



**Escuela de Caminos**

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos  
UPC BARCELONATECH

# Evaluación de la Recarga Artificial de Acuíferos como Tratamiento Terciario en Depuración de Aguas Residuales y Comparación Frente a otros Tratamientos Terciarios.

Trabajo realizado por:

**Ineyser Alicia Morillo Santana**

Dirigido por:

**Dra. M. Silvia Díaz Cruz (IDAEA-CSIC)**

**Dra. Cristina Valhondo González (CNRS)**

**Dr. Maarten Saaltink (UPC)**

Máster en:

**Ingeniería Ambiental**

Barcelona, 28 septiembre 2020

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

**TRABAJO FINAL DE MASTER**

Aprobada por:

Dra. M. Silvia Díaz-Cruz  
Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA), Centro de Excelencia Severo Ochoa  
Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Dra. Cristina Valhondo González  
Géosciences Montpellier, Université de Montpellier  
Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS)

Dr. Maarten Saaltink  
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

## RESUMEN

La presencia de contaminantes emergentes en los efluentes de depuradoras de aguas residuales convencionales, pone en riesgo la salud de los humanos y el medio ambiente. Los tratamientos terciarios son técnicas eficaces eliminando patógenos, virus y hasta contaminantes emergentes. Pero, su implementación en la mejora de la calidad del agua de efluentes secundarios, genera altos costes capitales y operacionales; incluidos costes por consumo energético, consumo de productos químicos y por mantenimiento constante. La recarga gestionada de acuíferos (MAR), se presenta como técnica alternativa sostenible de tratamiento terciario para eliminar contaminantes emergentes de aguas reutilizadas, siendo más barata que los actuales terciarios.

Como resultado de una revisión bibliográfica, se halló que la MAR es capaz de eliminar un poco más de 2.5 Log de coliformes, más de 35% de DQO, 66% de carbamazepina y 100% de ibuprofeno y diclofenaco; valores competentes con los de los terciarios radiación UV, ozonación y nanofiltración. Los costes capitales totales del sistema MAR estuvieron por debajo de los costes capitales totales de la ozonación y nanofiltración. De estos 3 terciarios, más del 30% de los costes operacionales totales por año es por consumo energético, así como aproximadamente, sobre el 40% es por mantenimiento, en cambio, en la MAR sólo es el 15%. El consumo energético en MAR es despreciable o nulo comparándolo con el de los terciarios.

Actualmente, diversos sectores que conocen la técnica MAR, validan su eficiencia depurativa para regenerar aguas residuales. Sin embargo, la decisión de los sectores, en contra de la MAR para regenerar aguas residuales eliminando contaminantes emergentes, es básicamente por desconocimiento de la técnica. Es necesario que se continúe divulgando la eficacia regenerativa de aguas residuales de la MAR, para así crear confianza en la sociedad.

## SUMMARY

The presence of emerging pollutants in the effluents of conventional wastewater treatment plants, endanger the health of humans and the environment. The tertiary treatments are effective techniques eliminating pathogens, viruses and even emerging pollutants. Nevertheless, their implementation in the best of the quality of the secondary effluent water, generates high capital and operational costs; including energy consumption costs, chemical consumption and constant maintenance. The managed recharge of aquifers (MAR), is presented as a sustainable alternative technique of tertiary treatment to eliminate emerging pollutants from reused waters, being cheaper than the current tertiary ones.

A bibliography found out that MAR is capable of eliminating a little more than 2.5 Log of coliforms, more than 35% of COD, 66% of carbamazepine and 100% of ibuprofen and diclofenac. Competent values with those of the tertiary UV radiation, ozonation and nanofiltration. The total capital costs of the MAR system were below the total capital costs of ozonation and nanofiltration. Of these 3 tertiary treatments, more than 30% of the total operational costs per year is due energy consumption, as well as approximately over 40% is for maintenance, on the other hand, in the MAR it is only 15%. Energy consumption in MAR is negligible or null compared with the others tertiary treatments.

Actually, several sectors that know the MAR technique, validate its purifying efficiency to regenerate wastewater. However, the decision of the sectors against the MAR to regenerate wastewater eliminating emerging pollutants, is basically due to ignorance of the technique. It is necessary that the regenerative efficiency of the MAR's wastewater continue to be disclosed, in order to create trust in society.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco sobre todas las cosas a Dios Padre por haberme dado la oportunidad de realizar este Máster, por haberme colmado de salud en todo tiempo, por la fortaleza y sabiduría que me regaló, atributos esenciales para mí en toda la duración del Máster en Ingeniería Ambiental.

Doy gracias a los asesores que me brindaron su asesoría en este trabajo, muchas gracias por aportarme sus altos conocimientos, gracias por cada una de sus correcciones y paciencia en todo tiempo de este trabajo. Gracias por haberme dado la oportunidad de realizarlo en el marco del proyecto MARadentro project, fundado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España (PCI2019-103603), CEX2018-000794-S, y la Water Joint Program Initiative (JPI).

Gracias a la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) por poner a mi disposición las herramientas necesarias para adquirir los altos conocimientos científicos que brinda.

A mi isla, a mi país República Dominicana, por haberme dado la gran oportunidad de realizar este Máster en el extranjero, a través de una beca por medio del Ministerio de Educación Superior, Ciencia y Tecnología (MESCYT). Ha sido toda una bendición esta oportunidad.

Infinitas y eternas gracias a mi familia por siempre haber estado a mi lado durante estos dos largos años. Muchas gracias por creer en mí, gracias por sus palabras de aliento, gracias por sus oraciones, gracias por sus cuidados. Muchas gracias.

Agradezco a mis amigos por cada palabra de ánimo y por cada oración. Gracias a mis compañeros de Máster por sus contribuciones en mi crecimiento profesional.

---

## DEDICATORIAS

Dedico este trabajo final de Máster a Dios Padre, porque me permitió alcanzar esta oportunidad de vida, más que una oportunidad para crecer y continuar desarrollándome profesionalmente, ha sido una oportunidad para crecer como ser humano.

Con todo mi amor, dedico este nuevo peldaño alcanzado a mis Padres, por siempre haber estado para mí en todo momento. Por su entrega para mi bienestar, por sus cuidados y sustento durante toda mi vida. Esta nueva meta cumplida es fruto de toda su dedicación, esfuerzo y formación de ustedes hacia mi persona.

A mis hermanos, para que sea de inspiración en todas las metas que se propongan, en especial, aquellas metas en su desarrollo profesional.

A mi país de origen República Dominicana, para que continúen creyendo en el potencial profesional de los dominicanos y continúen impulsándolo. Para que las oportunidades de becas de estudio siempre estén disponibles y asequibles a todos los estudiantes y profesionales del país.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>RESUMEN</b> .....	<b>3</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>4</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>5</b>
<b>DEDICATORIAS</b> .....	<b>6</b>
<b>LISTA DE ACRÓNIMOS</b> .....	<b>8</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>9</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>10</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>11</b>
<b>OBJETIVO</b> .....	<b>13</b>
<b>1. Contexto Preliminar</b> .....	<b>14</b>
1.1 Fundamento de búsqueda bibliográfica .....	14
1.2 Tratamientos terciarios en depuración de aguas residuales .....	17
1.3 Recarga gestionada de acuíferos .....	19
1.3.1. Antecedentes y fundamentos de MAR.....	19
1.3.2. Aplicación de MAR como tratamiento terciario .....	20
<b>2. Metodología</b> .....	<b>20</b>
<b>3. Resultados y Discusión</b> .....	<b>22</b>
3.1. Resultados de calidad fisicoquímica y microbiológica de efluentes secundarios y terciarios de aguas reutilizadas .....	22
Radiación UV.....	22
Ozonación (O <sub>3</sub> ).....	22
Nanofiltración .....	23
MAR.....	23
3.2. Resultados de evaluación económica.....	27
Radiación UV.....	27
Ozonación (O <sub>3</sub> ).....	27
Nanofiltración .....	27
MAR.....	27
<b>4. Comparación MAR frente a los tratamientos terciarios convencionales seleccionados</b> ...	<b>28</b>
<b>5. Percepción Social Sobre la Utilización de Aguas Regeneradas en MAR</b> .....	<b>32</b>
<b>6. Conclusiones</b> .....	<b>33</b>
<b>7. Bibliografía</b> .....	<b>35</b>
<b>8. Anexos</b> .....	<b>42</b>
<b>Anexo 1</b> .....	<b>42</b>

---

## LISTA DE ACRÓNIMOS

EDARs	Estaciones depuradoras de aguas residuales
CECs	Contaminantes de preocupación emergente
ERAs	Estaciones de regeneración de aguas
MAR	Recarga gestionada de acuíferos
UV	Ultravioleta
O <sub>3</sub>	Ozono
DQO	Demanda química de oxígeno



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Esquema de búsqueda bibliográfica.....	15
<b>Figura 2.</b> Número de artículos publicados al año en el período 2010-2020 sobre tratamientos terciarios de aguas residuales tratadas (barras azules) y recarga gestionada de acuíferos (barras verdes). Fuente: Web of Science.....	15
<b>Figura 3.</b> Número de artículos publicados al año en el período 2010-2020 sobre: (A) la presencia de coliformes en la evaluación de la calidad del agua tratada en los terciarios seleccionados y MAR, (B) medida de la DQO en efluentes de depuración de aguas tratadas por terciarios y MAR y (C) eliminación de fármacos de aguas residuales a través de terciarios y MAR. Fuente: Web of Science..	16
<b>Figura 4.</b> Número de artículos publicados al año en el período 2010-2020 sobre, los costes implicados en sistemas de tratamientos terciarios (eje principal) y costes implicados en proyectos de recarga de acuíferos gestionada (eje secundario), según fuente: Web of Science.....	17
<b>Figura 5.</b> Resumen de las técnicas empleadas habitualmente como tratamiento terciario en las ERAs, según fuente: (Rintelen Fransitorra, 2014, Ramalho, 2003).....	17
<b>Figura 6.</b> Tasas de eliminación de los indicadores microbiológicos, (A) coliformes totales en azul y coliformes fecales en rojo y (B) de los parámetros fisicoquímicos obtenidos para las diferentes técnicas de tratamiento terciario en la bibliografía revisada.....	29
<b>Figura 7.</b> Evaluación comparativa de MAR frente a los tratamientos terciarios seleccionados, valores altos en verde, valores medios en azul y valores bajos en amarillo.....	30
<b>Figura 8.</b> Resumen de costes por tratamientos terciarios y sistema MAR, (A) coste capital total en azul y (B) coste operacional total en verde.....	31
<b>Figura 9.</b> Distribución porcentual de los costes operacionales totales de los terciarios estudiados y MAR: (A) coste operacional total de radiación UV, (B) coste operacional total de la ozonación, (C) coste operacional total de sistema nanofiltración y (D) coste operacional total de la MAR.....	32

---

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Parámetros seleccionados para la comparación entre la recarga gestionada de acuíferos y tratamientos terciarios seleccionados.....	21
<b>Tabla 2.</b> Valores observados a la entrada y salida de los tratamientos y tasas de eliminación calculadas de los parámetros seleccionados para la evaluación de la eficiencia y comparación entre los tratamientos terciarios estudiados, incluyendo la MAR.....	25
<b>Tabla 3.</b> Resumen evaluación económica de los tratamientos terciarios considerados y MAR.....	28

## INTRODUCCIÓN

El rápido crecimiento de la población durante las últimas décadas ha generado un incremento de la demanda de agua. La distribución geográfica de la población es muy irregular, concentrándose principalmente en zonas costeras y sin coincidir necesariamente con las regiones con mayor disponibilidad de agua apta para el consumo (Goldewijk, 2005). A nivel global, se estima que la demanda de agua es de 4600 km<sup>3</sup>/año e incrementa un 1% cada año, por lo que en el 2050 se espera que alcance valores cercanos a los 6000 km<sup>3</sup>/año (Connor *et al.*, 2018). De esta demanda un 70% se emplea en agricultura, un 19% en industria y el 11% restante en suministro urbano (Roser, 2018).

Este escenario reclama una gestión hídrica sostenible que garantice la disponibilidad y calidad de este recurso imprescindible, tales como, construcción de infraestructuras de almacenamiento de agua, prevención y/o restauración de fuentes de aguas contaminadas y reutilización de aguas residuales, entre otras (Connor *et al.*, 2018). La reutilización de aguas residuales tratadas (regeneradas) para distintos usos, y en especial para riego, se ha llevado a la práctica en zonas con importantes demandas de agua (Salgot *et al.*, 2006), como son el sudeste de Asia, Estados Unidos de América y el sureste de Europa (Roser, 2018).

Las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDARs) que aplican tratamientos convencionales han sido diseñadas para eliminar material en suspensión, compuestos orgánicos, nutrientes inorgánicos (nitrógeno/fósforo) y microorganismos (Metcalf y Eddy, 2014). Sin embargo, en los efluentes de las EDARs, frecuentemente se detectan microorganismos patógenos y residuos de contaminantes emergentes (CECs) (Tran *et al.*, 2018). La presencia de patógenos en aguas regeneradas puede provocar enfermedades infecciosas y/o intoxicación en los organismos vivos, incluyendo plantas, animales y humanos, ya sea por ingestión o por contacto (Salgot *et al.*, 2006). Así mismo, la presencia de CECs está relacionada con toxicidad y disrupción endocrina en organismos acuáticos (García-Ivars *et al.*, 2017).

