



industriales
etsii

Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Industrial

Estudio de la problemática de los contaminantes emergentes en depuradoras de aguas residuales: tecnologías de tratamiento.

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE PROCESOS
SOSTENIBLES.



Universidad
Politécnica
de Cartagena

Autora: Nerea Martínez Garrido
Director: José Manuel Moreno Angosto
Codirector: José Antonio Fernández López

Cartagena, 8 de septiembre de 2021

AGRADECIMIENTOS.

A mi tutor, el doctor José Manuel Moreno Angosto, por su gran ayuda, compromiso y paciencia en todo momento.

A mis padres, Donato y Carmen, por ser siempre mi sostén.

A mi hermana, Natalia, y a mi pareja, Enrique, por transmitirme todo su apoyo incondicionalmente.

Índice.	Nº página/s
Resumen/Abstract	1-2
1. Introducción	3-5
2. Objetivos	6-7
3. Materiales y métodos	8-9
4. Resultados y discusión	10-31
4.1. Concepto de contaminantes emergentes	11-12
4.2. Tipos de contaminantes emergentes	12-15
4.3. Impactos ambientales de los contaminantes emergentes	15-17
4.3.1. Toxicidad de los contaminantes emergentes según su estructura química	15
4.3.2. Ecotoxicidad en el medio acuático	16-17
4.3.3. Impactos en la salud	17
4.4. Legislación para regular los contaminantes emergentes	17-18
4.5. Oxidación avanzada	18-22
4.6. Filtración avanzada	22-24
4.7. Ósmosis	24-26
4.8. Adsorción	26-28
4.9. Tratamiento biológico	28-31
5. Conclusiones	32-33
6. Bibliografía	34-40

Índice de figuras.	Nº página/s
Figura 1. Diferentes fuentes y vías de entrada de CE al ecosistema acuático	12
Figura 2. Relación entre RQ y CE para diferentes especies acuáticas	16-17
Figura 3. Tecnologías de oxidación avanzada	19
Figura 4. Técnicas de filtración avanzada	23
Figura 5. Diferencias entre la ósmosis directa e inversa	24
Figura 6. Representación de las diferentes isothermas de adsorción de materiales lignocelulósicos	27

Índice de tablas.	Nº página/s
Tabla 1. Bases de datos	11
Tabla 2. Efectos en la salud humana por parte de determinados CE	17
Tabla 3. Técnicas de oxidación avanzada para la degradación de CE	20-22
Tabla 4. Técnicas de filtración avanzada para la degradación de CE	23-24
Tabla 5. Técnicas de ósmosis para la degradación de CE	25-26
Tabla 6. Técnicas de adsorción para la degradación de CE	27-28
Tabla 7. Procesos biológicos para la degradación de CE	29-30

Resumen.

Objetivo: El objeto de este estudio es establecer qué técnica es más eficaz para disminuir la presencia de los contaminantes emergentes de las aguas residuales. En segundo lugar, estudiar el impacto que causan los contaminantes emergentes en la salud humana y en el medio ambiente.

Método: Para alcanzar los objetivos anteriores se realizó una búsqueda en las siguientes bases de datos: Scopus Pubmed, Google Scholar y Science Directs, filtrando aquellos artículos desde el año 2017 hasta la actualidad y que estuvieran dentro del ámbito medioambiental.

Resultados: Se recopilaron un total de 44 estudios acerca de las técnicas más frecuentemente usadas en la degradación de los contaminantes emergentes. Así mismo, se estudió la ecotoxicidad de los contaminantes emergentes en el medio acuático y sus efectos sobre la salud.

Conclusiones: los procesos de oxidación avanzada y la ósmosis son las técnicas más eficaces para eliminar los contaminantes emergentes, siendo los productos farmacéuticos los más frecuentes en aguas residuales, así como los más dañinos.

Palabras clave: emerging pollutants, emerging pollutant problem y treatment techniques for emerging pollutants.

Abstract.

Objective: The aim of this study is to establish which technique is most effective in reducing the presence of emerging pollutants in wastewater. Secondly, to study the impact of emerging pollutants on human health and the environment.

Method: To achieve the above objectives, a search was carried out in the following databases: Scopus Pubmed, Google Scholar and Science Directs, filtering those articles from 2017 to the present that were within the environmental field.

Results: A total of 44 studies were collected on the most frequently used techniques in the degradation of emerging pollutants. The ecotoxicity of emerging pollutants in the aquatic environment and their effects on health were also studied.

Conclusions: Advanced oxidation processes and osmosis are the most effective techniques for the removal of emerging pollutants, with pharmaceuticals being the most frequent in wastewater, as well as the most harmful.

Key words: emerging pollutants, emerging pollutant problem y treatment techniques for emerging pollutants.

1. Introducción.

El agua es un pilar fundamental para mantener la vida. Su empleo en diversas actividades como la agricultura, la fabricación de instalaciones sanitarias, etc. dan lugar a una cantidad elevada de microcontaminantes altamente peligrosos para el medio acuático. Algunos de los microcontaminantes encontrados proceden de compuestos farmacéuticamente activos (PhACs), productos de cuidado personal (PCP), sustancias químicas que alteran el sistema endocrino (EDC) y edulcorantes artificiales (ASW) entre otros. Estos compuestos se denominan contaminantes emergentes (CE) debido a la escasez de datos acerca de su toxicología. Además, estas sustancias son omnipresentes pudiendo acceder al medio a través de diferentes vías como la escorrentía agrícola, las aguas residuales hospitalarias, vertidos de efluentes industriales, así como de EDARs (1). Así pues, los avances en ciencia y tecnología han desarrollado una gran variedad de compuestos químicos que son utilizados en diferentes ámbitos como la industria, la fabricación de agentes tensoactivos, fármacos, plastificantes, plaguicidas, etc. y, como consecuencia, aumentan los compuestos contaminantes que se vierten a las aguas residuales. Estos productos, además de presentar características químicas muy dispares, son muy tóxicos para el medio ambiente y los organismos vivos (2).

Una de las particularidades de este tipo de compuestos es que se encuentran en el medio en concentraciones reducidas (ppm o ppt) lo cual dificulta su determinación analítica, al ser los métodos destinados a ello muy limitados. No obstante, sus bajas concentraciones no disminuyen sus efectos negativos, ya que su eliminación y/o transformación se ve equilibrada debido a la persistente incorporación al medio de este tipo de compuestos (2).

Una gran parte de los CE son capaces de permanecer durante largos períodos de tiempo en los ecosistemas a niveles que pueden ocasionar un elevado riesgo y, aunque se apliquen medidas con el propósito de disminuir la difusión de dichas sustancias contaminantes, suponen un riesgo elevado para la salud de las personas y el medio ambiente (3).

Las fuentes de contaminación al medio ambiente acuático, por parte de los CE, provienen de los efluentes de las plantas depuradoras de aguas residuales. Las principales fuentes son de origen industrial, ya que muchos compuestos industriales no se encuentran regulados y son liberados directamente al agua (4).

Los efectos ocasionados por la exposición a CE pueden dar lugar a impactos nocivos en la salud humana y en animales. Asimismo, en el agua se pueden encontrar diferentes contaminantes que pueden ejercer un efecto sinérgico. Algunos ejemplos sinérgicos podrían ser (4):

- Interacción entre metales y productos farmacéuticos ocasionando un incremento en el contenido en bacterias con gen resistente a antibióticos en aguas con elevados niveles de cobre y ampicilina.
- Interacción entre fármacos como la carbamazepina y el ácido clofbrico, antiepiléptico y hipolipemiente respectivamente.

Los CE son muy resistentes a la degradación y su peligrosidad radica en los siguientes aspectos (5):

- Son producidos y consumidos de forma masiva, por lo que siempre se encuentran en las aguas en una concentración elevada.
- Se pueden acumular fácilmente en los organismos (bioacumulación, biomagnificación).
- Pueden ocasionar efectos tóxicos en los organismos.
- Las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR) no presentan las tecnologías de tratamiento convenientes para degradar los CE, puesto que no están diseñadas con este objetivo. De este modo, cuando éstos lleguen a las EDAR se acabarán vertiendo inevitablemente al medio acuático, pudiendo llegar a las aguas de consumo humano.

Con el objetivo de disminuir su presencia en el medio se han combinado diferentes tratamientos como son la oxidación avanzada, procesos de separación por membranas, tratamiento de ósmosis inversa, entre otros. No obstante, a pesar de que estos tratamientos han sido eficaces a la hora de eliminar, en la medida de lo posible, los CE el elevado consumo de energía y el alto coste de dichos tratamientos constituyen su principal problema (1).

Finalmente, el escaso conocimiento acerca de este tipo de contaminantes ha motivado el desarrollo de diferentes líneas de análisis en organismos como la OMS o la Comisión Europea, con el fin de observar los efectos adversos de los contaminantes emergentes y restringir su presencia en las aguas (6).

2. Objetivos.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, en el que queda claro la importancia a nivel social, económico y sanitario, se plantean los siguientes objetivos:

- Como objetivo principal:
 - Analizar los diferentes tipos de contaminantes emergentes.

- Como objetivos secundarios:
 - Estudiar el impacto que causan en el medio ambiente, así como en la población humana los contaminantes emergentes.
 - Determinar la técnica más eficaz para eliminar los contaminantes emergentes.
 - Examinar la legislación que regula los contaminantes emergentes.

3. Materiales y métodos.

Para esta revisión se han tratado diferentes textos, fuentes y documentos de carácter científico, además de otros de carácter legislativo, empleando distintos criterios de búsqueda.

