E.*, pp. 6854–6870. Available at: <http://www.boe.es/boe/dias/2011/01/22/pdfs/BOE-A-2011-1139.pdf>.
- Moragas, M. and Bustos, P. (2017) 'Recopilación normas microbiológicas de los alimentos y asimilados (superficies, aguas diferentes de consumo, aire, subproductos) otros parámetros fisicoquímicos de interés sanitario', *Food Sanitizer*, p. 54. Available at: https://www.euskadi.eus/contenidos/informacion/doc_seguridad_alimentaria/es_def/adjuntos/control-alimentos/inspecciones/normas-microbiologicas-alimentos-2017.pdf.
- Muftikian, R., Fernando, Q. and Korte, N. (1995) 'A method for the rapid dechlorination of low molecular weight chlorinated hydrocarbons in water', *Water Research*, 29(10), pp. 2434–2439.
- Nowack, B., Krug, H. F. and Height, M. (2011) '120 years of nanosilver history: Implications for policy makers', *Environmental Science and Technology*, 45(4), pp. 1177–1183.
- O'Melia, C. R. (1998) 'Coagulation and sedimentation in lakes, reservoirs and water treatment plants', *Water Science and Technology*. International Association on Water Quality, 37(2), pp. 129–135.
- ODS N° 6: *Agua* (2015). Available at: <http://los17ods.org/los-17-objetivos-para-2030/agua/> (Accessed: 16 June 2020).
- Olańczuk-Neyman, K. and Bray, R. (2000) 'The Role of Physico-Chemical and Biological Processes in Manganese and Ammonia Nitrogen Removal from Groundwater', *Polish Journal of Environmental Studies*, 9(2), pp. 91–96.
- OMS/UNICEF (2015) 'Informe de actualización 2015 y evaluación del ODM', *Progresos en materia de saneamiento y agua potable*, p. 90.
- OMS (2017) 'acceso a agua potable y saneamiento', *WHO*. World Health Organization.

- OMS (2020) *Agua limpia y saneamiento*. doi: 10.18356/64118cb4-es.
- ONU (2018) *Progresos en Materia de agua potable, saneamiento e higiene, Organización Mundial de la Salud*.
- Organización Mundial de la Salud and UNICEF (2015) *Progresos en materia de agua potable y saneamiento: informe de actualización*.
- Ottengraf, S. P. P. (1987) 'Biological systems for waste gas elimination', *Trends in Biotechnology*, 5(5), pp. 132–136.
- Pan, B. O. and Xing, B. (2008) '<Est42-9005.Pdf>', pp. 9005–9013.
- Peña-Gómez, N. *et al.* (2019) 'Novel antimicrobial filtering materials based on carvacrol, eugenol, thymol and vanillin immobilized on silica microparticles for water treatment', *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. Elsevier, 58(April), p. 102228.
- Pérez Esteve, E. (2018) 'Tratamientos físicos', p. 49.
- Poljsak, B. *et al.* (2010) 'Interference of chromium with biological systems in yeasts and fungi: A review', *Journal of Basic Microbiology*, 50(1), pp. 21–36. doi: 10.1002/jobm.200900170.
- Qu, X., Alvarez, P. J. J. and Li, Q. (2013) 'Applications of nanotechnology in water and wastewater treatment', *Water Research*. Elsevier Ltd, 47(12), pp. 3931–3946.
- Renault, F. *et al.* (2009) 'Chitosan flocculation of cardboard-mill secondary biological wastewater', *Chemical Engineering Journal*, 155(3), pp. 775–783.
- Report, G. B. (2019) *IN HEALTH Global Baseline Report 2019*.
- Rey, P. and Rogalla, F. (1996) 'United States Patent (19)', (19).
- Rinaudo, M. (2006) 'Chitin and chitosan: Properties and applications', *Progress in Polymer Science (Oxford)*, 31(7), pp. 603–632.
- Rubio, A., Chica, E. and Peñuela, G. (2014) 'Application of Fenton process for treating petrochemical wastewater', *SciELO*, 16(2), pp. 211–223.