Para garantizar la calidad de las aguas regeneradas y poderlas considerar como un recurso para posterior uso alternativo sin poner en peligro la salud de los humanos y del medio ambiente, es necesaria la aplicación de tratamientos adicionales capaces de proporcionar mayor calidad química y microbiológica al agua tratada (Salgot y Folch, 2018). Estos tratamientos adicionales se denominan tratamientos terciarios y tienen, entre otras finalidades, la de desactivar microorganismos y aumentar la eliminación de CECs. Las EDARs que aplican este tipo de tratamiento adicional son denominadas estaciones de regeneración de aguas (ERAs).

Los tratamientos terciarios incluyen tratamientos fisicoquímicos, técnicas de oxidación avanzada y procesos híbridos, como los biorreactores de membrana; todos ellos proporcionan un plus en la eliminación, tanto de los microorganismos patógenos como de los CECs (Patiño *et al.*, 2014). Sin embargo, tienen costes económicos (energéticos, de implementación/inversión y operacionales)

elevados (US EPA, 2012), y además pueden favorecer la formación de subproductos de degradación potencialmente tóxicos (Gil Garzón *et al.*, 2012).

La recarga gestionada de acuíferos (MAR, del inglés Managed Aquifer Recharge) consiste en favorecer la infiltración de agua a través del terreno, aumentando así el recurso hídrico subterráneo (Bekele *et al.*, 2018). Durante la infiltración, gracias a la capacidad de depuración del terreno, tienen lugar una serie de procesos que dan como resultado una mejora de la calidad del agua recargada. Los principales procesos involucrados son la retención o desactivación de patógenos y otros microorganismos, la reducción de nutrientes, y la biodegradación de materia orgánica y de contaminantes químicos (Valhondo *et al.*, 2015, 2018, 2020a). La MAR se puede considerar como un tratamiento terciario viable y eficaz frente a los tratamientos actualmente implementados en las ERAs, ya que además de mejorar la calidad química y microbiológica del agua recargada, necesita un bajo consumo energético, lo que reduce sustancialmente los costes de implementación y operación, (Dillon *et al.*, 2009).

En este trabajo final de Máster se revisa la bibliografía sobre las principales técnicas de tratamientos terciarios aplicadas en las ERAs, y se discute la posible aplicación de la recarga gestionada de acuíferos utilizando aguas residuales como posible técnica alternativa a los tratamientos terciarios actualmente en uso. Para ello se evaluarán i) aspectos ambientales, tales como la capacidad de inactivación de patógenos y degradación de contaminantes emergentes, ii) aspectos económicos, incluyendo el coste de implementación y de operación y iii) aspectos sociales, en particular, la percepción de la sociedad sobre utilización de aguas regeneradas en la recarga de acuíferos.

## OBJETIVO

El objetivo general de este trabajo final de Máster es evaluar la mejora de la calidad del agua regenerada mediante recarga gestionada de acuíferos y realizar una comparación de la eficiencia de esta técnica frente a otros tipos de tratamientos terciarios empleados actualmente en las estaciones de regeneración de agua.

Para la consecución del objetivo general, es necesario alcanzar los siguientes objetivos específicos:

- Revisión bibliográfica sobre tratamientos terciarios empleados en las ERAs, incluyendo sus requerimientos económicos.
- Revisión bibliográfica de aplicaciones de la MAR, incluyendo información sobre el grado de mejora en la calidad del agua recargada y su coste económico.
- Comparación entre la eficiencia y el coste de implementación y operación de la MAR con respecto a otros tratamientos terciarios convencionales aplicados en las ERAs.
- Percepción social de la MAR utilizando agua residual tratada.

## 1. Contexto Preliminar

### 1.1 Fundamento de búsqueda bibliográfica

La búsqueda bibliográfica sobre las diversas técnicas de tratamiento terciario y sobre recarga gestionada de acuíferos incluyó desde libros hasta bases de datos, tales como Scielo, Data base of the International Water Association y Web of Science.

En primer lugar, la información revisada fue sobre aspectos generales de la MAR y de los distintos tratamientos terciarios que existen, con el fin de conocer el funcionamiento de estas técnicas de depuración de aguas residuales, sus condiciones y/o requerimientos operativos, ventajas y desventajas; todo ello para seleccionar tres tratamientos terciarios y compararlos con la MAR.

A continuación, se buscaron publicaciones donde se evaluase la capacidad de la recarga gestionada de acuíferos y de los tres tratamientos terciarios seleccionados para depurar agua residual, específicamente de los efluentes secundarios de EDARs; así como de los costes económicos relacionados con cada tratamiento. Adicionalmente, se investigó acerca de la percepción social respecto al uso de la MAR utilizando aguas residuales tratadas como agua de recarga. En la **Figura 1** se detalla el esquema de búsqueda bibliográfica.

El periodo de búsqueda de los artículos abarca los últimos diez años, de 2010 a 2020. Entre los artículos encontrados, para incluirlos en este trabajo se seleccionaron los artículos que incluían valores del influente y efluente del tratamiento terciario de forma detallada. Las Figuras 2, 3 y 4 muestran el número de referencias obtenidas en búsqueda bibliográfica (**Figura 2, Figura 3 y Figura 4**).

Las técnicas seleccionadas para ser comparadas con la recarga gestionada de acuíferos en este estudio son la radiación ultravioleta (UV), la ozonación (O<sub>3</sub>) y la nanofiltración, ya que éstas son tres de las técnicas de tratamientos terciarios más eficientes y utilizadas en la regeneración de aguas residuales.

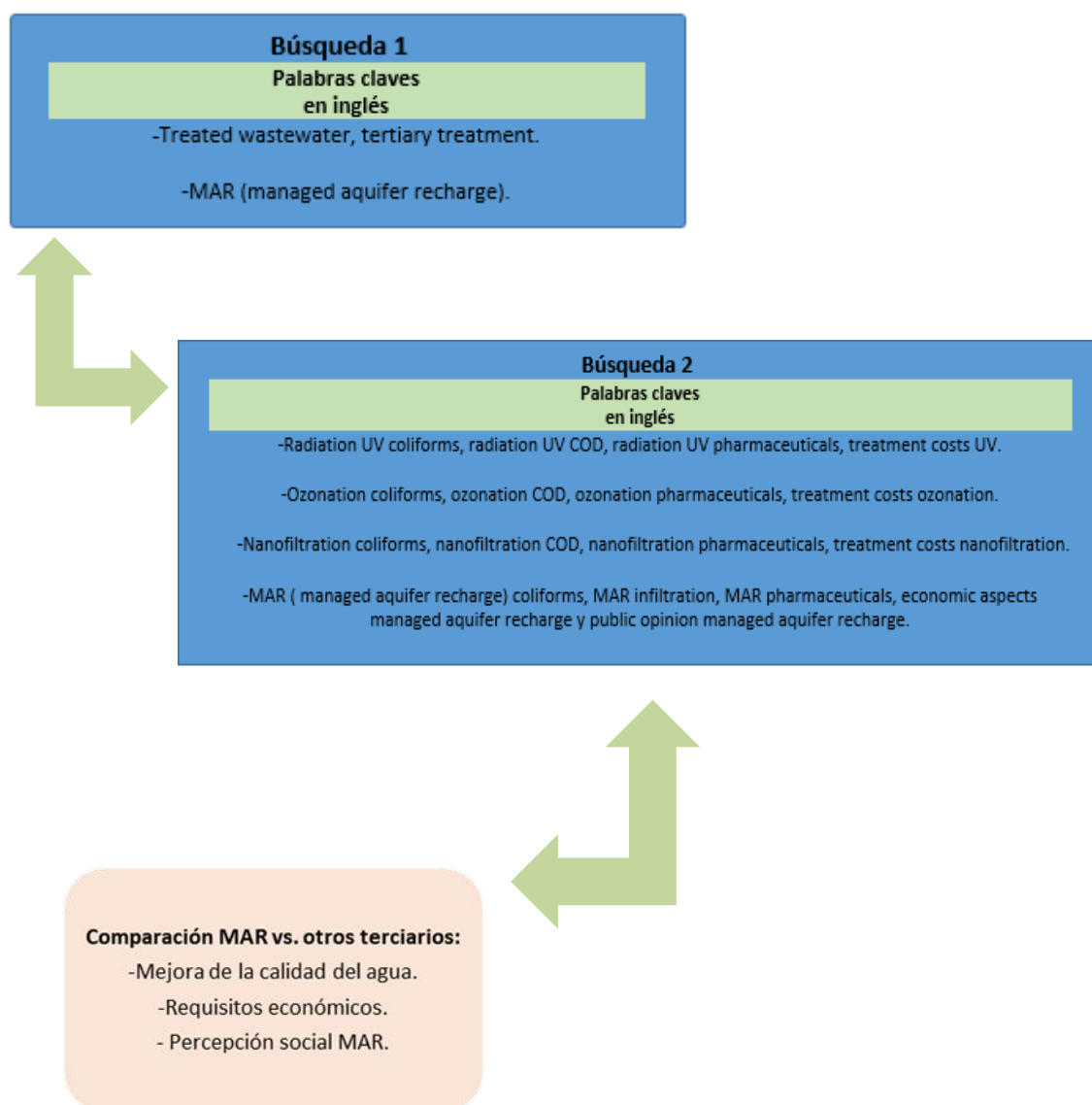


Figura 1. Esquema de búsqueda bibliográfica.

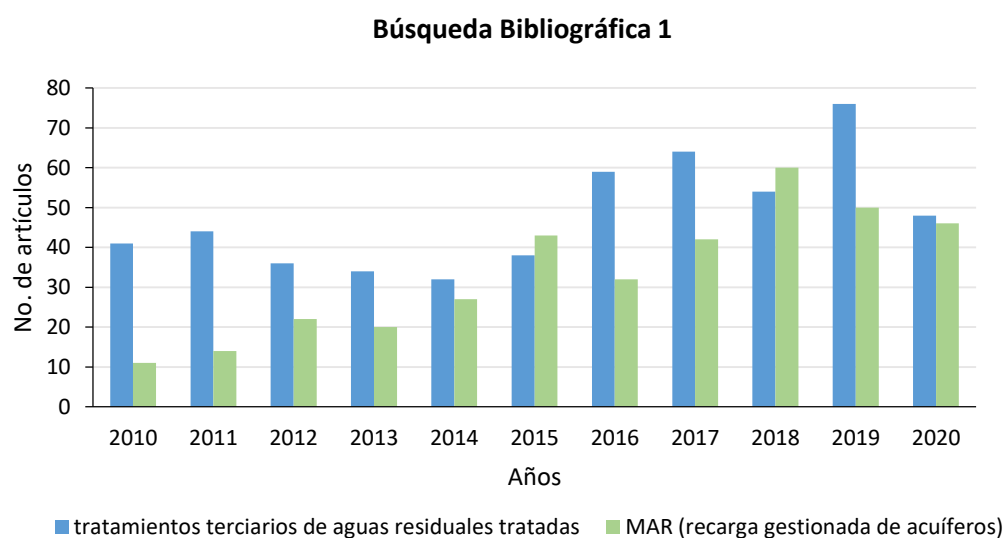
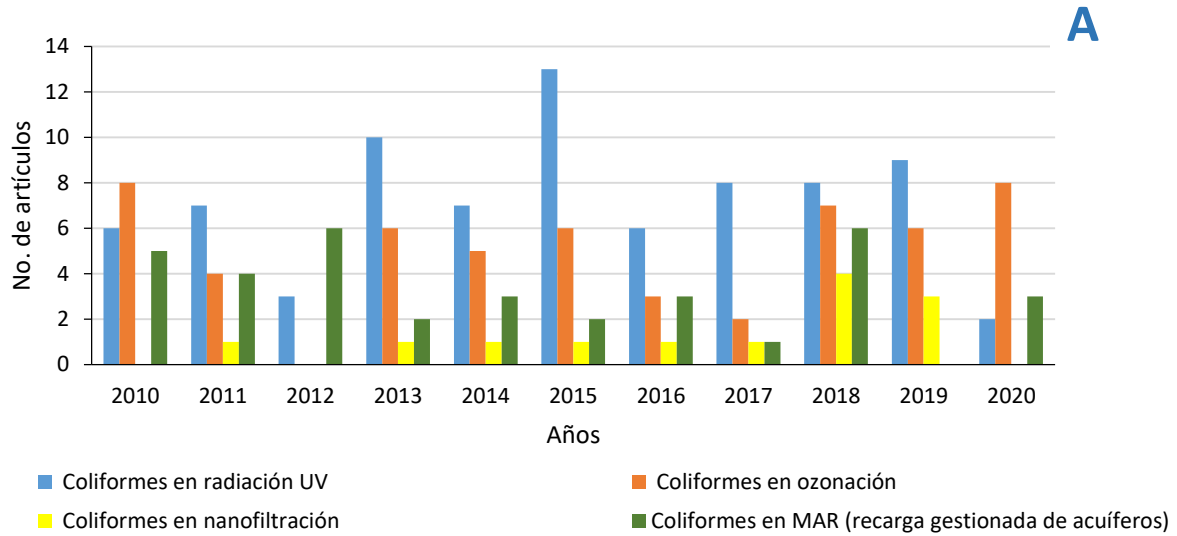
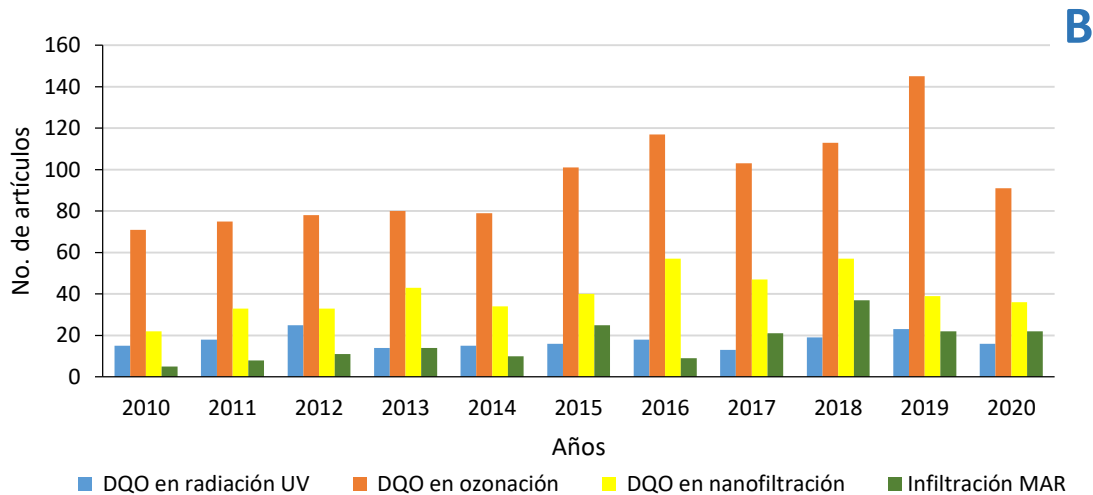


Figura 2. Número de artículos publicados al año en el período 2010-2020 sobre tratamientos terciarios de aguas residuales tratadas (barras azules) y recarga gestionada de acuíferos (barras verdes). Fuente: Web of Science.