En primer lugar, se escogieron estudios en los que los contaminantes emergentes procedieran exclusivamente de aguas residuales. Tan sólo se aceptaron aquellos estudios en los que los protagonistas fueran contaminantes emergentes, no otros. Además, los estudios seleccionados se realizaron a escala real, piloto o de laboratorio. Por otro lado, se seleccionaron aquellos estudios que incluían las técnicas más novedosas para eliminar los contaminantes emergentes.

Finalmente, la búsqueda abarcó artículos muy recientes, mayormente de entre los años 2017 hasta la actualidad, con la excepción de algunos de años anteriores, concretamente de los años 2006, 2007 y 2009, que también fueron seleccionados puesto que cumplían con los objetivos del trabajo.

Las bases de datos empleadas para realizar esta revisión fueron las siguientes: Scopus, Pubmed, Google Scholar y Science Directs. Aplicando las siguientes palabras clave *“emerging pollutants, emerging pollutant problem y treatment techniques for emerging pollutants”*, así como filtros donde se pueden incluir el rango de años y el ámbito medioambiental.

4. Resultados y discusión.

Aplicando la metodología explicada anteriormente se han obtenido los siguientes resultados:

Tabla 1. Bases de datos.

Base de datos	Nº de artículos
Scopus	50
Pubmed	50
Google Scholar	75
Science direct	38

De los datos anteriores se obtuvieron un total de 213 artículos, de los cuales solamente fueron seleccionados para esta revisión un total de 44 artículos ya que se centraban en el ámbito medioambiental.

En los próximos apartados se tratarán de manera más extensa algunas generalidades sobre los CE, es decir, qué son, sus tipos y la legislación por la que son regulados. Asimismo, también se describen las diversas técnicas que se han encontrado para su eliminación, basando su eficacia en diferentes estudios.

4.1. Concepto de contaminantes emergentes.

Los CE son compuestos de diferente origen y naturaleza química, que se pueden encontrar en el medio ambiente. Son un tipo de compuestos que no se consideran relevantes en cuanto a su disposición y/o concentración, de modo que pasan desapercibidos. Sin embargo, ha aumentado la investigación acerca de estos compuestos en los últimos años, con el fin de reducir los efectos nocivos que generan, así como los diferentes efectos adversos sobre la salud humana (2).

Estos contaminantes se introducen en el ecosistema por medio de fuentes puntuales como son efluentes hospitalarios, vertidos industriales, efluentes de EDAR, o bien por medio de fuentes no puntuales, como son escorrentía de captación, deposición atmosférica, vertedero de residuos, entre otros. Tras la ingesta, este tipo de contaminantes se metabolizan, no obstante, para la mayor parte de los compuestos esta metabolización no ocurre de forma completa. Por tanto, la fracción de estos compuestos que no ha sido metabolizada se excreta por medio de las heces y la orina, llegando así a las aguas residuales (1). En la Figura 1 se resumen las vías de entrada de los CE en el medio acuático.

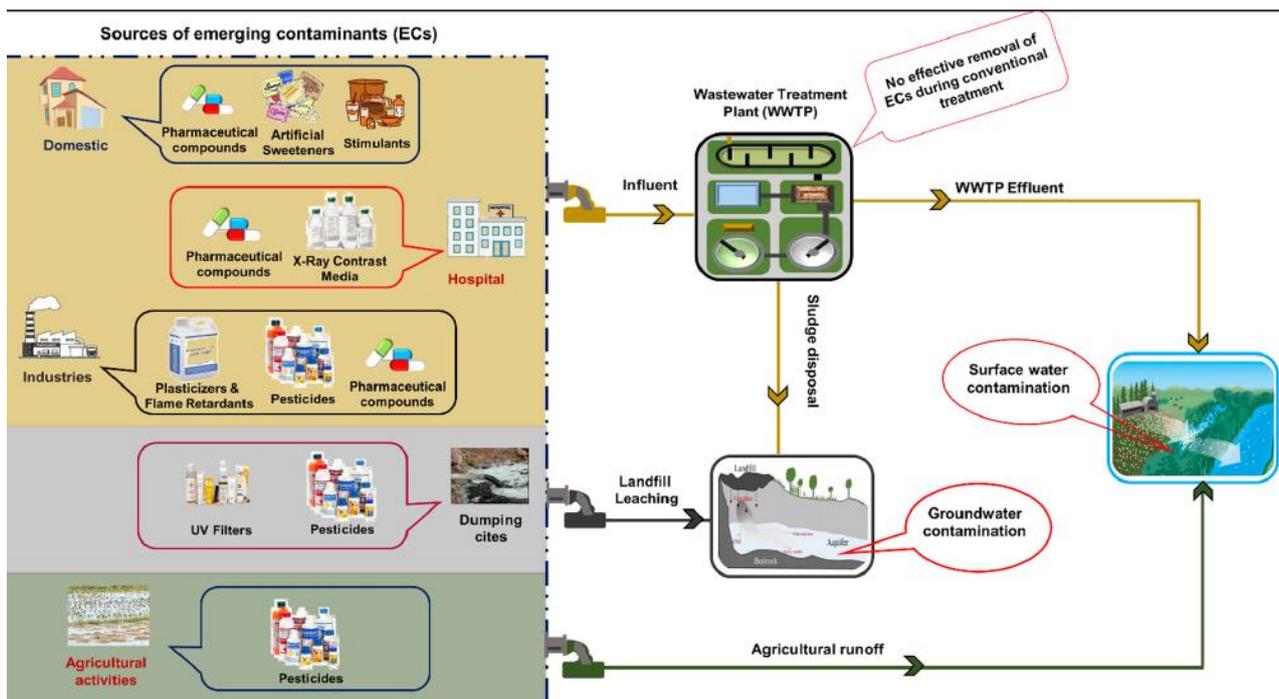


Figura 1. Diferentes fuentes y vías de entrada de CE al ecosistema acuático (1).

Por otro lado, el escaso conocimiento acerca de esos compuestos es la causa por la cual la gran mayoría de ellos no se encuentran regularizados en determinados países. No obstante, la Unión Europea establece un listado de diferentes tipos de sustancias bajo control, con el fin de conocer cuáles son sus consecuencias y qué límite se deberían de establecer en cuanto a vertidos y calidad de aguas (2).

4.2. Tipos de contaminantes emergentes.

Los principales CE encontrados en las aguas se dividen en cuatro grupos (4):

1. Productos farmacéuticos (PhACs): se incluyen los antibióticos tanto de uso humano como veterinario, medicamentos y hormonas sexuales y esteroideas. Entre todos los productos farmacéuticos más empleados por la población, existen 3 (antimicrobianos, y analgésicos y antihipertensivos) que son los más empleados y terminan descargados al medio acuático a través del agua residual, por tanto, se podría decir que las plantas de tratamiento son las vías de entrada de estos productos. Así, según las características fisicoquímicas de estos productos, sus metabolitos y sus productos de degradación pueden llegar hasta las aguas subterráneas contaminándolas, e incluso, quedar retenidos en el suelo afectando gravemente a los ecosistemas por medio de la cadena trófica. Cabe destacar la preocupación sobre la presencia del ibuprofeno que ha sido encontrado en aguas potables en los últimos años.

2. Productos para el cuidado personal (PCPs): se incluyen sustancias químicas que podemos hallar en productos de consumo habitual, como repelentes de insectos, medicamentos para la picazón, filtros UV, endulzantes artificiales, agentes de protección solar, fungicidas, cosméticos, perfumes, así como repelente para insectos. Su problema radica en que esos productos son empleados directamente sobre el cuerpo humano y, generalmente, en concentraciones más elevadas de lo normal, por lo tanto, son introducidos en el medio ambiente en altas concentraciones.

Además, integran este grupo los surfactantes, también conocidos como tensioactivos que son productos químicos muy utilizados en el sector industrial. Se encuentran destinados a la fabricación de pasta de papel, cemento, celulosa, en agricultura, en la fabricación de gomas y barnices y en industria textil, entre otros. Además, tienen la particularidad de poder funcionar como humectantes, dispersantes, plastificantes espesantes, emulsionantes, detergentes, solubilizantes y espumantes. Dentro de los tensioactivos se pueden distinguir 4 grupos:

1. Tensioactivos aniónicos: muy empleados en el detergente en polvo, destinado al lavado de ropa, así como en detergentes líquidos para el lavavajillas y detergentes sintéticos.
2. Tensioactivos catiónicos: se encuentran en productos bactericidas, aunque son más caros y, por tanto, más difíciles de producir.
3. Tensioactivos no iónicos: son más naturales y presentan menor grado de toxicidad.
4. Tensioactivos anfóteros: se emplean en champús para el pelo.

El motivo por el cual estos compuestos son considerados como una amenaza para el medio ambiente y la vida de las personas residen que en pasan directamente al ambiente a través de las plantas de tratamiento de aguas residuales.

3. Disruptores endocrinos (EDCs): se incluyen hormonas, plastificantes, pesticidas y estimulantes, pudiendo producir efectos desfavorables en el sistema endocrino. En cuanto a los plaguicidas, se trata de sustancias destinadas mitigar, destruir o prevenir las plagas. Debido a que su empleo se remonta hacia décadas pasadas, se conocen en profundidad sus concentraciones, así como su destino en los sistemas acuáticos. La

información y el conocimiento que se tiene sobre ellos ha permitido que exista una regulación en cuanto a su empleo. Sin embargo, recientemente se ha incrementado la curiosidad acerca de sus productos de degradación, puesto que pueden hallarse en concentraciones superiores a los pesticidas y ser más tóxicos. Los plaguicidas están formados por los compuestos organofosforados (fentión, diazinón, ect), los derivados de la urea, carbamatos y los compuestos organoclorados (DDT, dieldrín, lindano y heptacloro).