- Sadeghi-Kiakhani, M., Arami, M. and Gharanjig, K. (2013) 'Dye removal from colored-textile wastewater using chitosan-PPI dendrimer hybrid as a biopolymer: Optimization, kinetic, and isotherm studies', *Journal of Applied Polymer Science*, 127(4), pp. 2607–2619.
- Sassi, J. *et al.* (2005) 'Experiments with ultraviolet light, ultrasound and ozone technologies for onboard ballast water treatment', *VTT Tiedotteita - Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus*, (2313), pp. 3–80.
- Sharma, V. and Sharma, A. (2013) 'Nanotechnology : An Emerging Future Trend in Wastewater Treatment with its Innovative Products and Processes', *International Journal of Enhanced Research in Science Technology & Engineering*, 2(1), pp. 1–8.
- Shi, H. *et al.* (2016) 'A modified mussel-inspired method to fabricate TiO₂ decorated superhydrophilic PVDF membrane for oil/water separation', *Journal of Membrane Science*, 506, pp. 60–70.
- Shin, S. *et al.* (2017) 'Membraneless water filtration using CO₂', *Nature Communications*. Nature Publishing Group, 8(May), pp. 1–6.
- Simpson, D. R. (2008) 'Biofilm processes in biologically active carbon water purification', *Water Research*, 42(12), pp. 2839–2848.
- Singh, J. *et al.* (2018) 'Laccase grafted membranes for advanced water filtration systems: a green approach to water purification technology', *Critical Reviews in Biotechnology*. Informa

- Healthcare USA, Inc, 38(6), pp. 883–901.
- Spear, P. E. and James, M. (1994) ‘S¹’, (19).
- Šturcová, A., Davies, G. R. and Eichhorn, S. J. (2005) ‘Elastic modulus and stress-transfer properties of tunicate cellulose whiskers’, *Biomacromolecules*, 6(2), pp. 1055–1061.
- Tang, C. Y. *et al.* (2013) ‘Desalination by biomimetic aquaporin membranes: Review of status and prospects’, *Desalination*, 308, pp. 34–40.
- Teranaka, S. *et al.* (2017) ‘Skeletonization of renal cysts of autosomal dominant polycystic kidney disease using magnetic resonance imaging’, *Journal of Medical Imaging and Health Informatics*, 7(3), pp. 568–573.
- Tong, H. W., Zhang, X. and Wang, M. (2012) ‘A new nanofiber fabrication technique based on coaxial electrospinning’, *Materials Letters*. Elsevier B.V., 66(1), pp. 257–260.
- Wang, X. *et al.* (2005) ‘High flux filtration medium based on nanofibrous substrate with hydrophilic nanocomposite coating’, *Environmental Science and Technology*, 39(19), pp. 7684–7691.
- Webb, H. K. *et al.* (2013) ‘Plastic degradation and its environmental implications with special reference to poly(ethylene terephthalate)’, *Polymers*, 5(1), pp. 1–18.
- Wegelin, M. (1996) ‘Surface water treatment by roughing filters’, (10).
- Wert, E. C. *et al.* (2007) ‘Formation of oxidation byproducts from ozonation of wastewater’, *Water Research*, 41(7), pp. 1481–1490.
- Widsten, P. and Kandelbauer, A. (2008) ‘Laccase applications in the forest products industry: A review’, *Enzyme and Microbial Technology*, 42(4), pp. 293–307.
- Yoon, K. *et al.* (2006) ‘High flux ultrafiltration membranes based on electrospun nanofibrous PAN scaffolds and chitosan coating’, *Polymer*, 47(7), pp. 2434–2441.
- Yu, W., Graham, N. J. D. and Fowler, G. D. (2016) ‘Coagulation and oxidation for controlling ultrafiltration membrane fouling in drinking water treatment: Application of ozone at low dose in submerged membrane tank’, *Water Research*. Elsevier Ltd, 95, pp. 1–10.
- Zander, N. E., Gillan, M. and Sweetser, D. (2016) ‘Recycled PET nanofibers for water filtration applications’, *Materials*, 9(4), pp. 1–10.