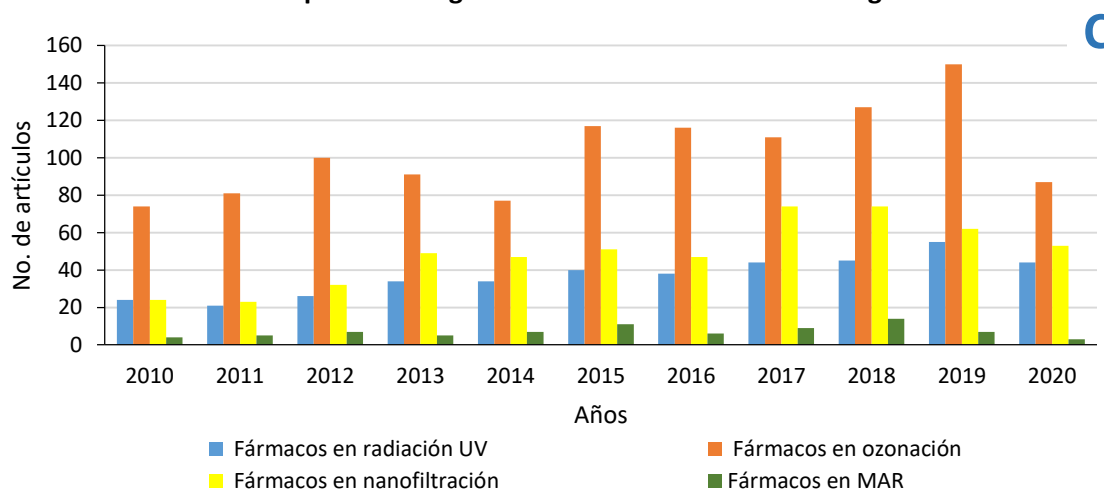
### Búsqueda Bibliográfica 2 Referente a Calidad del Agua



### Búsqueda Bibliográfica 2 Referente a Calidad del Agua



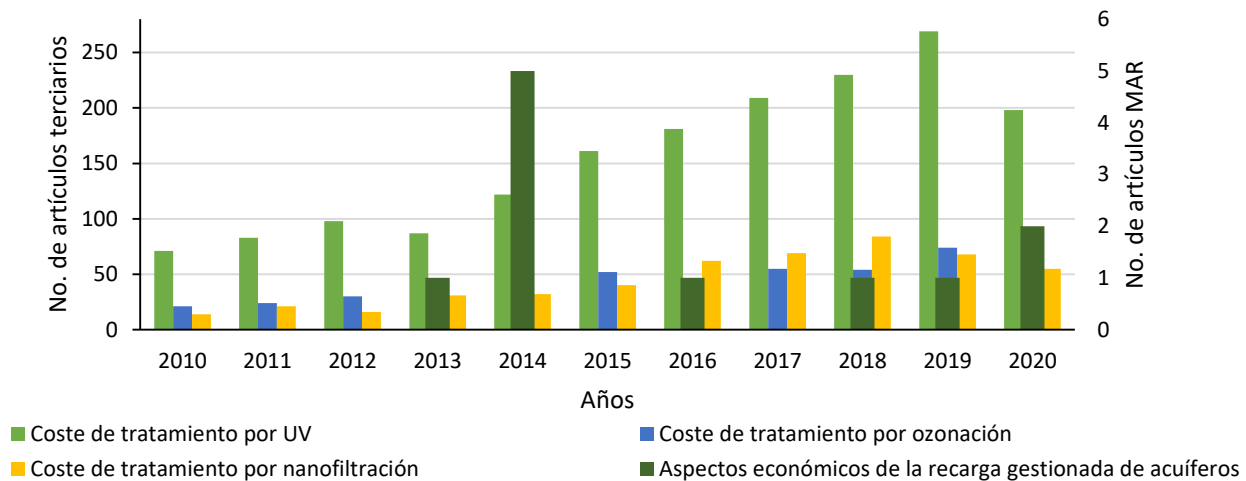
### Búsqueda Bibliográfica 2 Referente a Calidad del Agua



**Figura 3.** Número de artículos publicados al año en el período 2010-2020 sobre: (A) la presencia de coliformes en la evaluación de la calidad del agua tratada en los terciarios seleccionados y MAR, (B) medida de la DQO en efluentes de depuración de aguas tratadas por terciarios y MAR y (C) eliminación de fármacos de aguas residuales a través de terciarios y MAR. Fuente: Web of Science.



### Búsqueda Bibliográfica 2 Aspectos Económicos



**Figura 4.** Número de artículos publicados al año en el período 2010-2020 sobre, los costes implicados en sistemas de tratamientos terciarios (eje principal) y costes implicados en proyectos de recarga de acuíferos gestionada (eje secundario), según fuente: Web of Science.

En los últimos 10 años (2010-2020) el número de artículos publicados referente a la percepción social de la MAR ha sido muy escaso, con una publicación en el año 2013, 2015, 2016 y 2019, para un total de 4 publicaciones, según fuente: Web of Science.

### 1.2 Tratamientos terciarios en depuración de aguas residuales

Los tratamientos terciarios consisten en procesos físicos y/o químicos que se aplican para reducir la carga de contaminantes, sólidos en suspensión y turbidez, así como los microorganismos patógenos (virus y bacterias), y asegurar así la calidad sanitaria del agua (Üstün *et al.*, 2011; Moreira *et al.*, 2016), completando la depuración biológica o tratamiento secundario (Metcalf y Eddy, 2014).

Las técnicas en las que se basan los tratamientos terciarios se pueden agrupar de la siguiente forma: *filtración, tecnologías de membranas, técnicas de desinfección, oxidación avanzada*, y otras técnicas (Rintelen Fransitorra, 2014; Ramalho, 2003). En la **Figura 5** se resumen las diferentes técnicas empleadas habitualmente como tratamientos terciarios y se agrupan según la clasificación considerada previamente.

Filtración	Tecnologías de Membranas	Técnicas para Desinfectar	Oxidación Avanzada	Otras Técnicas Terciarias
<ul style="list-style-type: none"> <li>F. Profunda</li> <li>F. Superficial</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Microfiltración</li> <li>Ultrafiltración</li> <li>Nanofiltración</li> <li>Ósmosis inversa</li> <li>Biorreactores de membranas (MBR)</li> <li>Electrodialisis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cloración con Cl<sub>2</sub></li> <li>Cloración con ClO<sub>2</sub> (NaClO<sub>2</sub>)</li> <li>Radiación UV</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Electro-oxidación</li> <li>Peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)</li> <li>Ozonación (O<sub>3</sub>)</li> <li>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> o O<sub>3</sub> en combinación con radiación UV</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Adsorción con carbón activado</li> <li>Intercambio iónico</li> <li>Desmineralización</li> <li>Desorción de aire (stripping)</li> <li>Post-precipitación química</li> </ul>

**Figura 5.** Resumen de las técnicas empleadas habitualmente como tratamiento terciario en las ERAs, según fuente: (Rintelen Fransitorra, 2014, Ramalho, 2003).

En este trabajo hemos comparado tres de estas técnicas, pertenecientes a tres de los grandes grupos de la clasificación, con la recarga gestionada de acuíferos. Las técnicas seleccionadas y la razón para su selección son:

- 1- la *radiación UV*, por su eficiente capacidad de desinfección sin generar subproductos perjudiciales,
- 2- la *ozonación* ( $O_3$ ), por su gran capacidad de inactivación de microorganismos (Hernández, 2001) y potencial para degradar CECs (El-taliawy *et al.*, 2018),
- 3- la *nanofiltración* por su eficiente capacidad de eliminar CECs (Garcia-Ivars *et al.*, 2017).

A continuación, se describen brevemente estas tres técnicas.

### Radiación UV

Es esta técnica se aplica la irradiación mediante luz ultravioleta en procesos físicos de desinfección, capaz de inactivar microorganismos (Ruíz, 2015). Se presenta como alternativa a la cloración y ozonación, por no generar subproductos de desinfección dañinos (Soriano, 2011). En esta desinfección, no queda cloro residual en el agua tratada, lo cual puede ser visto como una ventaja o un inconveniente; ventaja porque garantiza la ausencia de productos químicos con efectos tóxicos en el agua, e inconveniente, porque después de ser tratada, el agua puede volver a contaminarse durante el transporte a su destino. La aplicación de radiación UV lleva asociados elevados costes de operación y mantenimiento, incluidos recambios de las lámparas, mano de obra especializada y consumo energético (Lee *et al.*, 2015).

### Ozonación ( $O_3$ )

La ozonación es un proceso de oxidación química avanzada que utiliza el gas ozono ( $O_3$ ) para oxidar los compuestos orgánicos e inorgánicos; eliminar color, sabor y olor del agua (Brenes, 2006). El  $O_3$  es el desinfectante de mayor poder biocida, inactiva microorganismos patógenos y elimina virus (Ramalho, 2003). Su eficaz poder desinfectante permite periodos cortos de contacto de tratamiento (Carrasco y Menéndez, 2010). Tiene gran potencial para eliminar CECs, y además a penas genera subproductos de degradación, pudiendo generar bromatos y aldehídos (Patiño *et al.*, 2014; Gordillo, 2013).

Las principales desventajas de la ozonación son el alto coste del equipo, el gran consumo de energía requerido (Patiño *et al.*, 2014), y la necesidad de generación *in situ* del  $O_3$ , ya que por su alta temperatura y presión, el  $O_3$  no se puede almacenar, elevando los costes de aplicación (Brenes, 2006).

### Nanofiltración

También conocida como ósmosis inversa a baja presión, en esta técnica generalmente se trabaja a una presión entre 0.5 y 1.5 megapascales (Soriano, 2011). Tiene capacidad de filtrar partículas en suspensión y ciertas especies disueltas, así como de retener macromoléculas de tamaños inferiores a 2

nanómetros, de ahí su nombre (Mueller *et al.*, 2012). La nanofiltración se considera un tratamiento avanzado para producir aguas regeneradas, aplicado para eliminar eficazmente los sólidos en suspensión y microorganismos que quedan después de los tratamientos convencionales, primario y secundario (Rizzo *et al.*, 2019).

La nanofiltración, como técnica de depuración de aguas residuales, conlleva elevados costes asociados al mantenimiento de las membranas (limpieza y reemplazo), producto del llamado *fouling* o pérdida de rendimiento de la membrana por deposición de materia en suspensión o disuelta, en su superficie externa o en los poros (Schäfer *et al.*, 2004). Además, el elevado consumo energético y la disposición del concentrado (lodos) incrementan los costes operacionales del sistema (Abtahi *et al.*, 2019). Para extender la vida útil de las membranas, se aplican al influente tratamientos previos de nanofiltración (Samhaber y Nguyen, 2014), lo que conlleva un incremento de los costes del sistema.

### **1.3 Recarga gestionada de acuíferos**

#### **1.3.1. Antecedentes y fundamentos de MAR**

La recarga gestionada de acuíferos es un mecanismo para favorecer la infiltración de agua a través del terreno, mediante sistemas de recarga en superficie y/o sistemas de recarga en profundidad, con el objetivo de aumentar el volumen de las masas de agua subterránea y mejorar la calidad del agua recargada (Dillon *et al.*, 2010; Dillon *et al.*, 2020), evitando así contaminar el acuífero. Los dispositivos operacionales de los sistemas de recarga en superficie comprenden diferentes sistemas, como balsas de infiltración, técnicas de tratamiento suelo-acuífero, represas, serpenteos y escarificación del lecho del río, entre otras.

Las fuentes principales de agua de recarga en MAR incluyen agua de la red de distribución, agua pluvial, agua de escorrentía y agua residual tratada. Estas últimas constituyen una importante fuente de agua para recarga, por su permanencia y volumen (Escolero *et al.*, 2017).

La recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada, contribuye a la disminución de descargas de efluentes de EDARs a cuerpos superficiales (por ejemplo mares y ríos), además evita invertir en técnicas de depuración de aguas residuales, sin un fin de reutilización (Dillon, *et al.*, 2009).