Algunos pesticidas como el toxafeno, endrín, clordano, aldrín, lindano, dieldrín y DDT son altamente tóxicos y, por ello, se encuentran reflejados en el Anexo A del Convenio de Estocolmo sobre Compuestos Orgánicos Persistentes de 2001 (7). Según éste, está totalmente prohibida la producción, uso e importación de este tipo de compuestos, ya que son altamente persistentes en el medio, así como bioacumulables, pudiendo desencadenar la aparición de enfermedades como defectos congénitos y cáncer y en animales y personas. Por otro lado, la mayor fuente de exposición por las que estos pesticidas llegan a los seres humanos mediante la alimentación.

También integran a los disruptores endocrinos, los llamados retardantes de llama y fuego que comprenden gran diversidad de sustancias que se aplican a diferentes productos como son plásticos, aparatos electrónicos, tejidos, muebles, transporte y pinturas con el fin de reducir o evitar la propagación del fuego. La razón por la cual su presencia ocasiona problemas es que no son eliminados totalmente en las EDARs, por lo que presentan una gran ubicuidad en el medio, pasando a la cadena trófica y ocasionando efectos adversos en la salud, pudiendo desencadenar incluso cáncer.

4. Otros: en este último grupo se incluye dos tipos de productos que no encajan con la clasificación de los grupos anteriores, y son las drogas ilícitas y los productos para el tratamiento de aguas. Las drogas ilícitas se incluyen dentro de los contaminantes emergentes, ya que después de su consumo, a través de su excreción mediante la saliva o el sudor, los metabolitos de estas drogas entran en las aguas residuales. La problemática reside en que, tanto los precursores como sus productos de degradación no suelen ser eliminados a través de los tratamientos pertinentes en las EDARs, ya que sus costes son muy elevados. Por tanto, muchos de estos compuestos suelen acabar en el agua potable y, aunque las concentraciones en las que se encuentran son bajas (nanogramos/litro), pueden causar efectos nocivos en la fauna y la salud humana.

Por otro lado, en cuanto a los productos para el tratamiento de aguas tienen el objetivo de minimizar el riesgo de infecciones contagiosas que pueden suponer un peligro para la salud de la población. No obstante, su puesta en marcha genera subproductos indeseables que se forman, generalmente, cuando los desinfectantes empleados en los procesos interactúan con la materia orgánica, formando los trihalometanos. Un ejemplo sería el cloro, comúnmente empleado en la desinfección del agua, ya que es asequible y eficaz a la hora de eliminar patógenos. El cloro, por tanto, empleado como desinfectante puede formar productos como cloroformo, bromodiclorometano, clorodibromometano o bromoformo entre otros.

4.3. Impactos ambientales de los contaminantes emergentes.

Los CE pueden introducirse en la cadena alimentaria a través de diferentes vías, como bien reflejaba la Figura 1, causando la biomagnificación. Algunas veces, esta introducción a la cadena alimentaria puede darse si los humanos o los animales beben directamente de agua contaminada. La elevada exposición a CE puede provocar tanto efectos adversos en el ecosistema acuático, como alteraciones a nivel metabólico y hormonal en animales y humanos (1).

4.3.1. Toxicidad de los contaminantes emergentes según su estructura química.

La estructura química, el grado de absorción y la capacidad de desintoxicación son los factores que determinan la toxicidad de un compuesto. Así mismo, la toxicidad de un compuesto puede valorarse en función de la capacidad de reacción de sus grupos funcionales y de sus productos de descomposición. Las numerosas investigaciones que se han realizado determinan que la toxicidad de los CE está íntimamente ligada a su estructura química. Por su parte, los CE orgánicos se descomponen en CO y CO₂. Los que presentan en su composición nitrógeno, como paracetamol, ciprofloxacina, eritromicina, norfloxacina, tetraciclina, sacarina, iohexol, cafeína o malatión, se descomponen en óxidos de nitrógeno dando lugar a la liberación de humos tóxicos. Los compuestos que presentan flúor, como la ciprofloxacina o norfloxacina, liberan gas fluoruro de hidrógeno en su descomposición (1).

Por otro lado, los compuestos fenólicos son capaces de causar neurodegeneración y envejecimiento, así como algunos plaguicidas como el malatión, que actúan como inhibidores de la colinesterasa (enzima que realiza la transmisión nerviosa en las uniones neuromusculares) (1).

4.3.2. Ecotoxicidad en el medio acuático.

Para evaluar la ecotoxicidad de los contaminantes emergentes en el medio acuático se recurre a los bioensayos de algas y otras bacterias fotosintéticas. Una forma de determinar ese nivel de toxicidad ambiental es mediante la RQ, que se puede entender como la relación entre la concentración ambiental medida (MEC) de un CE y la concentración prevista sin efecto alguno ($PNEC_{aq}$) para las especies acuáticas. La ecuación que refleja la relación anterior se expresa a continuación (1):

$$RQ = \frac{MEC}{PNEC_{aq}}$$

donde MEC hace referencia a la media de las mayores concentraciones de un determinado compuesto encontrado en las aguas residuales y $PNEC_{aq}$, se obtuvo al dividir la EC_{50} (concentración requerida de un fármaco que produce el 50% del efecto máximo de ese compuesto) entre un factor de evaluación, como podría ser 1000 (1).

Partiendo de diferentes investigaciones, se ha realizado una clasificación del riesgo que suponen los CE basándonos en la ecuación anterior. Según estas investigaciones, se obtienen los siguientes rangos (1):

- $RQ \geq 1$: supone un riesgo elevado para la vida acuática.
- $0,1 > RQ < 1$: supone un riesgo medio para la vida acuática.
- $RQ < 0,1$: supone un riesgo bajo para la vida acuática.

La Figura 2 señala la relación entre RQ y determinados CE para diferentes especies acuáticas.

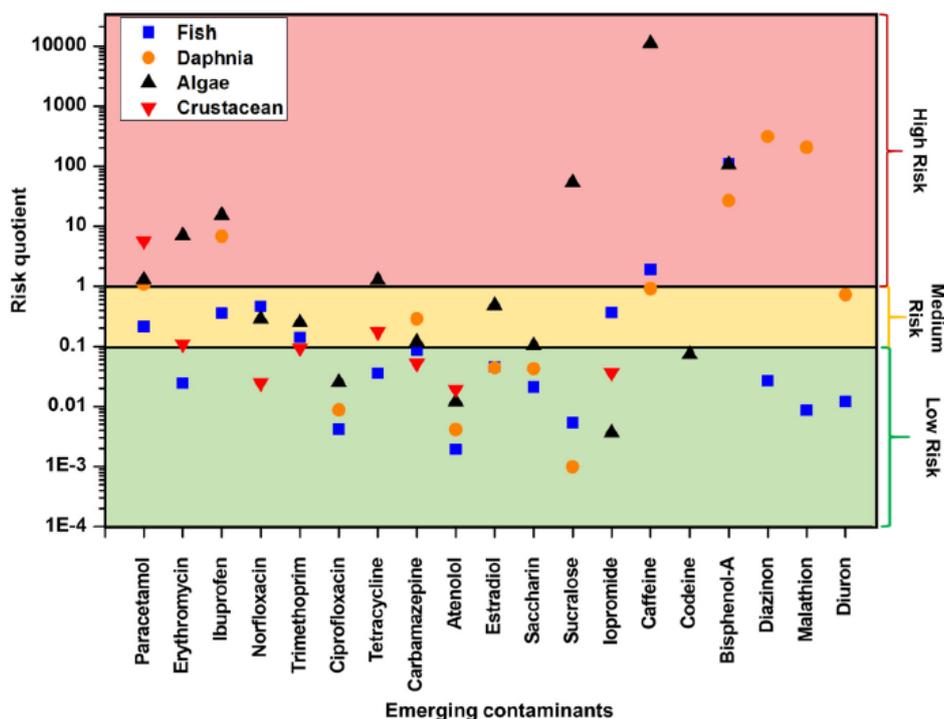


Figura 2. Relación entre RQ y CE para diferentes especies acuáticas (1).

En la Figura 2 se puede observar que, de todos los CE que se han seleccionado, el bisfenol A es que el que mayor riesgo presenta hacia las algas, las dafnias (mayormente conocidas como pulgas de agua) y los peces. Otros autores investigaron la toxicidad de los PhAC y PCP hacia esas especies acuática y se observó que la ciprofloxacina, la eritromicina, el triclosán y el diclofenaco mostraban el riesgo potencial más significativo. Asimismo, también se observó que el ibuprofeno presentaba un riesgo muy elevado contra las dafnias y las algas (1).

4.3.3. Impactos en la salud.

La exposición a bajas concentraciones de CE de forma prolongada es capaz de provocar anomalías en los seres humanos, afectando gravemente a su salud. La Tabla 2 recoge los efectos sobre la salud que pueden suponer por la exposición a determinados CE.

Tabla 2. Efectos en la salud humana por parte de determinados CE (1).

Tipo de CE	Efecto sobre la salud humana
Agentes antimicrobianos	Reducción de la acción curativa de los antibióticos contra patógenos humanos y animales
Compuestos estrogénicos (17 β -estradiol)	Bioacumulación en los organismos humanos
Carbamazepina y atenolol	Dificultad en el crecimiento de células madre embrionarias humanas
ASW (sacarina y sucralosa)	Enfermedades inflamatorias intestinales
Retardantes de llama	Inhibición del crecimiento celular y síntesis proteica, deteniendo el ciclo celular
TnBP (tributilfosfato)	Inhibición de la colinesterasa
Benzofenonas	Alteración del funcionamiento del eje HPG (hipotálamo-hipofisario-gonadal)
Cafeína	Ansiedad, trastornos de pánico, así como cáncer de endometrio, hepatocelular y colorrectal

No obstante, los estudios acerca de los efectos toxicológicos de los CE sobre la salud humana son bastante limitados, por lo que se requieren más directrices que propulsen las investigaciones para el estudio de estos efectos.

4.4. Legislación para regular los contaminantes emergentes.

Actualmente, se pueden encontrar multitud de sustancias o compuestos que presentan cierta peligrosidad para el medio ambiente y la salud humana, de modo que deben ser regulados con el objeto de mitigar sus efectos adversos (4).

A partir del año 2000 en Europa, se han promulgado ciertas directrices con el fin de implantar nuevas medidas sobre la política del agua, como es la Directiva 2000/60/CE. Esta Directiva supuso un gran avance en el ámbito político que incumbe la protección del agua ya que, estableció una clasificación para identificar aquellas sustancias preferentes que podrían suponer un peligro para el medio acuático. Asimismo, implantó los Estándares de Calidad Ambiental de la Unión Europea, los cuales se entienden como la concentración de un contaminante en agua, sedimentos o biota que no se debe exceder para proteger el medio ambiente y la salud humana (4).

En el año 2001, la Decisión 2455/2001/EC implantó la primera lista de sustancias prioritarias, la cual incluía a 33 sustancias que debían ser controladas y vigiladas a nivel comunitario. Posteriormente, la Directiva 2008/105/EC añadió a esta lista de sustancias prioritarias 8 sustancias más que podrían ser contaminantes. Pasados 5 años, la Directiva 2013/39/UE realizó una revisión y seguimiento de 53 sustancias prioritarias, 49 sustancias orgánicas y 4 metales (cadmio, plomo, mercurio y níquel). Sin embargo, no fue hasta 2015 cuando, a partir de la Decisión 2015/495/UE, se estableció el seguimiento de los llamados contaminantes de preocupación emergente, contaminantes no regulados y que no presentan Estándares de Calidad Ambiental claramente definidos. No obstante, actualmente se están estudiando diferentes datos acerca de su monitoreo, con el objetivo de poder apoyar su reglamentación de cara al futuro (4).

A continuación, se describen las técnicas encontradas para la eliminación de los CE en las EDARs.

4.5. Oxidación avanzada.

El fundamento de esta técnica reside en la oxidación química de los compuestos que se quieren eliminar. Mediante la formación de radicales hidroxilos se consigue deteriorar prácticamente cualquier molécula a CO₂. Estos radicales hidroxilos presentan un potencial de oxidación mucho mayor que el de otros oxidantes tradicionales (8).

Actualmente esta técnica se está investigando en profundidad y uno de sus resultados es el empleo de los perácidos para la eliminación de los CE del agua. Los métodos basados en perácidos presentan la ventaja de que dan lugar a la formación de productos de oxidación menos nocivos y más biodegradables. Por su parte, los procesos basados

en perácidos requieren el empleo de activadores como la radiación UV o los óxidos metálicos. El perácido más relevante para las aguas residuales es el perácido acético, el cual consiste en un líquido incoloro con un olor característico muy similar al del vinagre. Éste es resistente al aluminio puro, al acero inoxidable y al hierro estañado, sin embargo, el acero, el hierro galvanizado, el cobre, el latón y el bronce son compuestos sensibles a la corrosión si se exponen a este perácido. En la Tabla 2 se puede observar un estudio reciente que prueba la eficacia de esta técnica para la degradación de determinados CE (9).

Sin embargo, la aplicación de esta técnica en las EDARs para la eliminación de CE es limitada, ya que presenta algunos inconvenientes como las reacciones selectivas entre los CE y el ozono, una oxidación lenta e inadecuada y una baja solubilidad y estabilidad (10). La Figura 3 muestra las diferentes tecnologías que comprende la oxidación avanzada.

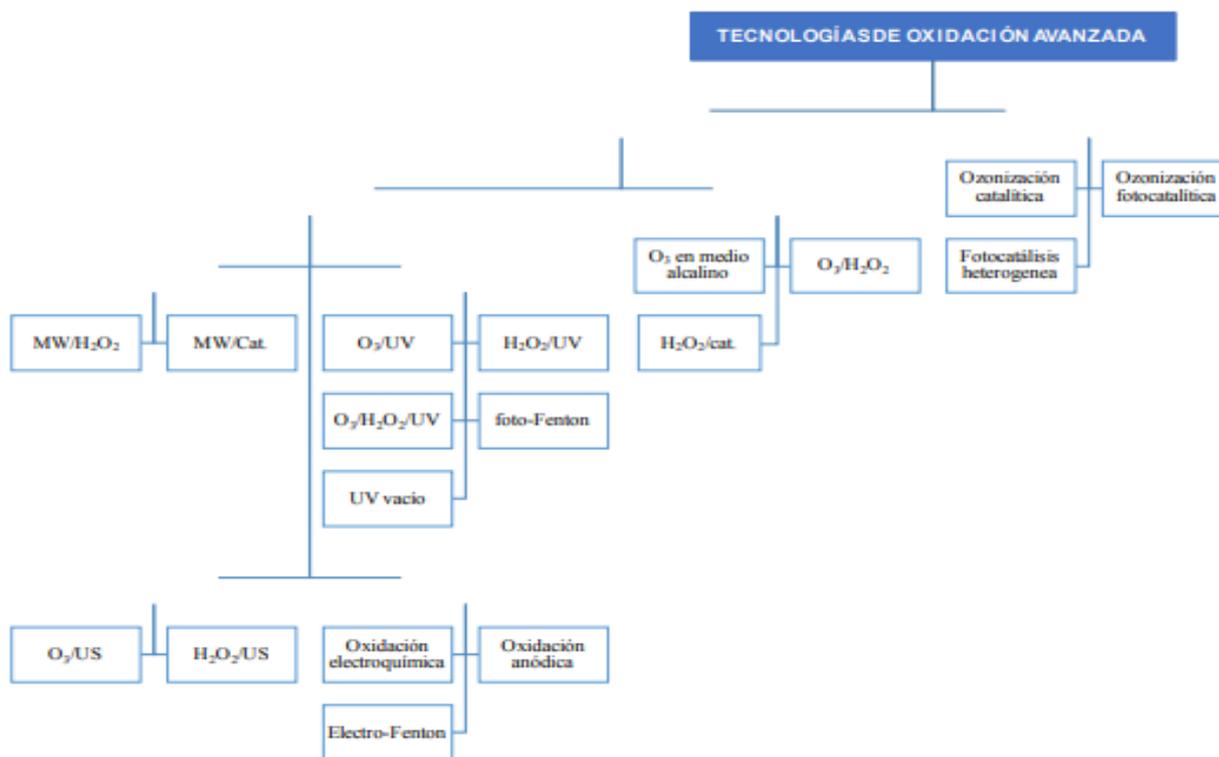


Figura 3. Tecnologías de oxidación avanzada (11).

La Tabla 3 recoge las técnicas de oxidación avanzada para la degradación de CE.

Tabla 3. Técnicas de oxidación avanzada para la degradación de CE.

Contaminantes	Tratamiento	Resultados	Bibliografía
32 compuestos, donde se incluyen productos farmacéuticos y EDCs.	Fotocatálisis UV/TiO ₂ . Escala piloto.	Del total de compuestos que participaron en el estudio, 11 de ellos se degradaron fácilmente, incluyendo EDCs como estrona, estradiol, bisfenol A, y medicamentos como diclofenaco, triclosán y naproxeno. No obstante, los retardantes de llama tuvieron una eliminación inferior al 50%.	(12)
33 compuestos, donde se incluyen productos farmacéuticos y EDCs.	Fotocatálisis de membrana (MPR). Escala piloto.	Del total de compuestos que participaron en el estudio, 11 de ellos se degradaron fácilmente una vez pasados 20 minutos desde el inicio del tratamiento. No obstante, otros 7 redujeron su tasa de degradación a un 95%, una vez 55 minutos desde el comienzo del tratamiento, incluyendo EDCs fenólicos y triclosán.	(13)
29 compuestos: productos farmacéuticos y EDCs.	Ozonización, filtración y lodos activados. Escala real.	La tasa de degradación fue muy elevada, superior al 90%. La combinación de los tres tratamientos realizados supuso una reducción significativa del riesgo. No obstante, algunos fármacos sólo consiguieron reducir su presencia en un 69%.	(14)
Ácido clofibrico, triclosán y carbamazepina.	Fotocatálisis UV/TiO ₂ + polvo de cáscara de coco. Escala piloto.	La tasa de degradación cambia según diferentes factores. Sin embargo, se observó como ésta incrementó con el aumento de la intensidad luminosa, de la concentración de TCNSP (catalizador UV/TiO ₂ + polvo de cáscara de coco), así como con la acumulación de O ₂ , obteniéndose una tasa de degradación superior al 90% para los tres compuestos.	(15)
Bisfenol A y carbamazepina.	Fotocatálisis de nanotubos de pared múltiple y	Se obtuvo una tasa de degradación de los compuestos inferior al 50%. Además, los metabolitos	(16)