Actualmente, la MAR es frecuentemente aplicada en Europa Central, Australia, India y Estados Unidos de América. Australia, es el continente más seco del planeta y con precipitaciones muy variables, es el país con el mayor desarrollo en la gestión de aguas regeneradas (Apostolidis, *et al.*, 2011). Berlín utiliza un 75% de aguas provenientes de técnicas de MAR y Ámsterdam un 65% (Rojas Calderón, 2019). En California y Nueva York, la MAR ha impulsado el fortalecimiento de la gestión de aguas subterráneas.

### 1.3.2. Aplicación de MAR como tratamiento terciario

La MAR como posible tratamiento terciario, utilizando aguas tratadas para la recarga, genera diversos beneficios en el medio ambiente, desde regeneración de aguas, así como bajos costes de inversión y operación. La MAR tiene la capacidad de filtrar materia coloidal, retener/desactivar bacterias, protozoos y virus, y favorecer la degradación de CECs (Dillon *et al.*, 2019), incluyendo los fármacos y productos de cuidado personal (Park and Lee, 2018; Valhondo *et al.*, 2018; Valhondo *et al.*, 2020b). Después de un tiempo de tránsito determinado, el agua recargada alcanza una calidad apta como para ser considerada un recurso hídrico alternativo y utilizarse como agua de uso industrial, agua de riego agrícola, agua de sustento de ecosistemas (por ejemplo humedales), y riego de calles y jardines, según los requerimientos de calidad necesarios para cada uso (Dillon *et al.*, 2009).

Los principales procesos asociados a la mejora de la calidad del agua recargada son: la filtración, la degradación y la adsorción. Estos procesos se pueden potenciar mediante el uso de barreras reactivas para conseguir así reducir el tiempo necesario de tratamiento (Valhondo *et al.*, 2015, 2018, 2020a y 2020b).

## 2. Metodología

Para valorar y comparar la mejora de la calidad de los efluentes de EDARs, a través de diferentes tratamientos terciarios y de la MAR, seleccionamos unos parámetros microbiológicos y fisicoquímicos, y estudiamos su evolución a través de los distintos tratamientos. Seleccionamos estos parámetros, porque nos informan sobre la mayor o menor posibilidad de que las aguas regeneradas puedan ser empleadas en distintos usos, tales como riego de parques, jardines, calles o en agricultura, guiándonos de los requerimientos establecidos en el *Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas; Guidelines for Water Reuse, United State Environmental Protection Agency 2012* y la *World Health Organization Guidelines for Drinking-water Quality 2011* (AEBOE, 2007; US EPA, 2012; WHO, 2011).

La evolución de la calidad microbiológica se ha evaluado mediante el grado de eliminación de *coliformes totales* y *coliformes fecales*. Ambos indicadores son fáciles de analizar y se emplean con frecuencia en estudios de regeneración y reutilización de aguas residuales (Salgot *et al.*, 2006).

Para evaluar la mejora de la calidad fisicoquímica del agua se ha estudiado la evolución de la *demanda química de oxígeno (DQO)* y de 3 contaminantes emergentes, *carbamazepina*, *ibuprofeno* y *diclofenaco*, habitualmente detectados en efluentes secundarios de EDARs y ERAs.

La DQO es el oxígeno necesario para oxidar toda la materia orgánica presente en el agua, tanto la fácilmente degradable como la más recalcitrante, y por lo tanto, es útil para evaluar la eficiencia del tratamiento eliminando materia orgánica (Gutiérrez y Moreno, 2018).

Los contaminantes emergentes se detectan frecuentemente en las aguas de los efluentes de tratamiento secundario de las EDARs (Wang *et al.*, 2020). El término engloba a un amplio grupo de compuestos con propiedades fisicoquímicas muy variadas. En el medio acuático presentan comportamientos y persistencia muy dispares dependiendo de su estructura química (Patel *et al.*, 2020). La carbamazepina, es un antiepiléptico caracterizado por su alta persistencia en el medio acuático (Capodaglio *et al.*, 2018) debido a su escasa biodegradación. El ibuprofeno es un analgésico y antiinflamatorio no esteroideo, ampliamente consumido y fácilmente biodegradable (Smook *et al.*, 2008).

El diclofenaco es un antiinflamatorio y uno de los fármacos más frecuentes y a mayor concentración medidos en efluentes de aguas residuales (Hijosa-Valsero *et al.*, 2016), y que presenta tasas de eliminación moderadas en tratamientos biológicos (Nowrotek *et al.*, 2016).

Además de la mejora de la calidad del agua tratada, es importante establecer los requerimientos económicos asociados a cada uno de los tratamientos que se van a comparar. En nuestro caso, hemos tenido en cuenta los *costes* capitales totales y los costes operacionales totales de los sistemas de tratamientos. Los *costes capitales totales* representan todos los costes de implementación e inversión de los sistemas de tratamientos, desde costes de los estudios preliminares del emplazamiento, costes del diseño y construcción del sistema, hasta los costes de adquisición del terreno donde se ha de instalar.

Los *costes operacionales totales* abarcan todos aquellos costes de la puesta en marcha de los sistemas de tratamientos, tales como, mano de obra, mantenimiento, consumo energético, consumo de productos químicos y coste de transporte de residuos, entre otros. En la **Tabla 1** se recogen los parámetros seleccionados para la evaluación y comparación de los tratamientos terciarios.

**Tabla 1.** Parámetros seleccionados para la comparación entre la recarga gestionada de acuíferos y tratamientos terciarios seleccionados.

Resumen Selección de Parámetros	
<b>Parámetros Microbiológicos</b>	Coliformes totales y Coliformes fecales
<b>Parámetros Químicos</b>	DQO, Carbamazepina, Ibuprofeno y Diclofenaco
<b>Requerimientos Económicos</b>	Costes Capitales Totales y Costes Operacionales Totales

Para comparar la efectividad de los diferentes tratamientos, calculamos la variación de las concentraciones de los parámetros seleccionados a la entrada y salida de cada tratamiento terciario. Cuando el estudio proporcionó un rango de valores, utilizamos los valores máximos. La eliminación de coliformes totales y coliformes fecales durante un tratamiento la expresamos en unidades logarítmicas, mientras que la de DQO y la concentración de contaminantes emergentes las expresamos en porcentaje de la concentración de entrada eliminada a la salida del tratamiento.

### 3. Resultados y Discusión

#### 3.1. Resultados de calidad fisicoquímica y microbiológica de efluentes secundarios y terciarios de aguas reutilizadas

##### Radiación UV

La radiación UV tiene la capacidad de eliminar coliformes totales y coliformes fecales (D'Alessio *et al.*, 2016). Maroneze *et al.* (2014) calculan una tasa de eliminación de coliformes totales de 1 Log (de  $8.2 \times 10^4$  MPN 100 mL a  $8.8 \times 10^3$  MPN 100 mL) durante la desinfección mediante radiación UV en un estudio a escala piloto de depuración de aguas residuales. Zhou *et al.* (2017), obtienen reducciones de 3.76 Log en la eliminación de coliformes fecales (de 378535 CFU/L a 66 CFU/L) durante la desinfección de un efluente secundario mediante radiación UV.

La radiación UV es además eficaz eliminando materia orgánica. Alsulaili *et al.* (2017), observaron una reducción del 60% en la DQO (de 66.7 mg/l en el influente a 26.7 mg/l en el efluente) después de un tratamiento con UV en un ensayo piloto para tratar las aguas residuales de escuelas.

La radiación UV no sólo puede eliminar microorganismos patógenos, sino que es considerada una de las técnicas más eficientes para eliminar contaminantes emergentes de las aguas (Sun *et al.*, 2019). Capodaglio *et al.* (2018) obtuvieron una tasa de degradación para la carbamazepina de un 4% (de 71 ng/L a 68 ng/L) después de un tratamiento con UV, evidenciando que la carbamazepina es especialmente resistente a la degradación. Park y Lee (2018), observaron una tasa de eliminación de 12% para el ibuprofeno (de 95 ng/L a 84 ng/L). La radiación UV es más efectiva en la eliminación del diclofenaco; Salgado *et al.* (2012) obtuvieron tasas de eliminación del 63% (de 4144 ng/L a 1521 ng/L) para este fármaco durante el tratamiento con UV en una depuradora.

##### Ozonación (O<sub>3</sub>)

El ozono tiene un alto poder eliminando los microorganismos patógenos en aguas (Wang *et al.*, 2018). Bilotta y Daniel (2010), en un ensayo piloto para evaluar la ozonación como tratamiento terciario con el objetivo de desinfectar aguas residuales de origen doméstico, obtuvieron una eliminación de coliformes totales de 2.3 Log (de  $39 \times 10^5$  MPN/100 mL a  $20 \times 10^3$  MPN/100 mL). Tripathi *et al.* (2011) obtuvieron valores similares de reducción de coliformes fecales después de 5 min de exposición a una dosis de 10 mg O<sub>3</sub>/L, 2.5 Log (de 209000 MPN/100 ml a 600 MPN/100 ml).

El empleo de la ozonación en el tratamiento de las aguas residuales incrementa los niveles de oxígeno disuelto y disminuye la DQO (Singh *et al.*, 2015). Además de evaluar la eliminación de patógenos en Bilotta y Daniel (2010), se evaluó la eficiencia del sistema reduciendo la DQO en un 36% (de 96 mg/L a 61 mg/L).

Como método de oxidación avanzada, la ozonación ha sido considerada una técnica muy eficaz para

disminuir la presencia de contaminantes emergentes, entre ellos los fármacos (Rizzo *et al.*, 2019). Szabová *et al.* (2020), en estudios de laboratorio, obtuvieron tasas de eliminación del 100% para el diclofenaco (de 680 ng/L a <0.4 ng/L) y del 99% para la carbamazepina (de 150 ng/L a 7 ng/L) después de 1 minuto de ozonación. Nakada *et al.* (2007) observaron un 76% de reducción en la concentración de ibuprofeno (de 2.98 ng/L a 0.72 ng/L) durante proceso de ozonación con una dosis de 3 mg/L en un tiempo de 27 minutos en un experimento a escala real.

### **Nanofiltración**

La nanofiltración es muy eficiente eliminando microorganismos patógenos. Trujillo *et al.* (2008) obtuvieron una eliminación de coliformes totales y coliformes fecales del 100% (de 60±35 CFU/100 mL a no detectados para los totales, y de 11±7 CFU/100 ML a no detectados para los fecales)

Además, mediante la nanofiltración se consigue disminuir la DQO muy eficientemente. Amaral *et al.* (2016) trataron el lixiviado de un vertedero municipal en una depuradora piloto en Brasil. Uno de los tratamientos aplicados fue la nanofiltración, obteniendo una reducción de la DQO de un 84% (de 2931 mg/L a 482 mg/L).

Por otra parte, la nanofiltración es considerada una técnica con altas tasas de eliminación de contaminantes emergentes (Abtahi *et al.*, 2019). Miralles-Cuevas *et al.* (2014) obtuvieron una tasa de eliminación del ibuprofeno del 87% (de 15000 ng/L a 2000 ng/L) en un sistema de nanofiltración a escala piloto compuesto por 2 membranas. Shanmuganathan *et al.* (2015), reportaron tasas de eliminación del 88% (de 434 ng/L a 50 ng/L) para la carbamazepina y del 96% (de 131 ng/L a < 5 ng/L) para el diclofenaco, confirmando así la alta eficiencia de la nanofiltración para eliminar contaminantes emergentes.

### **MAR**

La MAR se considera una técnica natural para depurar aguas residuales, debido a los procesos biológicos, físicos y químicos que intervienen (Lakretz *et al.*, 2017). Es una técnica eficiente eliminando microorganismos patógenos, materia orgánica y contaminantes emergentes (Valhondo *et al.*, 2020a).

Alcalde *et al.* (2008) obtuvieron una tasa de eliminación de 2.5 Log para coliformes totales. Elkayam *et al.* (2018) describen la fuerte relación entre las tasas de eliminación de coliformes y los tiempos/distancias de tránsito del agua infiltrada a través del acuífero después de obtener una reducción de 5.2 Log de coliformes fecales (de 160000 CFU/100 mL a < 1 CFU/100 mL). Por su parte, Coutinho *et al.*, (2018) evaluaron la eliminación de DQO mediante ensayos de columna y obtuvieron eliminaciones del 37%.

Drewes *et al.*, (2007) estudiaron la eliminación de contaminantes emergentes en MAR utilizando efluente de tratamiento secundario para la recarga. Tras 4 semanas de tiempo de tránsito observaron

tasas de eliminación del 100% para el diclofenaco (80 ng/L a no detectado) y de 100% para el ibuprofeno (3380 ng/L a no detectado). Por otra parte, van Driezum *et al.* (2019) obtuvieron tasas de eliminación para la carbamazepina de un 66% después de que el agua infiltrada del Danubio recorriera una distancia de 782 m a través del acuífero (de 42.0 ng/L a 14.4 ng/L).

En **Tabla 2** se muestran los valores de los parámetros seleccionados para la evaluación de la eficiencia de los tratamientos obtenidos en todos los estudios consultados.



**Tabla 2.** Valores observados a la entrada y salida de los tratamientos y tasas de eliminación calculadas de los parámetros seleccionados para la evaluación de la eficiencia y comparación entre los tratamientos terciarios estudiados, incluyendo la MAR.

<b>Resumen Evaluación de Parámetros por Técnicas de Tratamiento</b>				
<b>Radiación UV</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Influyente</b>	<b>Efluente</b>	<b>Eliminación</b>
<b>Coliformes Totales<sup>a</sup></b>	MPN 100 mL	8.2x10 <sup>4</sup>	8.8x10 <sup>3</sup>	<b>1 Log</b>
<b>Coliformes Fecales<sup>b</sup></b>	CFU/L	378535	66	<b>3.76 Log</b>
<b>DQO<sup>c</sup></b>	mg/L	66.7	26.7	<b>60%</b>
<b>Carbamazepina<sup>d</sup></b>	ng/L	71	68	<b>4%</b>
<b>Ibuprofeno<sup>e</sup></b>	ng/L	95	84	<b>12%</b>
<b>Diclofenaco<sup>f</sup></b>	ng/L	4157	1521	<b>63%</b>
<b>Ozono (O<sub>3</sub>)</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Influyente</b>	<b>Efluente</b>	<b>Eliminación</b>
<b>Coliformes Totales<sup>g</sup></b>	MPN 100 mL	39x10 <sup>5</sup>	20x10 <sup>3</sup>	<b>Log= 2.3</b>
<b>Coliformes Fecales<sup>h</sup></b>	MPN 100 mL	209000	600	<b>Log= 2.5</b>
<b>DQO<sup>g</sup></b>	mg/L	96	61	<b>36%</b>
<b>Carbamazepina<sup>i</sup></b>	ng/L	680	7	<b>99%</b>
<b>Ibuprofeno<sup>j</sup></b>	ng/L	2.98	0.72	<b>76%</b>
<b>Diclofenaco<sup>i</sup></b>	ng/L	150	0.39	<b>100%</b>
<b>Nanofiltración</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Influyente</b>	<b>Efluente</b>	<b>Eliminación</b>
<b>Coliformes Totales<sup>k</sup></b>	CFU/100 mL	60	n.d.	<b>Total*</b>
<b>Coliformes Fecales<sup>k</sup></b>	CFU/100 mL	11	n.d.	<b>Total*</b>
<b>DQO<sup>l</sup></b>	mg/L	2931	482	<b>84%</b>
<b>Carbamazepina<sup>m</sup></b>	ng/L	434	50	<b>88%</b>
<b>Ibuprofeno<sup>n</sup></b>	ng/L	15000	2000	<b>87%</b>
<b>Diclofenaco<sup>m</sup></b>	ng/L	131	4.99	<b>96%</b>

**MAR**

Parámetro	Unidad	Influyente	Efluente	Eliminación
<b>Coliformes Totales<sup>o</sup></b>	Log CFU/100 mL	5.9	3.4	<b>Log= 2.5</b>
<b>Coliformes Fecales<sup>p</sup></b>	CFU/100 mL	160000	0.99	<b>Log=5.2</b>
<b>DQO<sup>q</sup></b>	mg/L	78.13	49.18	<b>37%</b>
<b>Carbamazepina<sup>r</sup></b>	ng/L	42	14.4	<b>66%</b>
<b>Ibuprofeno<sup>s</sup></b>	ng/L	3380	n.d.	<b>100%</b>
<b>Diclofenaco<sup>s</sup></b>	ng/L	80	n.d.	<b>100%</b>

**n.d.: no detectado**

\* la eliminación fue completa.

**a** (Maroneze *et al.*, 2014); **b** (Zhou *et al.*, 2017); **c** (Alsulaili *et al.*, 2017); **d** (Capodaglio *et al.* 2018); **e** (Park and Lee, 2018); **f** (Salgado *et al.*, 2012); **g** (Bilotta and Daniel 2010); **h** (Tripathi *et al.*, 2011); **i** (Szabová *et al.*, 2020); **j** (Nakada *et al.*, 2007); **k** (Trujillo *et al.*, 2008); **l** (Amaral *et al.*, 2016); **m** (Shanmuganathan *et al.*, 2015); **n** (Miralles-Cuevas, *et al.*, 2014); **o** (Alcalde *et al.*, 2008); **p** (Elkayam *et al.*, 2018); **q** (Coutinho *et al.*, 2018); **r** (van Driezum *et al.*, 2019); **s** (Drewes *et al.*, 2007).

## 3.2. Resultados de evaluación económica

### Radiación UV

Alsulaili *et al.*, (2017) cuantifican los costes de un sistema a escala piloto compuesto por un desbaste, un filtro de arena, lámparas UV y cloración para depurar y utilizar las aguas residuales de los desagües de 7 escuelas. Depurar las aguas residuales de una de las escuelas (caudal de 3.5 m<sup>3</sup>/d) tiene un coste capital total de 11966 € y un coste operacional total (incluyendo costes energéticos y mantenimiento) de 5037 € para un periodo de 160 días (año académico en Kuwait).

### Ozonación (O<sub>3</sub>)

Mainardis *et al.*, (2020) evaluaron económicamente la desinfección mediante ozonación de aguas residuales de una EDAR a escala piloto en Italia, con un caudal de 1200 m<sup>3</sup>/h. El coste capital total correspondiente a la instalación de la unidad de ozonación fue de 2000000 € y el coste operacional total evaluado durante un año fue de 2040000 €/año.

### Nanofiltración

Yangali-Quintanilla *et al.* (2010), evaluaron los costes de un sistema de nanofiltración para producir agua regenerada a partir de efluente secundario de una EDAR. El coste capital total del sistema para tratar 100 m<sup>3</sup>/h fue de 1899380 € y el coste operacional total durante un año fue 201993 €/año.

### MAR

Xanke *et al.*, (2020) reportaron el análisis económico de un sistema de MAR a escala piloto con una vida útil de 30 años y una capacidad de infiltración de 1000000 m<sup>3</sup>/año. Calcularon un coste capital total de 421876 € y un coste operacional total de 207460 €.

En **Tabla 3** resumimos los costes analizados, así como el coste capital por caudal (€ año/m<sup>3</sup>) y el coste operacional por caudal (€/m<sup>3</sup>) durante todo un año (365 días) de cada uno de los sistemas terciarios y de MAR estudiados. En el **Anexo 1** se encuentran las Tablas 1,2,3 y 4 en las que se detallan los análisis económicos de los terciarios seleccionados y del sistema MAR.

**Tabla 3.** Resumen evaluación económica de los tratamientos terciarios considerados y MAR.

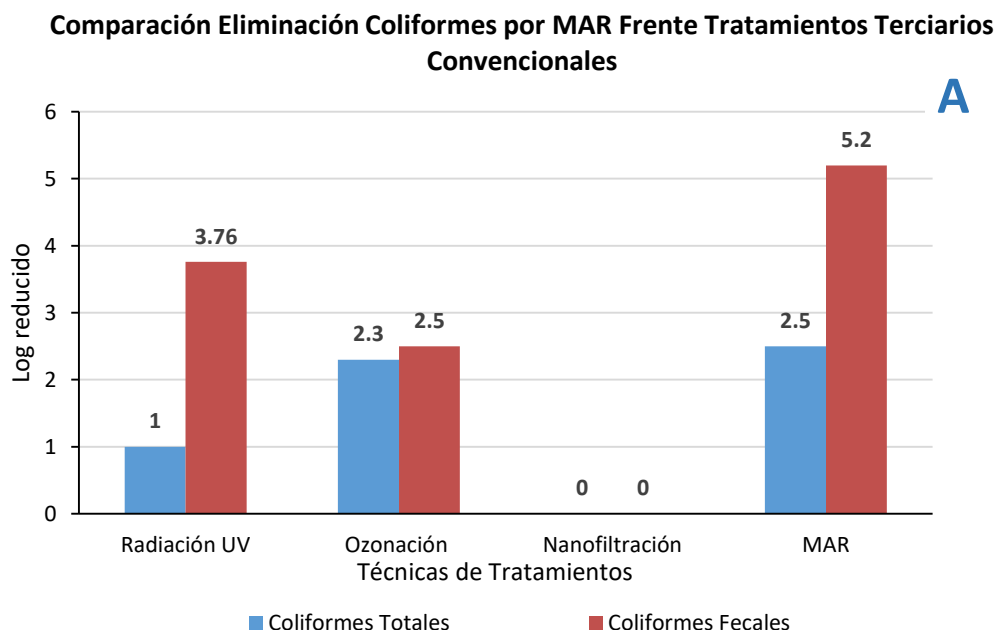
Resumen Evaluación Económica					
	Unidad	Técnicas de Tratamiento			
		Radiación UV <sup>a</sup>	Ozonación <sup>b</sup>	Nanofiltración <sup>c</sup>	MAR <sup>d</sup>
<b>Caudal a Tratar<sup>e</sup></b>	m <sup>3</sup> /año	1277.50	10512000	876000	1000000
<b>Coste Capital Total</b>	€	11966	2000000	1899380	421876
<b>Coste Operacional Total</b>	€/año	11490.70 <sup>f</sup>	2040000	201993	207460
<b>Coste Capital Total Por Caudal</b>	€ año/m <sup>3</sup>	9.37	0.19	2.17	0.42
<b>Coste Operacional Total Por Caudal</b>	€/m <sup>3</sup>	9.0	0.19	0.23	0.21

**a** (Alsulaili *et al.*, 2017); **b** (Mainardis *et al.*, 2020); **c** (Yangali-Quintanilla *et al.*, 2010); **d** (Xanke *et al.*, 2020); **e** caudal de sistema radiación UV (3.5 m<sup>3</sup>/d), ozonación (1200 m<sup>3</sup>/h) y nanofiltración (100 m<sup>3</sup>/h) convertido a m<sup>3</sup>/año; donde un año: 365 días y **f**: coste operacional total de radiación UV (5037 €/160 días) convertido a €/año, donde un año: 365 días.

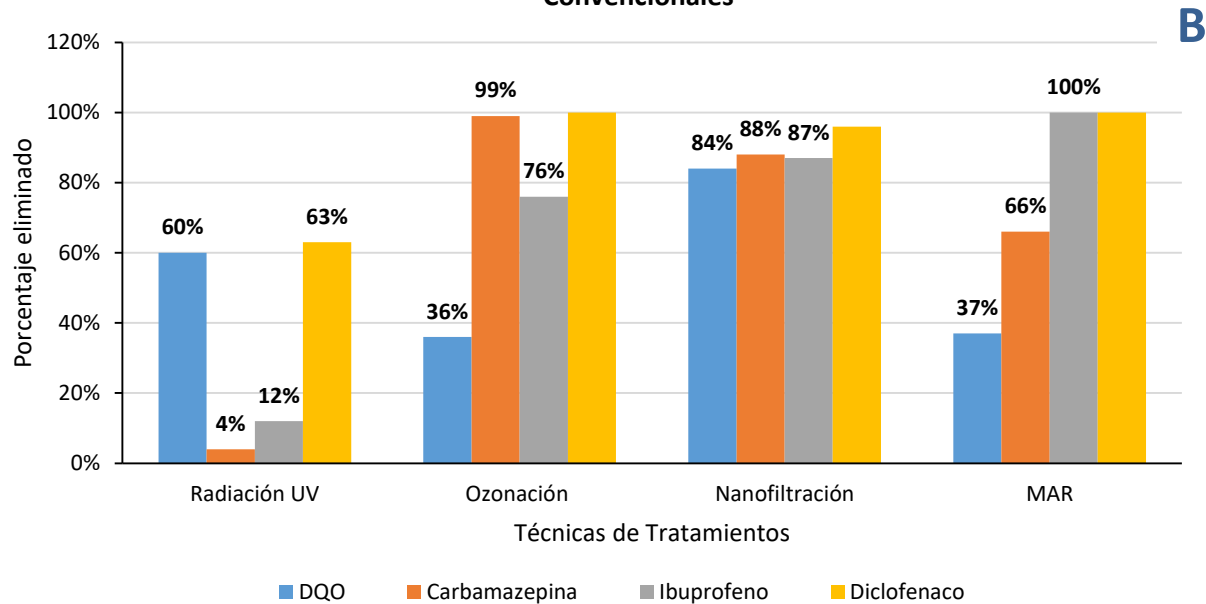
#### 4. Comparación MAR frente a los tratamientos terciarios convencionales seleccionados

La **Figura 6** muestra las tasas de eliminación de los indicadores microbiológicos (A) y de la DQO y los contaminantes emergentes (B) reportadas en la bibliografía revisada, evidenciando que la mejora de la calidad del agua tratada mediante MAR es comparable a la obtenida mediante tratamientos terciarios convencionales.

La eliminación de coliformes totales y coliformes fecales en el agua tratada mediante MAR fue de 2.5 y 5.2 Log, respectivamente, valores muy superiores a los obtenidos mediante radiación UV (1 y 3.76 Log), y mediante ozonación (2.3 y 2.5 Log). Estos valores ratifican la alta capacidad de la MAR para reducir la carga de patógenos del agua recargada, en comparación con otros tratamientos terciarios comúnmente aplicados en las ERAs.



### Comparación Eliminación DQO y Fármacos por MAR Frente Tratamientos Terciarios Convencionales



**Figura 6.** Tasas de eliminación de los indicadores microbiológicos, (A) coliformes totales en azul y coliformes fecales en rojo y (B) de los parámetros fisicoquímicos obtenidos para las diferentes técnicas de tratamiento terciario en la bibliografía revisada.

De las técnicas revisadas, la nanofiltración es la que consigue la mayor eficiencia de eliminación de DQO (84%), seguida por la radiación UV (60%); las eficiencias de eliminación obtenidas con la MAR y la ozonación alcanzan un poco más del 35%. Esta alta eficiencia de la nanofiltración eliminando DQO frente a los otros tratamientos, está muy influenciada por los pretratamientos que el agua residual tuvo antes de ser tratada por el terciario. Tal es el sistema de nanofiltración en (Amaral *et al.*, 2016); donde antes del agua residual entrar en el sistema, paso por un pretratamiento de biorreactor de membranas, compuesto por membranas de microfiltración, el cual es un pretratamiento muy efectivo para reducir concentraciones significativas de DQO antes de la nanofiltración (Lebron *et al.*, 2020). Por tanto, la nanofiltración requiere tratamientos previos que encarecen los costes de la técnica, mientras que la MAR permite eliminar contaminantes desde efluentes secundarios sin tener que aplicar pretratamientos.