	nanocompuestos de TiO ₂ /SiO ₂ . Escala piloto.	resultantes de la descomposición de los productos se clasificaron como productos de baja toxicidad.	
30 compuestos de PPCPs (productos farmacéuticos y de higiene personal).	Eliminación de material orgánico + oxidación avanzada con O ₃ /H ₂ O ₂ , UV/H ₂ O ₂ o UV/O ₃ Escala piloto.	Se obtuvo una tasa de degradación superior al 60% para la gran mayoría de los contaminantes, a excepción de sulfacloropiridazina y salbutamol.	(17)
Ibuprofeno.	Fotocatálisis UV/H ₂ O ₂ y UV/S ₂ O ₂ ⁸ . Escala real.	Ambos tratamientos pueden eliminar la presencia del ibuprofeno. Sin embargo, el proceso UV/S ₂ O ₂ ⁸ presentó una tasa de eliminación superior al 90% en aguas residuales tratadas.	(18)
92 productos, donde se incluyen productos farmacéuticos y EDCs.	Foto-Fenton. Escala de laboratorio.	De este tratamiento se obtuvo que el proceso aplicado es eficaz a la hora de eliminar contaminantes emergentes, a pH neutro y empleando un modo de flujo continuo de Fe (III), utilizando EDDS (ácido etilendiamina-N, N'-disuccínico) como fuente de hierro. Se obtuvieron tasas de eliminación entre 60-80% con unos tiempos de retención entre 15-40 minutos.	(19), (20) y (21)
Ácido clofibrico e ibuprofeno.	Ozonización. Escala piloto.	Se realizaron dos experimentos para ambos compuestos. Por un lado, en el experimento I se empleó un proceso de oxidación con ozono usando como fuente de alimentación un generador de ozono de aire ambiental. Por otro lado, en el experimento II se empleó oxígeno concentrado como alimentación al generador de ozono. En el experimento I se consiguió una tasa de degradación de los compuestos del 90% a los 10 minutos del tratamiento. Sin embargo, en el experimento II fue suficiente con 2,5	(22)

		minutos para obtener una tasa de degradación del 99%.	
6 productos farmacéuticos: bezafibrato, diclofenaco, ácido clofíbrico, ibuprofeno, naproxeno y carbamazepina.	Oxidación con ácido acético activado por UV.	Se emplearon dos métodos diferentes. El primero con la adición del ácido acético sin irradiación UV, y el segundo con la adición del mismo compuesto y con irradiación UV. Mientras que con el primer método solamente se degradaron pequeñas cantidades de los compuestos farmacéuticos, con el segundo se llegó a conseguir una tasa de eliminación del 93,5%.	(23)

Como se muestra en la Tabla 3, los estudios más antiguos (años 2007 y 2009) muestran que la tasa de eliminación es bastante inferior si la comparamos con estudios de años más recientes. Ello se puede deber a la mayor investigación acerca de las técnicas de degradación de CE a lo largo de esos años. La mayoría de los compuestos sobre los que se desempeñó esta técnica de eliminación de contaminantes emergentes, fueron los productos farmacéuticos y los EDCs, siendo los PPCPs investigados en menor medida con esta técnica.

4.6. Filtración avanzada.

La filtración avanzada engloba las técnicas de microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa. No obstante, la ultrafiltración y la nanofiltración son las técnicas más empleadas la recuperación de aguas residuales. A continuación, se resume brevemente en qué consisten cada una de estas técnicas (8):

- **Microfiltración:** se emplea para separar partículas muy finas (0,1-10 μm) de un líquido por medio de una membrana. Por tanto, puede eliminar sólidos en suspensión, bacterias y otras impurezas.
- **Ultrafiltración:** se emplea para separar partículas con un tamaño de radio entre 0,01-0,1 μm de un líquido por medio de una membrana. Por tanto, puede separar sales, proteínas y otras impurezas.
- **Nanofiltración:** se emplea para separa partículas con un tamaño comprendido entre 0,1-0,001 μm de un líquido por medio de una membrana. Por tanto, puede eliminar virus, pesticidas y herbicidas.

- Ósmosis inversa: se emplea para separar partículas con un tamaño inferior a 0,001 μm de un líquido por medio de una membrana. Por tanto, puede separar iones metálicos, así como de eliminar de forma completa las sales en disolución.

La Figura 4 recoge las cuatro técnicas descritas anteriormente.

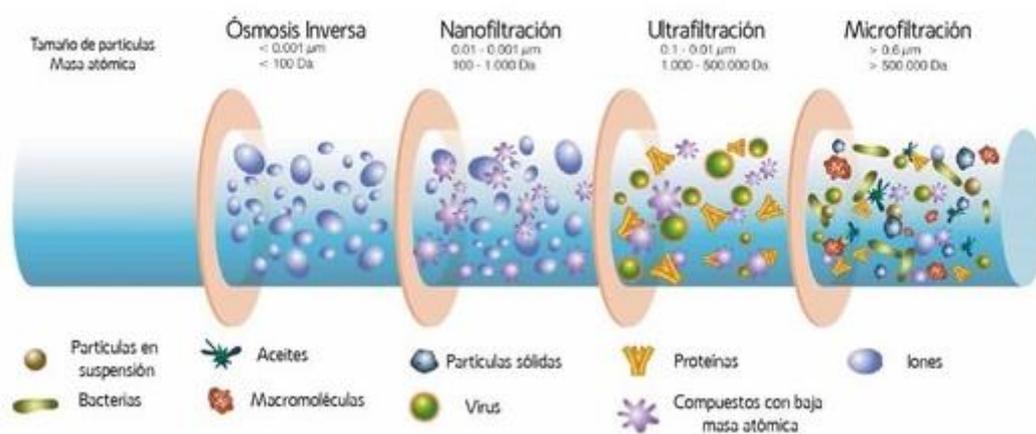


Figura 4. Técnicas de filtración avanzada (24).

El mecanismo de filtración avanzada a través de membranas activas consiste en la expansión de partículas de agua por medio de la capa activa de la membrana. La Tabla 3 recoge los diferentes procesos de filtración avanzada para eliminar los CE (3).

Tabla 4. Técnicas de filtración avanzada para la degradación de CE.

Contaminantes	Tratamiento	Resultados	Bibliografía
Acetaminofén, metoprolol, cafeína, antipirina, sulfametoxazol, flumequina, ketorolac, atrazina, isoproturon, 2-hidroxi-bifenil y diclofenaco.	Ultrafiltración micelarmente mejorada. Escala de laboratorio.	Se obtuvo una tasa de retención superior al 90% para algunos compuestos como 2-hidroxi-bifenil, ketorolac, sulfametoxazol y diclofenaco. Para otros, como atrazina, isoproturon y flumequina ésta fue del 60-70%. Y finalmente, para acetaminofén, metoprolol, cafeína y antipirina, fue inferior al 20%.	(25)
Cafeína, teobromina, teofilina, amoxicilina y penicilina G.	Nanofiltración en membrana. Planta piloto a escala real.	La nanofiltración en membrana fue eficaz a la hora de eliminar todos los contaminantes, con una tasa de retención superior al 90%.	(26)

27 compuestos: productos farmacéuticos y EDCs.	Nanofiltración y ultrafiltración en membranas. Escala de laboratorio.	Para la gran mayoría de compuestos, la tasa de retención a través de la nanofiltración fue superior a la de ultrafiltración, excepto para los siguientes compuestos: triclosán, oxibenzona, estrona, progesterona, eritromicina.	(27) y (28)
Difenhidramina y mebeverina.	Nanofiltración en membrana con adición de quitosano como anti-incrustante. Escala de laboratorio.	Se obtuvo una tasa de retención superior al 97% para los contaminantes evaluados.	(29)

De los cuatro estudios seleccionados, se observa que los procesos más frecuentemente empleados para la degradación de los CE fueron la nanofiltración y la ultrafiltración. Así mismo, fueron investigados bajo esta técnica multitud de productos farmacéuticos y algunos EDCs. Para la gran mayoría de compuestos, la tasa de eliminación fue superior al 90%, lo cual hace de la filtración avanzada una técnica muy eficaz a la hora de eliminar contaminantes emergentes.

4.7. Ósmosis.

La ósmosis (directa e inversa) consiste en la difusión de dos disoluciones con diferente grado de concentración de soluto, dispuestas a ambos lados de una membrana semipermeable, que deja pasar solo el disolvente. Esta técnica puede degradar una gran cantidad de microcontaminantes gracias a las diferencias de tamaño y a las interacciones entre cargas, dipolar e hidrofóbica (8). La Figura 5 muestra las diferencias entre la ósmosis directa e inversa.

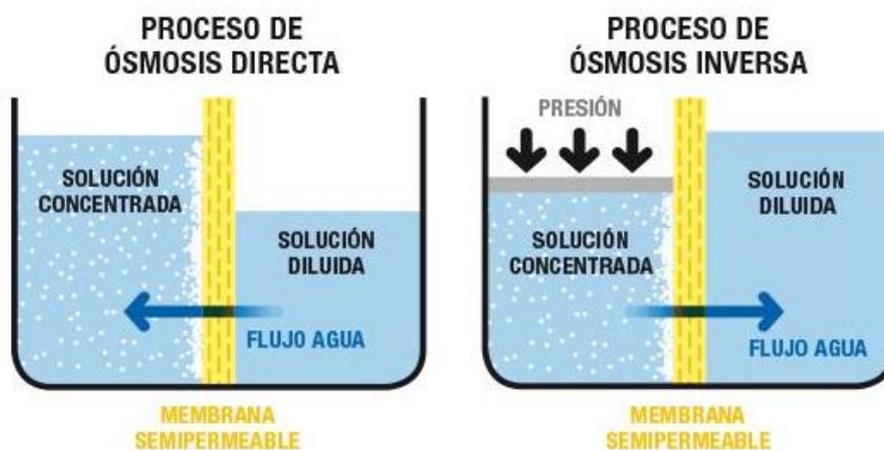


Figura 5. Diferencias entre la ósmosis directa e inversa (30).

La Tabla 5 recoge los diferentes procesos de ósmosis para eliminar los CE de las aguas residuales.

Tabla 5. Técnicas de ósmosis para la degradación de CE.

Contaminantes	Tratamiento	Resultados	Bibliografía
Ibuprofeno, diclofenaco, naproxeno y carbamazepina.	Membranas de ósmosis directa. TFC y CTA. Escala de laboratorio.	Por un lado, las TFC obtuvieron una tasa de retención superior al 94% de los productos farmacéuticos estudiados. Por otro lado, las CTA presentaron una tasa de retención del 95% para carbamazepina, 93% para ibuprofeno y naproxeno y 99% para diclofenaco.	(31)
Cafeína, teobromina, teofilina, amoxicilina y penicilina G.	Membranas de ósmosis inversa. Escala real.	En este estudio se consiguió eliminar el 100% de los contaminantes.	(32)
Ibuprofeno, dipirona, cafeína, diclofenaco y acetaminofén.	Membrana de ósmosis inversa acoplada a membrana de nanofiltración. Escala de laboratorio.	Se observó que la tasa de retención de este mecanismo depende de las características de los compuestos a suprimir, siendo ésta superior al 88%.	(33)
Bifenol A, nonilfenol, ácido salicílico, ácido clofíbrico, gemfibrozil, diclofenaco, ibuprofeno, ketoprofeno, naproxeno, acetaminofén, primidona, carbamazepina y fenitoína.	Membrana de ósmosis inversa acoplada a microfiltración. Escala real.	La tasa de retención fue superior al 97% para los compuestos estudiados.	(34)
20 productos farmacéuticos: drogas psiquiátricas, antiinflamatorios y β -bloqueadores.	Sistema de membrana MBR y ósmosis inversa. Escala piloto.	La unión de ambos tratamientos supuso una tasa de eliminación superior al 99% para todos los contaminantes.	(35)
Cafeína, N-acetil-4-aminoantipirina (4-AAA),	Sistema integrado de ultrafiltración, ósmosis inversa y electro oxidación.	Los tres procesos empleados obtuvieron tasas diferentes de retención. Por un lado, la ultrafiltración presentó una	(36)

gemfibrozil, naproxeno, hidroclorotiazida, atenolol, furosemida, ibuprofeno, bezafibrato, nicotina, ácido fenofíbrico, ofloxacina.	Escala piloto.	eliminación inferior al 20% para la gran mayoría de contaminantes. Por otro lado, la ósmosis inversa consiguió eliminar prácticamente todos los contaminantes, alcanzando una tasa de retención media en torno al 99,5%.	
---	-----------------------	--	--

Como se muestra en la Tabla 5, la mayor parte de los estudios encontrados emplean la ósmosis inversa en su tratamiento para eliminar los contaminantes emergentes. En aquellos estudios en los que se combinan la ósmosis inversa con otra técnica, se observa como la ósmosis inversa presenta tasas de eliminación mucho mayores, llegando a eliminar prácticamente el 100% de los contaminantes. Así mismo, al igual que en otras técnicas, la mayoría de los contaminantes a eliminar son productos farmacéuticos y, en menor medida, EDCs. Por lo tanto, se podría afirmar que la ósmosis inversa es mucho más eficaz que la ósmosis directa para la degradación de CE.

4.8. Adsorción.

Esta técnica es una de las más empleadas para degradar los CE de las aguas residuales, puesto que es económica y fácil de implementar. Además, diversas investigaciones han demostrado su eficiencia a la hora de degradar CE como fármacos y disruptores endocrinos. La sustancia más utilizada para el desarrollo de esta técnica es el carbón activado. No obstante, su elevado coste junto con su dificultad para regenerarlo supone que la síntesis de carbón activado se lleve a cabo a partir de residuos lignocelulósicos. La Figura 6 muestra una gráfica en la cual se puede observar la capacidad de adsorción que presentan los diferentes materiales lignocelulósicos, como son la cáscara de arroz (CA) para el ibuprofeno (IBU) y la tetraciclina (TCN) y el carbón de hueso de melocotón (HM) (37).

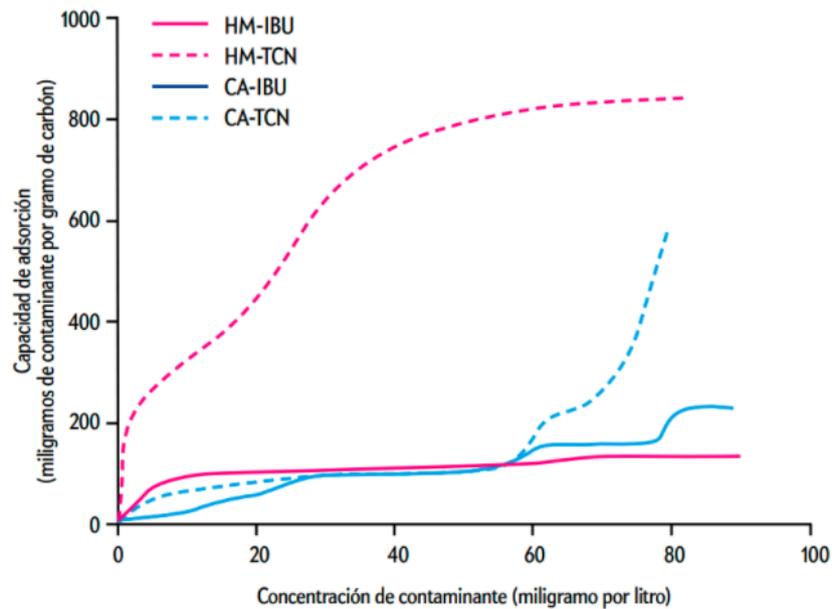


Figura 6. Representación de las diferentes isoterma de adsorción de materiales lignocelulósicos (37).

La Tabla 6 recoge los diferentes adsorbentes para degradar los CE de las aguas residuales.

Tabla 6. Técnicas de adsorción para la degradación de CE.

Contaminantes	Tratamiento	Resultados	Bibliografía
Amoxicilina, paracetamol, propanolol, diclofenaco de sodio y tetraciclina.	Adsorción con carbón activado de semilla de aguacate. Escala de laboratorio.	Se obtuvo una mayor de adsorción por parte del carbón activado cuando solo se trataba de eliminar uno de los contaminantes. Se consiguió una tasa de degradación del 100% para el paracetamol, el propanolol y la tetraciclina. Para el caso del diclofenaco y la amoxicilina, la tasa de degradación fue un poco menor, siendo ésta superior al 91%.	(38)
Bisfenol A, ciprofloxacina	Co-adsorción con óxido de grafeno con gelificador orgánico. Escala de laboratorio.	La tasa de eliminación fue de 67,1% para el bisfenol A y de 96,2% para la ciprofloxacina.	(39)
Carbamazepina, naproxeno, ketoprofeno, diclofenaco, triclosán y metil parabeno.	Adsorción con corcho granulado. Escala de laboratorio.	Se obtuvo una tasa de degradación del del 50% para carbamazepina y metil parabeno, del 57% para el ketoprofeno, del 82% para el naproxeno y del 100%	(40)

		para el diclofenaco. Se concluyó que la adsorción fue casi completa para todos los contaminantes.	
Bifenol A, atrazina, 17 α -etinilestradiol sulfametoxazol, carbamazepina, diclofenaco e ibuprofeno.	Adsorción con Biochar activado en condiciones oxigenadas y anóxicas. Escala de laboratorio.	Para el biochar activado en ausencia de oxígeno, la tasa de degradación de los contaminantes estudiados fue muy elevada, encontrándose entre un 34 y un 100%. De los contaminantes estudiados el ibuprofeno fue el que presentó una menor tasa de degradación.	(41)
17 α -etinilestradiol, dihidrotestosterona y 17 β -estradiol.	Adsorción con carbón activado, sustancias húmicas y zeolitas. Escala de laboratorio.	Los resultados mostraron que el carbón activado fue más efectivo para eliminar muestras sintéticas, con una tasa de degradación entre un 68 y un 99%. No obstante, el agua residual tratada con zeolitas presentó una tasa de eliminación menor, entre un 49 y un 60%.	(42)
Acetaminofén.	Adsorción con nanotubos de carbono de múltiple pared modificados con NaOH, HNO ₃ /H ₂ SO ₄ , O ₃ y quitosano. Escala de laboratorio.	La tasa de degradación para acetaminofén fue del 95%, empleando los nanotubos de O ₃ .	(43)

En la Tabla 6 se muestran los diferentes ensayos basados en la adsorción empleando diferentes adsorbentes, como son el carbón activado, el grafeno, corcho o biochar (carbón vegetal). Los compuestos que se sometieron al proceso de adsorción fueron productos farmacéuticos y algunos EDCs. Las tasas de eliminación para los compuestos estudiados fueron muy elevadas, pudiendo alcanzar incluso el 100% para algunos compuestos como el paracetamol, propanolol y tetraciclina.

4.9. Tratamiento biológico.

Los procesos biológicos en las EDARs se basan en un conjunto de técnicas que emplean microorganismos para degradar componentes solubles en el agua. Este tipo de técnica de eliminación de contaminantes es una opción interesante debido a la escasa

generación de residuos y al bajo coste de operación y mantenimiento, sin embargo, presenta un tiempo de retención elevado (8). A continuación, en la Tabla 7 se establecen las diferentes técnicas para degradar los CE.

Tabla 7. Procesos biológicos para la degradación de CE.