Con respecto a los contaminantes emergentes, la MAR eliminó 66% de carbamazepina y 100% de ibuprofeno, porcentajes de eliminación mayores que los de la radiación UV (4% y 12%, respectivamente), pero éstos inferiores a los obtenidos mediante ozonación (99% y 76%). El diclofenaco fue completamente eliminado con los tratamientos mediante MAR y ozonación, mientras la eficiencia de eliminación obtenida mediante radiación UV fue del 63%. El tratamiento con nanofiltración consiguió una eficiencia de eliminación de la carbamazepina del 88%, muy superior a la obtenida con el tratamiento mediante MAR, sin embargo, las eficiencias de eliminación obtenidas para el ibuprofeno y el diclofenaco son inferiores (87% y 96%, respectivamente) que las obtenidas mediante MAR (100% en ambos casos).

El coste capital total del sistema MAR es de 421876 €, siendo éste menor al coste capital total de los 2 terciarios estudiados con mejor eficiencia eliminando coliformes y fármacos (*ozonación* y *nanofiltración*), con costes capitales totales de 2000000 € y 1899380 €, respectivamente. Los sistemas de MAR presentan ventaja en costes capitales (inversión) frente a los dos terciarios más eficientes y costosos.

La *ozonación* resultó ser el terciario con el coste operacional más alto (2040000 €/año), quedando por debajo del coste operacional total del sistema MAR (207460 €/año), pero éste ligeramente por encima del coste operacional total de la *nanofiltración* (201993 €/año). De los tres terciarios, el de menor coste operacional fue la *radiación UV*. En **Figura 8** se muestra comparación entre los costes totales de cada técnica.

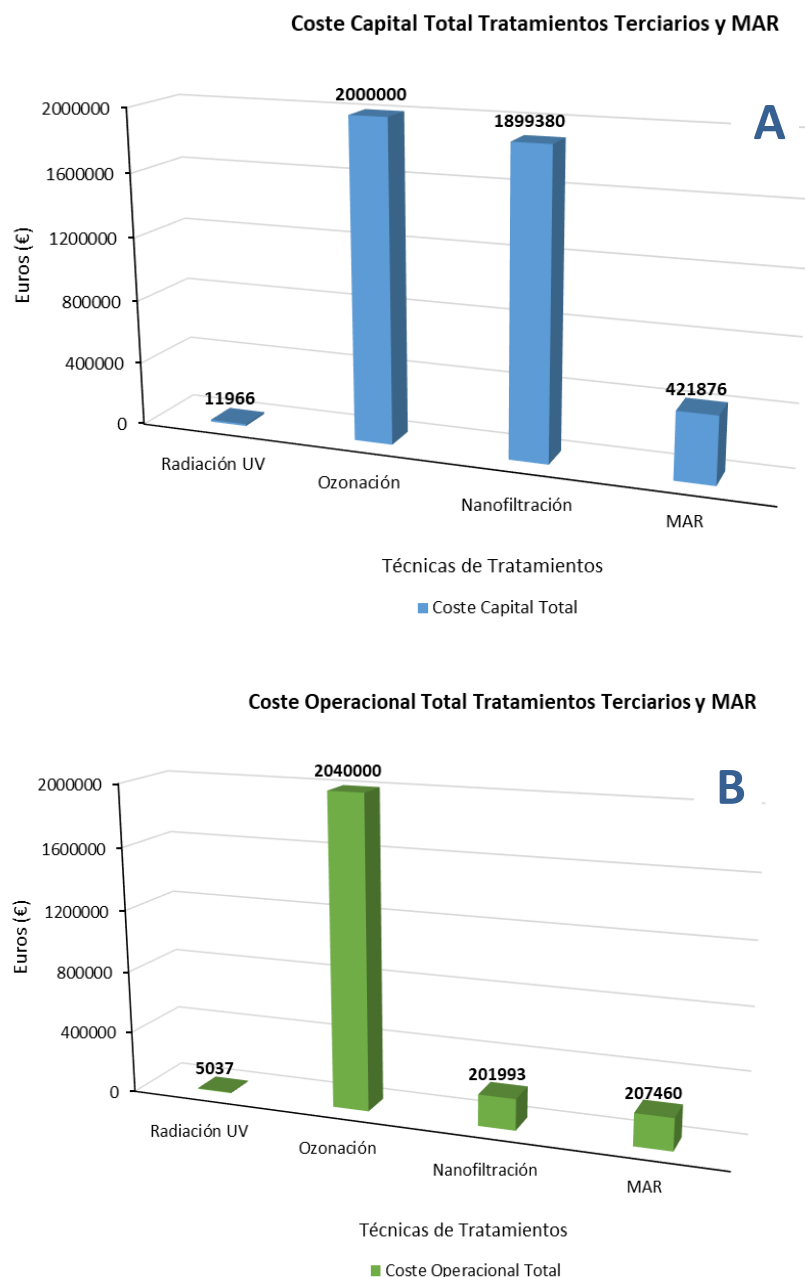
La **Figura 7** muestra la evaluación comparativa de un sistema de MAR frente a los tres tratamientos terciarios seleccionados. Se ha considerado que eliminaciones superiores a 2 Log, para microorganismos patógenos, y al 70%, para los parámetros químicos son valores altos, entre 1 y 2 Log y entre 50 y 70% son valores medios y por debajo de 1 Log y del 50% son valores bajos. Además, inversiones con costes mayores a 1000000 de € son valores altos, entre 200000 € y 1000000 € valores medios e inversiones con costes menores a 200000 € son valores bajos.

Características	MAR vs. Tratamientos Terciarios				
	Radiación UV	O <sub>3</sub>	Nanofiltración	MAR	
Eliminación coliformes totales	●	●	●	●	Bajo ●
Eliminación coliformes fecales	●	●	●	●	
Eliminación DQO	●	●	●	●	
Eliminación carbamazepina	●	●	●	●	Medio ●
Eliminación ibuprofeno	●	●	●	●	Alto ●
Eliminación diclofenaco	●	●	●	●	
Inversión costes capitales	●	●	●	●	
Inversión costes operacionales	●	●	●	●	

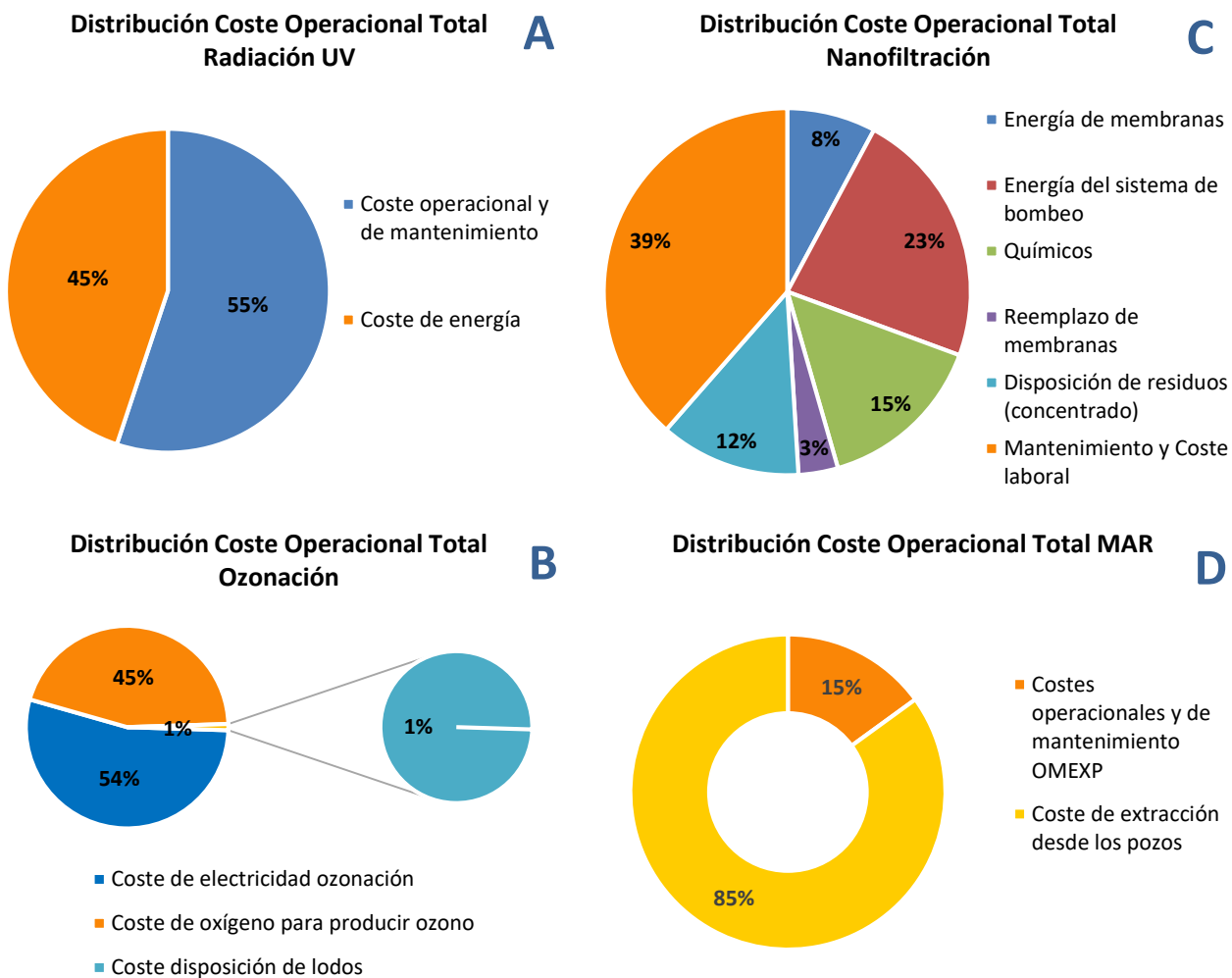
**Figura 7.** Evaluación comparativa de MAR frente a los tratamientos terciarios seleccionados, valores altos en verde, valores medios en azul y valores bajos en amarillo.

La distribución de los costes operacionales totales de cada técnica se ve reflejada en el coste de energía, consumo de químicos, disposición de lodos, mantenimiento, entre otros. Los costes operacionales de la *radiación UV* y la *ozonación* están muy influenciados por consumo energético (Gordillo, 2013); llegando a representar el 55% de los costes operacionales. El coste de mantenimiento en los terciarios constituye la parte principal de los costes operacionales totales, sin embargo, en la MAR no representan parte significativa. En el sistema MAR estudiado, sólo el 15% de los costes operacionales son de mantenimiento, el 85% restante son por extracción del agua tratada. Pero, el coste de mantenimiento en los terciarios estudiados sí son significativos; en la *radiación UV*, éste representa 45% y en la *nanofiltración* 42%, de los cuales 39% es de mantenimiento y 3% de replazo de membranas, como resultado del fouling o pérdida de

rendimiento de las membranas (Samhaber y Nguyen, 2014; Donkadokula *et al.*, 2020). La *nanofiltración* y la *ozonación* tienen consumo de productos químicos de 15% y 45%, respectivamente, pudiendo dejar subproductos perjudiciales (Janet Gil *et al.*, 2012); generando así residuos especiales que necesitan tener una adecuada disposición final, traducándose en costes operacionales del sistema, en los casos estudiados, el 12% en la nanofiltración y el 1% en la ozonación de los costes operacionales totales del sistema, es por disposición de residuos. En la **Figura 9** se encuentra la distribución porcentual de los costes operacionales totales de los terciarios estudiados y de MAR.



**Figura 8.** Resumen de costes por tratamientos terciarios y sistema MAR, (A) coste capital total en azul y (B) coste operacional total en verde.



**Figura 9.** Distribución porcentual de los costes operacionales totales de los terciarios estudiados y MAR: (A) coste operacional total de radiación UV, (B) coste operacional total de la ozonación, (C) coste operacional total de sistema nanofiltración y (D) coste operacional total de la MAR.

## 5. Percepción Social Sobre la Utilización de Aguas Regeneradas en MAR

La confianza de las personas en usar agua regenerada proveniente de MAR tiene mucho que ver con qué tanto conocen la técnica MAR y su capacidad regenerativa de aguas residuales. Para mejorar la percepción social y aumentar la confianza en el uso de la MAR para la regeneración y reutilización del agua es fundamental dar a conocer a la población el funcionamiento de la técnica y las ventajas que supone su empleo (Dillon *et al.*, 2009).

Nijhawan *et al.* (2013), realizaron una encuesta para obtener información sobre la aceptación social de la aplicación de la MAR en la India. De las 500 personas consultadas (profesionales de medio ambiente desde científicos hasta profesores; estudiantes y público general) un 64% estuvo a favor, y un 28% en contra. La principal preocupación que genera el empleo de la MAR se centra en si la calidad de los efluentes de tratamiento secundario es apropiada para la recarga del acuífero sin suponer una amenaza para su salud.



## 6. Conclusiones

En la búsqueda bibliográfica, se seleccionaron los artículos que contenían las palabras claves, tales como, *treated wastewater*, *tertiary treatment*, *managed aquifer recharge*, *coliforms*, *pharmaceuticals*, entre otras. Todos los artículos seleccionados pertenecían a la última década (2010-2020), con excepción de 4 artículos de los años 2007 y 2008, los finalmente incluidos en el presente estudio.

Para la comparativa de los tratamientos terciarios se seleccionaron la *radiación UV*, la *ozonación* y la *nanofiltración*. La MAR como tratamiento terciario alternativo, tiene alto poder desinfectante, eliminando coliformes totales y coliformes fecales eficientemente. Dentro de los casos estudiados, MAR demostró tener el mismo poder desinfectante que la ozonación eliminando coliformes, y ser más eficiente que la radiación UV. Además, en las aguas recuperadas de MAR, la presencia de materia orgánica biodegradable como la no biodegradable medida con el parámetro DQO disminuyó considerablemente, a pesar de que los terciarios mostraron mayor eliminación, en particular la nanofiltración, resultó ser más eficaz eliminando materia orgánica.

De los tres contaminantes emergentes seleccionados, en concreto los fármacos *carbamazepina*, *ibuprofeno* y *diclofenaco*; para la carbamazepina, que se caracteriza por ser un compuesto recalcitrante en los tratamientos convencionales, se consiguen eficiencias de eliminación superiores al 60% mediante MAR. El diclofenaco resultó ser el fármaco con mayor eficiencia de eliminación, la radiación UV lo reduce en un tanto mayor a 60% y la ozonación y MAR lo eliminan por completo. De los tratamientos terciarios estudiados, el menos eficiente para la degradación de los fármacos seleccionados fue la radiación UV.

El tratamiento de efluentes secundarios de EDARs mediante MAR requiere menores costes capitales en comparación con los costes capitales de los terciarios comúnmente empleados en la depuración de aguas residuales, incluyendo la *ozonación* y *nanofiltración*. De los costes operacionales totales de los terciarios estudiados, la *ozonación* resultó ser el más costoso. Seguido la MAR y *nanofiltración* con costes operacionales totales un tanto similares, quedando por debajo de estas técnicas la *radiación UV*, como la técnica más barata de los 4 sistemas considerados.

A pesar de que el coste operacional total de la MAR no resultó ser el más barato de todos los sistemas estudiados (quedando en segundo lugar), dentro de las diferencias entre los terciarios estudiados y MAR, es que algunos de ellos, como la ozonación, emplean productos químicos en su proceso dejando ciertos subproductos perjudiciales; la nanofiltración produce lodos que ameritan ser dispuestos adecuadamente, ésto generando costes; características que no tiene el proceso operacional de la MAR. La MAR no requiere de altos consumos energéticos como la radiación UV,

---

ozonación y nanofiltración, y los costes por mantenimiento son considerablemente menores que los que necesitan los terciarios estudiados. El mayor porcentaje de los costes operacionales totales de la MAR en el sistema estudiado estuvo en el proceso de recuperación del agua tratada (extracción desde pozos).

La percepción social de utilizar agua regenerada mediante MAR está muy influenciada por el conocimiento de la eficiencia de esta técnica como alternativa de tratamiento terciario. Se piensa que en la MAR los fármacos no se pueden eliminar, sin embargo, en los casos estudiados el ibuprofeno y el diclofenaco tuvieron eliminación de 100%.

## 7. Bibliografía

Abtahi, S. M., Marbelia, L., Gebreyohannes, A. Y., Ahmadiannamini, P., Joannis-Cassan, C., Albasi, C., de Vos, W. M. y Vankelecom, I. F.J. (2019) ‘Micropollutant rejection of annealed polyelectrolyte multilayer based nanofiltration membranes for treatment of conventionally-treated municipal wastewater’, *Separation and Purification Technology*. Elsevier, 209(July 2018), pp. 470–481. doi: 10.1016/j.seppur.2018.07.071.

Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado (2007) ‘Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas’, *Boletín Oficial del Estado*, 7 diciembre, pp. 50639–50661.

Alsulaili, A. D., Hamoda, M. F., Al-Jarallah, R. y Alrukaibi, D. (2017) ‘Treatment and potential reuse of greywater from schools: A pilot study’, *Water Science and Technology*, 75(9), pp. 2119–2129. doi: 10.2166/wst.2017.088.

Amaral, M. C. S., Moravia, W. G., Lange, L. C., Zico, M. R., Magalhães, N. C., Ricci, B. C. y Reis, B. G. (2016) ‘Pilot aerobic membrane bioreactor and nanofiltration for municipal landfill leachate treatment’, *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*. Taylor & Francis, 51(8), pp. 640–649. doi: 10.1080/10934529.2016.1159874.

Apostolidis, N., Hertle, C. y Young, R. (2011) ‘Water recycling in Australia’, *Water (Switzerland)*, 3(3), pp. 869–881. doi: 10.3390/w3030869.

Bekele, E., Page, D., Vanderzalm, J., Kaksonen, A. y Gonzalez, D. (2018) ‘Water recycling via aquifers for sustainable urban water quality management: Current status, challenges and opportunities’, *Water (Switzerland)*, 10(4), pp. 1–25. doi: 10.3390/w10040457.

Bilotta, P. y Daniel, L. A. (2010) ‘Inativação de indicadores microbiológicos com ozônio no tratamento de esgoto sanitário visando o reuso de água’, 4(2), pp. 48–56. Disponible en: <http://revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/view/5/26656>.

Brenes, J. J. (2006) *Diseño del proceso de tratamiento terciario de ozonación del agua de salida de una E.D.A.R. convencional para su reutilización en el riego de campos de golf*, *Journal of Chemical Information and Modeling*. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.

Capodaglio, A. G., Bojanowska-Czajka, A. y Trojanowicz, M. (2018) ‘Comparison of different advanced degradation processes for the removal of the pharmaceutical compounds diclofenac and carbamazepine from liquid solutions’, *Environmental Science and Pollution Research*. Environmental Science and Pollution Research, 25(28), pp. 27704–27723. doi: 10.1007/s11356-018-1913-6.

Carrasco, F. y Menéndez, J. Á. (2010) *Nuevos materiales y tecnologías para el tratamiento del agua*. Edited by F. Carrasco, J. Á. Menéndez, and U. I. de Andalucía. Sevilla: Universidad Internacional de Andalucía.

Connor, R., Coates, D., Uhlenbrook, S. y Koncagül, E. (2018) *Soluciones Basadas En La Naturaleza Para La Gestión Del Agua, ONU-Agua*.

D'Alessio, M., El-Swaify, G., Yoneyama, B. y Ray, C. (2016) 'A low-cost water-treatment system for potable water supplies in developing countries and after a natural disaster: Ability to remove total coliforms and E. coli', *Clean Technologies and Environmental Policy*. Springer Berlin Heidelberg, 18(3), pp. 925–934. doi: 10.1007/s10098-015-1074-y.

Dillon, P., Pavelic, P., Page, D., Beringen, H., y Ward, J. (2009) *Managed aquifer recharge: An Introduction, Managed aquifer recharge: An Introduction*. doi: 10.1007/BF01929660.

Dillon, P., Stuyfzand, P., Grischek, T., Lluria, M., Pyne, R. D. G., Jain, R. C., Bear, J., Schwarz, J., Wang, W., Fernandez, E., Stefan, C., Pettenati, M., van der Gun, J., Sprenger, C., Massmann, G., Scanlon, B. R., Xanke, J., Jokela, P., Zheng, Y., Rossetto, R., Shamruk, M., Pavelic, P., Murray, E., Ross, A., Bonilla Valverde, J. P., Palma Nava, A., Ansems, N., Posavec, K., Ha, K., Martin, R. y Sapiano, M. (2019) 'Sixty years of global progress in managed aquifer recharge', *Hydrogeology Journal*, 27(1), pp. 1–30. doi: 10.1007/s10040-018-1841-z.

Dillon, P., Escalante, E. F., Megdal, S. B. y Massmann, G. (2020) 'Recarga de acuíferos gestionada para la resiliencia del agua', *Water (Switzerland)*, 12(7), pp. 1–11. doi: 10.3390/W12071846.

Donkadokula, N. Y., Kola, A. K., Naz, I. y Saroj, D. (2020) 'A review on advanced physico-chemical and biological textile dye wastewater treatment techniques', *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*. Springer Netherlands, 19(3), pp. 543–560. doi: 10.1007/s11157-020-09543-z.

Drewes, J. E., Heberer, T., Rauch, T. y Reddersen, K. (2007) 'Fate of Pharmaceuticals During Ground Water Recharge', *Groundwater Monitoring & Remediation*, 3, pp. 64–72.

El-taliawy, H., Casas, M. E. y Bester, K. (2018) 'Removal of ozonation products of pharmaceuticals in laboratory Moving Bed Biofilm Reactors (MBBRs)', *Journal of Hazardous Materials*. Elsevier B.V., 347, pp. 288–298. doi: 10.1016/j.jhazmat.2018.01.002.

Elkayam, R., Aharoni, A., Vaizel-Ohayon, D., Sued, O., Katz, Y., Negev, I., Marano, R. B.M., Cytryn, E. y Shtrasler, L. (2018) 'Viral and Microbial Pathogens, Indicator Microorganisms, Microbial Source Tracking Indicators, and Antibiotic Resistance Genes in a Confined Managed Effluent Recharge System', *Journal of Environmental Engineering (United States)*, 144(3). doi: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001334.

Escolero, O., Gutiérrez, C. y Mendoza, E. (2017) *Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica*. Instituto. Edited by O. Escolero, C. Gutiérrez, y E. Mendoza. México.

Garcia-Ivars, J., Martella, L., Massella, M., Carbonell-Alcaina, C., Alcaina-Miranda, M. I. e Iborra-Clar, M. I. (2017) ‘Nanofiltration as tertiary treatment method for removing trace pharmaceutically active compounds in wastewater from wastewater treatment plants’, *Water Research*, 125, pp. 360–373. doi: 10.1016/j.watres.2017.08.070.

Gil Garzón, M., Soto, A., Usma Gutierrez, J. y Gutiérrez Florez, O. (2012) ‘Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos’, *Producción + Limpia*, 7(2), pp. 52–73.

Goldewijk, K. K. (2005) ‘Three centuries of global population growth: A spatial referenced population (density) database for 1700-2000’, *Population and Environment*, 26(4), pp. 343–367. doi: 10.1007/s11111-005-3346-7.

Gordillo, G. (2013) ‘Investigación técnica y económica sobre desinfección de aguas residuales por sistemas de oxidación’, p. 405.

Gutiérrez, C. M. y Moreno, J. D. (2018) ‘Los procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales desde una visión no convencional’, *Ingeniería Hidráulica Y Ambiental*, XXXIX(3), pp. 97–107.

Hernández, A. (2001) *Depuración y Desinfección de Aguas Residuales*. Quinta. Edited by A. Hernández. Madrid: Thomson Learning Paraninfo.

Hijosa-Valsero, M., Reyes-Contreras, C., Domínguez, C., Bécares, E. y Bayona, J. M. (2016) ‘Behaviour of pharmaceuticals and personal care products in constructed wetland compartments: Influent, effluent, pore water, substrate and plant roots’, *Chemosphere*, 145, pp. 508–517. doi: 10.1016/j.chemosphere.2015.11.090.

Janet Gil, M., María Soto, A., Iván Usma, J. y Darío Gutiérrez, O. (2012) ‘Emerging contaminants in waters: effects and possible treatments Contaminantes emergentes em águas, efeitos e possíveis tratamentos’, 7(2), pp. 52–73. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/pml/v7n2/v7n2a05.pdf>.

Lakretz, A., Mamane, H., Cikurel, H., Avisar, D., Gelman, E. y Zucker, I. (2017) ‘The Role of Soil Aquifer Treatment (SAT) for Effective Removal of Organic Matter, Trace Organic Compounds and Microorganisms from Secondary Effluents Pre-Treated by Ozone’, *Ozone: Science and Engineering*. Taylor & Francis, 39(5), pp. 385–394. doi: 10.1080/01919512.2017.1346465.

Lebron, Y. A.R., Moreira, V. R., Furtado, T. P.B., da Silva, S. C., Lange, L. C. y Amaral, M. C.S. (2020) ‘Vinasse treatment using hybrid tannin-based Coagulation-Microfiltration-Nanofiltration processes: Potential energy recovery, technical and economic feasibility assessment’, *Separation and Purification Technology*. Elsevier, 248(May), p. 117152. doi: 10.1016/j.seppur.2020.117152.

Lee, O. M., Kim, H. Y., Park, W., Kim, T. H. y Yu, S. (2015) 'A comparative study of disinfection efficiency and regrowth control of microorganism in secondary wastewater effluent using UV, ozone, and ionizing irradiation process', *Journal of Hazardous Materials*. Elsevier B.V., 295, pp. 201–208. doi: 10.1016/j.jhazmat.2015.04.016.

Mainardis, M., Buttazzoni, M., De Bortoli, N., Mion, M. y Goi, D. (2020) 'Evaluation of ozonation applicability to pulp and paper streams for a sustainable wastewater treatment', *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 258, p. 120781. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120781.

Metcalf y Eddy (2014) *Wasterwater engineering treatment and resource recovery*. 5<sup>a</sup> ed. Singapur: McGraw Hill Education.

Miralles-Cuevas, S., Oller, I., Ruiz Aguirre, A., Sánchez Pérez, J. A. y Malato Rodríguez, S. (2014) 'Removal of pharmaceuticals at microg L-1 by combined nanofiltration and mild solar photo-Fenton', *Chemical Engineering Journal*, 239, pp. 68–74. doi: 10.1016/j.cej.2013.10.047.