Contaminantes	Tratamiento	Resultados	Bibliografía
20 productos farmacéuticos, entre los que se incluyen drogas analgésicas, antiinflamatorias, β -bloqueadores y antibióticos.	Reactor biológico de membrana (MBR). Escala real.	Se consiguió una tasa de eliminación superior al 90% para acetaminofén, cafeína, naproxeno e ibuprofeno. No obstante, para la trimetoprima, metoprolol y benzotriazol la tasa de eliminación fue inferior al 50%.	(44)
Acetaminofén y sulfonamidas (sulfadimetoxina, sulfametoxazol, sulfametazina).	Compost de hongos gastados (SMC). Escala de laboratorio.	Se obtuvo una tasa de degradación entre el 80-100% de los contaminantes evaluados aplicando el compost de hongos gastados durante 48 horas.	(45)
Acetaminofén, codeína, naproxeno, atenolol, cotinina, cafeína, paraxantina, carbamazepina, citalopram, ketoprofeno, sulfametoxazol, 4-AA, 4-AAA, 4-DAA y 4-FAA.	Filtro de población vegetal. Escala real.	La tasa de degradación fue superior al 90% para todos los compuestos, excepto para el ketoprofeno que fue del 55%.	(46)
Bifenol A, bifenol AF, bifenol F, 2,4-diclorofenol, EE2, organofosfato, trifetilamina, bifenol a-d16, 3,4-diclorofenol y cafeína.	Reactores con microalgas libres e inmovilizadas. Escala de laboratorio.	Para los dos tipos de reactores se obtuvieron unas tasas de eliminación del 80%, tras un período de 10 días de incubación. No obstante, el bisfenol A y el 2,4-diclorofenol fueron más resistentes al tratamiento.	(47)
Etinilestradiol (EE2), bifenol A y levonorgestrel.	Humedales construidos de flujo subsuperficial. Escala de laboratorio.	El humedal con grava y carbón de bambú y <i>Cyperus isocladius</i> obtuvo una tasa de degradación superior para EE2 y bisfenol A, siendo ésta superior a 80%. No obstante, el humedal con grava y <i>Eichhornia crassipes</i> resultó ser el más	(48)

		eficaz para levonorgestrel, con una tasa de eliminación superior al 90%.	
Acetaminofén.	Humedal construido de flujo vertical. Escala piloto.	El humedal consiguió eliminar más del 99% de acetaminofén.	(49)

En la Tabla 7 se observan las técnicas biológicas empleados para la degradación de CE, algunos de ellos son el compost de hongos, el MBR, el filtro vegetal o los humedales entre otros. La mayor parte de compuestos investigados fueron compuestos farmacéuticos y EDCs, siendo los primeros los CE más dañinos para el medio ambiente, y obteniendo unas tasas de eliminación entre el 80 y 100% de los mismos.

En los estudios recopilados en las Tablas 3 a 7, se presentan las tasas de degradación superiores al 90% para multitud de productos farmacéuticos y EDCs, mediante diferentes tipos de tratamiento. De entre todos ellos, se podría destacar la ósmosis, concretamente la ósmosis inversa, ya que ha obtenido los mejores resultados, logrando una eliminación de casi el 100% para una gran variedad de contaminantes.

Algunos compuestos farmacéuticos, como son el diclofenaco, el ibuprofeno, el naxopreno y algunos EDCs hormonales, también mostraron una sencilla y rápida degradación en estas tecnologías de tratamiento. Sin embargo, otros compuestos como los fármacos (carbamazepina y sulfametoxazol) y los retardantes de llama fueron más resistentes a esa degradación.

Es importante destacar la dificultad de eliminar todos los compuestos por parte de una sola técnica, ya que cada tecnología presenta sus propios principios generales y limitaciones y cada compuesto sus características propias. Además, hay que añadir los costes económicos y operativos junto al requerimiento energético para llevar a cabo estos procesos de degradación de CE.

Como se sabe la legislación encargada de regular la presencia, así como los efectos de los CE está bastante obsoleta. Además, no existen leyes que controlen y/o regulen directamente todos los compuestos que son considerados CE, tan sólo listas prioritarias de compuestos que deben ser vigilados en el ámbito comunitario. Con el propósito de reducir la contaminación del medio ambiente, así como los riesgos y efectos que acarrear la existencia de los CE en los seres humanos se deberían establecer leyes, reglamentos y directivas destinadas a evaluar qué concentraciones de los CE pueden ser

perjudiciales y, en el caso de sobrepasar la concentración límite, comprometerse a eliminarlas de manera radical. Sin embargo, las EDARs no están capacitadas para eliminar en conjunto los CE, ya que los procesos físicos, químicos y biológicos han resultado productivos contra una amplia variedad de CE, pero no ha sido suficiente como para eliminarlos al 100%.

De este modo, se proponen las siguientes medidas con el fin de alcanzar un futuro óptimo con respecto a los CE (50):

- Incorporar la tecnología a nanoescala y la ingeniería genética a la degradación de la contaminación, ya que los residuos químicos dañinos son fruto de la síntesis química y sus precursores son liberados al medio ambiente. Con el objeto de eludir los impactos nocivos en el medio ambiente, se cree necesario incluir métodos más ecológicos para la síntesis de nanopartículas. Estas nuevas incorporaciones tienen como ventajas no dañar el medio ambiente, no utilizar productos químicos tóxicos y que son más rentables económicamente.
- Analizar e investigar detalladamente la cinética de las reacciones, así como el diseño de los reactores, los efectos de los parámetros funcionales y los diferentes mecanismos de degradación de los CE.
- Seleccionar de forma adecuada las técnicas de tratamiento para los CE, ya que pueden estar condicionadas por factores como son la fiabilidad, calidad del agua, la compatibilidad con el medio ambiente, la flexibilidad, la capacidad de los servicios públicos y los costes de mantenimiento y funcionamiento de la técnica de tratamiento en cuestión.
- Emplear tecnologías verdes o sostenibles, como son la nanotecnología, las pilas de combustible microbianas o la filtración por membrana a escala industrial destacando por ser eficaces a la vez que rentables.
- Estudiar de manera exhaustiva los contratiempos derivados del análisis de las aguas residuales, el método de análisis y los procesos de validación aceptables para la determinación segura y fiable de los CE en muestras ambientales complejas.
- Incorporar a las EDARs técnicas físicas como los ultrasonidos con adsorción y radiación gamma.
- Mayor investigación y desarrollo de las diferentes técnicas de eliminación de CE que incluyan estudios de viabilidad económica de las técnicas a desempeñar.

5. Conclusiones.

- I. Los compuestos farmacéuticos y los disruptores endocrinos son los CE más frecuentemente encontrados en las aguas residuales. Siendo los primeros los CE más dañinos para el medio ambiente.
- II. Las EDARs no son capaces de eliminar en su totalidad los CE, de hecho, algunos son capaces de persistir en el medio ambiente dando lugar a formas mucho más tóxicas.
- III. Las técnicas de oxidación avanzada y la ósmosis son ser las más eficientes para degradar los CE.
- IV. La nanotecnología abrirá puertas en un futuro con el fin de lograr una mayor tasa de eliminación de CE con la investigación y el apoyo necesarios.
- V. La legislación que regula los CE es bastante obsoleta, así como poco específica.

6. Bibliografía.

1. Kumar Parida, V., Saidulu, D., Majumder, A., Srivastava, A., Gupta, B. & Kumar Gupta, A. (2021). Emerging contaminants in wastewater: A critical review on occurrence, existing legislations, risk assessment, and sustainable treatment alternatives. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 9: 1-20. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105966>.
2. Pachés Giner, M. (2020). Contaminantes emergentes. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Valencia.
3. Arbeláez Salazar, P.A. (2015). Contaminantes emergentes en aguas residuales de río y fangos de depuradora. Tesis doctoral. Universitat Rovira I Vigili. Tarragona.
4. Baz Sanz, L. (2019). Contaminantes emergentes. Impacto sobre la salud y el medio ambiente. Trabajo de fin de grado. Universidad Complutense.
5. Life Empore. (2020). ¿Qué son los contaminantes emergentes?
6. Aquae Fundación. Contaminantes emergentes: grandes desconocidos que ponen en peligro el planeta.
7. Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes. Diario Oficial de la Unión Europea, 31 de julio de 2006, num. 209.
8. De Jesús-Murillo, C.F. & Silva Leal, J.A. (2020). Tratamiento de aguas residuales para la eliminación de contaminantes emergentes. *Esp Control de la Contaminación*. 1-16.
9. Kiejza, D., Kotowska, U., Polińska, W. & Karpińska J. (2021). Peracids – New oxidants in advanced oxidation processes: The use of peracetic acid, peroxymonosulfate, and persulfate salts in the removal of organic micropollutants of emerging concern – A review. *Science of the Total Environment* 790: 2-13. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148195>.
10. Kashif Shahid, M., Kashif A., Fuwad, A. & Choi, Y. (2021). Current advances in treatment technologies for removal of emerging contaminants from water – A critical review. *Coordination Chemistry Reviews*. 442: 1-25. doi: 10.1016 / j.ccr.2021.213993.
11. Bes Monge, S., Silva, A.M.T. & Bengoa, C. (2018). Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados al tratamiento de aguas residuales industriales. Programa CYTED.
12. Benotti, M. J., Stanford, B. D., Wert, E. C., & Snyder, S. A. (2009). Evaluation of a photocatalytic reactor membrane pilot system for the removal of pharmaceuticals and

- endocrine disrupting compounds from water. *Water Research*. 43 (6): 1513–1522. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.12.049>.
13. Fernández, R. L., McDonald, J. A., Khan, S. J., & Le-Clech, P. (2014). Removal of pharmaceuticals and endocrine disrupting chemicals by a submerged membrane photocatalysis reactor (MPR). *Separation and Purification Technology*. 127: 131–139. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.02.031>.
14. Nakada, N., Shinohara, H., Murata, A., Kiri, K., Managaki, S., Sato, N., & Takada, H. (2007). Removal of selected pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) and endocrine-disrupting chemicals (EDCs) during sand filtration and ozonation at a municipal sewage treatment plant. *Water Research*. 41 (19): 4373–4382. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.06.038>.
15. Khraisheh, M., Kim, J., Campos, L., Al-Muhtaseb, A. H., Al-Hawari, A., Al Ghouti, M., & Walker, G. M. (2014). Removal of pharmaceutical and personal care products (PPCPs) pollutants from water by novel TiO₂-Coconut Shell Powder (TCNSP) composite. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 20 (3): 979–987. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.06.032>.
16. Czech, B., & Buda, W. (2015). Photocatalytic treatment of pharmaceutical wastewater using new multiwall-carbon nanotubes/TiO₂/SiO₂ nanocomposites. *Environmental Research*. 137: 176–184. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2014.12.006>.
17. Hofman-Caris, C. H. M., Siegers, W. G., van de Merlen, K., de Man, A. W. A., & Hofman, J. A. M. H. (2017). Removal of pharmaceuticals from WWTP effluent: Removal of EfOM followed by advanced oxidation. *Chemical Engineering Journal*. 327: 514–521. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.06.154>.
18. Kwon, M., Kim, S., Yoon, Y., Jung, Y., Hwang, T. M., Lee, J., & Kang, J. W. (2015). Comparative evaluation of ibuprofen removal by UV/H₂O₂ and UV/S₂O₈²⁻ processes for wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*. 269: 379–390. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.01.125>.
19. Arzate, S., Campos-Mañás, M. C., Miralles-Cuevas, S., Agüera, A., García Sánchez, J. L., & Sánchez Pérez, J. A. (2020). Removal of contaminants of emerging concern by continuous flow solar photo-Fenton process at neutral pH in open reactors. *Journal of Environmental Management*. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110265>.