Moreira, F. C., Soler, J., Alpendurada, M. F., Boaventura, R. A.R., Brillas, E. y Vilar, V. J.P. (2016) 'Tertiary treatment of a municipal wastewater toward pharmaceuticals removal by chemical and electrochemical advanced oxidation processes', *Water Research*. Elsevier Ltd, 105, pp. 251–263. doi: 10.1016/j.watres.2016.08.036.

Mueller, N. C., Van der Bruggen, B., Keuter, V., Luis, P., Melin, T., Pronk, W., Reisewitz, R., Rickerby, D., Rios, G. M., Wennekes, W. y Nowack, B. (2012) 'Nanofiltration and nanostructured membranes-Should they be considered nanotechnology or not?', *Journal of Hazardous Materials*, 211–212, pp. 275–280. doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.10.096.

Nowrotek, M., Sochacki, A., Felis, E. y Miksch, K. (2016) 'Removal of diclofenac and sulfamethoxazole from synthetic municipal waste water in microcosm downflow constructed wetlands: Start-up results', *International Journal of Phytoremediation*. Taylor & Francis, 18(2), pp. 157–163. doi: 10.1080/15226514.2015.1073669.

Park, S. y Lee, W. (2018) 'Removal of selected pharmaceuticals and personal care products in reclaimed water during simulated managed aquifer recharge', *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V., 640–641, pp. 671–677. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.05.221.

Patel, N., Khan, Z. A., Shahane, S., Rai, D., Chauhan, D., Kant, C. y Chaudhary, V. K. (2020) 'Emerging pollutants in aquatic environment: Source, effect, and challenges in biomonitoring and bioremediation- A review', *Pollution*, 6(1), pp. 99–113. doi: 10.22059/POLL.2019.285116.646.

Patiño, Y., Díaz, E. y Ordóñez, S. (2014) 'Microcontaminantes emergentes en aguas: tipos y sistemas de tratamiento', *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 5(2), pp. 1–20.

Ramallo, R. S. (2003) *Tratamiento de aguas residuales*. Barcelona-Bogotá-Buenos Aires-Caracas-México: Editorial Reverté, S.A.

Rintelen Fransitorra, Y. (2014) ‘Análisis del ciclo de vida de los tratamientos terciarios de la EDAR de El Prat para la reutilización del agua’, pp. 1–100. Disponible en: <http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/21004>.

Rizzo, L., Malato, S., Antakyali, D., Beretsou, V. G., Đolić, M. B., Gernjak, W., Heath, E., Ivancev-Tumbas, I., Karaolia, P., Lado Ribeiro, A. R., Mascolo, G., McArdell, C. S., Schaar, H., Silva, A. M.T. y Fatta-Kassinos, Despo (2019) ‘Consolidated vs new advanced treatment methods for the removal of contaminants of emerging concern from urban wastewater’, *Science of the Total Environment*, 655(August 2018), pp. 986–1008. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.265.

Rojas Calderón, C. (2019) ‘Aspectos jurídicos sobre la Recarga Artificial de Acuíferos (RAA). Revisión desde el derecho de aguas chileno, con referencia a España y Australia’, *Ius et Praxis*, 25(2), pp. 151–188. doi: 10.4067/s0718-00122019000200151.

Ruíz, A. A. B. (2015) *Domestic Wastewater Treatment In Developing Countries*. Disponible en: <http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf>.

Salgot, M., Huertas, E., Weber, S., Dott, W. y Hollender, J. (2006) ‘Wastewater reuse and risk: Definition of key objectives’, *Desalination*, 187(1–3), pp. 29–40. doi: 10.1016/j.desal.2005.04.065.

Salgot, M. y Folch, M. (2018) ‘Wastewater treatment and water reuse’, *Current Opinion in Environmental Science and Health*. Elsevier Ltd, 2, pp. 64–74. doi: 10.1016/j.coesh.2018.03.005.

Samhaber, W. M. y Nguyen, M. T. (2014) ‘Applicability and costs of nanofiltration in combination with photocatalysis for the treatment of dye house effluents’, *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 5(1), pp. 476–484. doi: 10.3762/bjnano.5.55.

Schäfer, A. I., Andritsos, N., Karabelas, A. J., Hoek, E. M. V., Schneider, R. y Nyström, M. (2004) *Chapter 8 Fouling in Nanofiltration, Nanofiltration - Principles and Applications*.

Shahmansouri, A. y Bellona, C. (2015) ‘Nanofiltration technology in water treatment and reuse: Applications and costs’, *Water Science and Technology*, 71(3), pp. 309–319. doi: 10.2166/wst.2015.015.

Singh, S., Seth, R., Tabe, S. y Yang, P. (2015) ‘Oxidation of emerging contaminants during pilot-scale ozonation of secondary treated municipal effluent’, *Ozone: Science and Engineering*. Taylor & Francis, 37(4), pp. 323–329. doi: 10.1080/01919512.2014.998755.

Smook, T. M., Zho, H. y Zytner, R. G. (2008) 'Removal of ibuprofen from wastewater: Comparing biodegradation in conventional, membrane bioreactor, and biological nutrient removal treatment systems', *Water Science and Technology*, 57(1), pp. 1–8. doi: 10.2166/wst.2008.658.

Soriano, A. (2011) 'Universidad politécnica de madrid escuela técnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos departamento de ingeniería civil. transportes'.

Sun, P., Meng, T., Wang, Z., Zhang, R., Yao, H., Yang, Y. y Zhao, L. (2019) 'Degradation of Organic Micropollutants in UV/NH<sub>2</sub>Cl Advanced Oxidation Process', *Environmental Science and Technology*, 53(15), pp. 9024–9033. doi: 10.1021/acs.est.9b00749.

Szabová, P., Hencelová, K., Sameliaková, Z., Marcová, T., Staňová, A. V., Grabicová, K. y Bodík, I. (2020) 'Ozonation: effective way for removal of pharmaceuticals from wastewater', *Monatshefte für Chemie*. Springer Vienna, 151(5), pp. 685–691. doi: 10.1007/s00706-020-02600-x.

Tran, N. H., Reinhard, M. y Gin, K. Y. H. (2018) 'Occurrence and fate of emerging contaminants in municipal wastewater treatment plants from different geographical regions-a review', *Water Research*. Elsevier Ltd, 133, pp. 182–207. doi: 10.1016/j.watres.2017.12.029.

Tripathi, S., Pathak, V., Tripathi, D. M. y Tripathi, B. D. (2011) 'Application of ozone based treatments of secondary effluents', *Bioresource Technology*. Elsevier Ltd, 102(3), pp. 2481–2486. doi: 10.1016/j.biortech.2010.11.028.

Trujillo, J., Barrios, J. A. y Jimenez, B. (2008) 'Effect of peracetic acid , ultraviolet radiation , nanofiltration-chlorine in the disinfection of a non conventional source of water ( Tula Valley )', pp. 621–627. doi: 10.2166/wst.2008.181.

United States Environmental Protection Agency (2012) 'EPA guidelines for water reuse', *Guidelines for water reuse*, septiembre.

Üstün, G. E., Solmaz, S. K. A., Çiner, F. y Başkaya, H. S. (2011) 'Tertiary treatment of a secondary effluent by the coupling of coagulation-flocculation-disinfection for irrigation reuse', *Desalination*, 277(1–3), pp. 207–212. doi: 10.1016/j.desal.2011.04.032.

Valhondo, C., Carrera, J., Ayora, C., Tubau, I., Martinez-Landa, L., Nödler, K. y Licha, T. (2015) 'Characterizing redox conditions and monitoring attenuation of selected pharmaceuticals during artificial recharge through a reactive layer', *Science of the Total Environment*, 512–513(C), pp. 240–250. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.01.030.

Valhondo, C., Martinez-Landa, L., Carrera, J., Ayora, C., Nödler, K. y Licha, T. (2018) 'Evaluation of EOC removal processes during artificial recharge through a reactive barrier', *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V., 612, pp. 985–994. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.054.



Valhondo, C., Martínez-Landa, L., Carrera, J., Díaz-Cruz, S. M., Amalfitano, S. y Levantesi, C. (2020a) ‘Six artificial recharge pilot replicates to gain insight into water quality enhancement processes’, *Chemosphere*, 240. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124826.

Valhondo, C., Mart, L. y Wang, J. (2020b) ‘Reactive barriers for renaturalization of reclaimed’, *Water*, 12 (4), 10.

Wang, H., Sikora, P., Rutgersson, C., Lindh, M., Brodin, T., Björleinius, B., Larsson, D.G. J. y Norder, H. (2018) ‘Differential removal of human pathogenic viruses from sewage by conventional and ozone treatments’, *International Journal of Hygiene and Environmental Health*. Elsevier, 221(3), pp. 479–488. doi: 10.1016/j.ijheh.2018.01.012.

Wang, Y., Khan, S. J., Fan, L. y Roddick, F. (2020) ‘Application of a QWASI model to produce validated insights into the fate and transport of six emerging contaminants in a wastewater lagoon system’, *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V., 721, p. 137676. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137676.

World Health Organization (2011) ‘Guidelines for drinking-water quality’.

Xanke, J., Salman, A., Al-Karablieh, E., Liesch, T., Salameh, E. y Goldscheider, N. (2020) ‘Hydrogeological site investigation and economic evaluation to assess the potential of managed aquifer recharge in the Lower Jordan Valley’, *Hydrogeology Journal*, 28(2), pp. 745–762. doi: 10.1007/s10040-019-02058-0.

Yangali-Quintanilla, V., Maeng, S. K., Fujioka, T., Kennedy, M. y Amy, G. (2010) ‘Proposing nanofiltration as acceptable barrier for organic contaminants in water reuse’, *Journal of Membrane Science*, 362(1–2), pp. 334–345. doi: 10.1016/j.memsci.2010.06.058.

## 8. Anexos

### Anexo 1

**Tabla 1.** Estimación de costes sistema radiación UV. Fuente: Alsulaili *et al.*, 2017.

Estimación de Costes Sistema Radiación UV (3.5 m <sup>3</sup> /d)			
Costes	VARIABLES	Unidad	Valor
Coste Capital	Coste inicial de unidad de tratamiento y bombas. (Para unidad de tratamiento de 5 m <sup>3</sup> por día ; planta piloto).	€	5857
	Instalación y adquisición de la colección de red para irrigación	€	4066
	Sistema interno de distribución para descarga de inodoros	€	2043
	<b>Coste Capital Total</b>	€	<b>11966</b>
Coste Operacional	Coste operacional y de mantenimiento (Caudal a tratar es 3.5 m <sup>3</sup> /d para suplir irrigación y descargas de inodoros). Tiempo de año académico es 160 días.	€/160 días	2776
	Coste de energía para 3.5 m <sup>3</sup> /d	€/160 días	2261
	<b>Coste Operacional Total</b>	€/160 días	<b>5037</b>

**Tabla 2.** Estimación de costes sistema ozonación. Fuente: Mainardis *et al.*, 2020.

Estimación de Costes Sistema de Ozonación (1,200 m <sup>3</sup> /h)			
Costes	VARIABLES	Unidad	Valor
Coste Capital	Compañía de Instalación de ozonación (Inversión)	€	2000000
	<b>Coste Capital Total</b>	€	<b>2000000</b>
Coste Operacional	Coste de electricidad ozonación	€/año	1100000
	Coste de oxígeno para producir ozono	€/año	920000
	Coste disposición de lodos	€/año	20000
	<b>Coste Operacional Total</b>	€/año	<b>2040000</b>

**Tabla 3.** Estimación de costes sistema nanofiltración. Fuente: Yangali-Quintanilla *et al.* (2010).

<b>Estimación de Costes Sistema Nanofiltración (100 m<sup>3</sup>/h)</b>			
<b>Costes</b>	<b>Variables</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
<b>Coste Capital</b>	Preparaciones del emplazamiento (ej. edificaciones)	€	210949
	Pretratamiento de membrana	€	532396
	Elementos de membranas	€	95429
	Eléctrico	€	330655
	Sistema de bombeo y depósito	€	192533
	Sistema de tuberías de agua tratada y no tratada	€	87058
	Disposición de residuos (concentrado)	€	77013
	Postratamiento	€	56923
	Contingencia (20%)	€	316424
		<b>Coste Capital Total</b>	€/año
<b>Coste Operacional</b>	Energía de membranas	€/año	15821
	Energía del sistema de bombeo	€/año	46041
	Químicos	€/año	30136
	Reemplazo de membranas	€/año	7032
	Disposición de residuos (concentrado)	€/año	25113
	Mantenimiento y Coste laboral	€/año	77850
		<b>Coste Operacional Total</b>	€/año

**Tabla 4.** Estimación de costes sistema MAR. Fuente: (Xanke *et al.*, 2020).

<b>Estimación de Costes Sistema MAR (Capacidad de infiltración 1,000,000 m<sup>3</sup>/año)</b>			
<b>Costes</b>	<b>Variables</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
<b>Coste Capital</b>	Costes de construcción (con 0.80 US\$/m <sup>3</sup> + coste inicial de 42000 US\$)	€	91411
	Coste inicial construcción: 42000 US\$		
	Capacidad de almacenamiento (84000 m <sup>3</sup> ), con 10 ciclos de infiltración		
	Tamaño sistema MAR: 42000 m <sup>2</sup>		
	Costes de perforaciones (500 US\$/m)	€	130426
	Movilización inicial del emplazamiento 7000 US\$ Estudio de viabilidad	€	177855
	Costes de contingencia (10% de Costes capitales)	€	22184
		<b>Coste Capital Total</b>	€
<b>Coste Operacional</b>	Costes operacionales y de mantenimiento	€/año	31669
	Coste de extracción desde los pozos (para 1000000 m <sup>3</sup> )	€/año	175791
		<b>Coste Operacional Total</b>	€/año