20. Soriano-Molina, P., Miralles-Cuevas, S., Esteban García, B., Plaza-Bolaños, P., & Sánchez Pérez, J. A. (2019). Two strategies of solar photo-Fenton at neutral pH for the simultaneous disinfection and removal of contaminants of emerging concern. Comparative assessment in raceway pond reactors. *Catalysis Today*. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2019.11.028>.
21. Soriano-Molina, P., Plaza-Bolaños, P., Lorenzo, A., Agüera, A., García Sánchez, J. L., Malato, S., & Sánchez Pérez, J. A. (2019). Assessment of solar raceway pond reactors for removal of contaminants of emerging concern by photo-Fenton at circumneutral pH from very different municipal wastewater effluents. *Chemical Engineering Journal*. 366: 141–149. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.02.074>.
22. Quiroga Alonso, J.M., Quero-Pastor, M.J. & Acevedo Merino, A. (2015). Tratamientos avanzados para la eliminación de fármacos en aguas superficiales. *Revista Salud Ambiental*. 15: 12-64.
23. Cai, M., Sun, P., Zhang, L., Huang, C.-H. (2017). UV/peracetic acid for degradation of pharmaceuticals and reactive species evaluation. *Environmental Science Technology*. 51: 14217–14224. doi: <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b04694>.
24. Bluegold. (2020). Comparativa de membranas para el tratamiento de aguas.
25. Acero, J. L., Benitez, F. J., Real, F. J., & Teva, F. (2017). Removal of emerging contaminants from secondary effluents by micellar-enhanced ultrafiltration. *Separation and Purification Technology*. 181: 123–131. doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.03.021>.
26. Egea-Corbacho, A., Gutiérrez, S., & Quiroga, J. M. (2019a). Removal of emerging contaminants from wastewater using nanofiltration for its subsequent reuse: Full-scale pilot plant. *Journal of Cleaner Production*. 214: 514–523. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.297>.
27. Yoon, Y., Westerhoff, P., Snyder, S. A., & Wert, E. C. (2006). Nanofiltration and ultrafiltration of endocrine disrupting compounds, pharmaceuticals and personal care products. *Journal of Membrane Science*. 270: 88–100. doi: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2005.06.045>.
28. Yoon, Y., Westerhoff, P., Snyder, S. A., Wert, E. C., & Yoon, J. (2007). Removal of endocrine disrupting compounds and pharmaceuticals by nanofiltration and

- ultrafiltration membranes. *Desalination*. 202: 16–23. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.12.033>.
29. Kamrani, M., Akbari, A., & Yunessnia Iehi, A. (2018). Chitosan-modified acrylic nanofiltration membrane for efficient removal of pharmaceutical compounds. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 6: 583–587. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.12.044>.
30. Costas, G. (2020). Ósmosis ¿qué es y qué funciones tiene? Ciencia y biología.
31. Jin, X., Shan, J., Wang, C., Wei, J., & Tang, C. Y. (2012). Rejection of pharmaceuticals by forward osmosis membranes. *Journal of Hazardous Materials*. 227–228: 55–61. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.04.077>.
32. Egea-Corbacho, A., Gutiérrez, S., & Quiroga, J. M. (2019b). Removal of emerging contaminants from wastewater using reverse osmosis for its subsequent reuse: Pilot plant. *Journal of Water Process Engineering*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100800>.
33. Licon, K. P. M., Geaquinto, L. R. d. O., Nicolini, J. V., Figueiredo, N. G., Chiapetta, S. C., Habert, A. C., & Yokoyama, L. (2018). Assessing potential of nanofiltration and reverse osmosis for removal of toxic pharmaceuticals from water. *Journal of Water Process Engineering*. 25: 195–204. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.08.002>.
34. Al-Rifai, J. H., Khabbaz, H., & Schäfer, A. I. (2011). Removal of pharmaceuticals and endocrine disrupting compounds in a water recycling process using reverse osmosis systems. *Separation and Purification Technology*. 77: 60–67.
35. Dolar, D., Gros, M., Rodríguez-Mozaz, S., Moreno, J., Comas, J., Rodríguez-Roda, I., & Barceló, D. (2012). Removal of emerging contaminants from municipal wastewater with an integrated membrane system, MBR-RO. *Journal of Hazardous Materials*. 239–240: 64–69. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.03.029>.
36. Urtiaga, A. M., Pérez, G., Ibáñez, R., & Ortiz, I. (2013). Removal of pharmaceuticals from a WWTP secondary effluent by ultrafiltration/reverse osmosis followed by electrochemical oxidation of the RO concentrate. *Desalination*. 331: 26–34. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.10.010>.
37. Álvarez-Torrellas, S., Ovejero, G. & García Rodríguez, J. (2017). Eliminación de los contaminantes emergentes de las aguas residuales. *Investigación y Ciencia*.

38. Lima, D. R., Gomes, A. A., Lima, E. C., Umpierres, C. S., Thue, P. S., Panzenhagen, J. C. P., ... de Alencar, W. S. (2019). Evaluation of efficiency and selectivity in the sorption process assisted by chemometric approaches: Removal of emerging contaminants from water. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 218: 366–373. doi: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2019.04.018>.
39. Lv, M., Yan, L., Liu, C., Su, C., Zhou, Q., Zhang, X., ... Ye, Z. (2018). Non-covalent functionalized graphene oxide (GO) adsorbent with an organic gelator for co-adsorption of dye, endocrine-disruptor, pharmaceutical and metal ion. *Chemical Engineering Journal*. 349: 791–799. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.04.153>.
40. Mallek, M., Chtourou, M., Portillo, M., Monclús, H., Walha, K., Salah, A. ben, & Salvadó, V. (2018). Granulated cork as biosorbent for the removal of phenol derivatives and emerging contaminants. *Journal of Environmental Management*. 223: 576–585. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.06.069>.
41. Jung, C., Park, J., Lim, K. H., Park, S., Heo, J., Her, N., ... Yoon, Y. (2013). Adsorption of selected endocrine disrupting compounds and pharmaceuticals on activated biochars. *Journal of Hazardous Materials*. 263. 702–710. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.10.033>.
42. Polloni-Silva, J., Valdehita, A., Fracácio, R., & Navas, J. M. (2017). Remediation efficiency of three treatments on water polluted with endocrine disruptors: Assessment by means of in vitro techniques. *Chemosphere*. 173: 267–274. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.01.029>.
43. Yanyan, L., Kurniawan, T. A., Albadarin, A. B., & Walker, G. (2018). Enhanced removal of acetaminophen from synthetic wastewater using multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) chemically modified with NaOH, HNO₃/H₂SO₄, ozone, and/or chitosan. *Journal of Molecular Liquids*. 251: 369–377. doi: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.12.051>.
44. Kumar, R., Sarmah, A. K., & Padhye, L. P. (2019). Fate of pharmaceuticals and personal care products in a wastewater treatment plant with parallel secondary wastewater treatment train. *Journal of Environmental Management*. 233: 649–659. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.062>.

45. Chang, B. V., Fan, S. N., Tsai, Y. C., Chung, Y. L., Tu, P. X., & Yang, C. W. (2018). Removal of emerging contaminants using spent mushroom compost. *Science of the Total Environment*. 634: 922–933. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.366>.
46. Martínez-Hernández, V., Leal, M., Meffe, R., de Miguel, A., Alonso-Alonso, C., de Bustamante, I., ... Salas, J. J. (2018). Removal of emerging organic contaminants in a poplar vegetation filter. *Journal of Hazardous Materials*. 342: 482–491. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.08.035>.
47. Solé, A., & Matamoros, V. (2016). Removal of endocrine disrupting compounds from wastewater by microalgae co-immobilized in alginate beads. *Chemosphere*. 164: 516–523. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.08.047>.
48. Campos, J. M., Queiroz, S. C. N., & Roston, D. M. (2019). Removal of the endocrine disruptors ethinyl estradiol, bisphenol A, and levonorgestrel by subsurface constructed wetlands. *Science of the Total Environment*. 693. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.320>.
49. Vo, H. N. P., Koottatep, T., Chapagain, S. K., Panuvatvanich, A., Polprasert, C., Nguyen, T. M. H., ... Nguyen, N. L. (2019). Removal and monitoring acetaminophen-contaminated hospital wastewater by vertical flow constructed wetland and peroxidase enzymes. *Journal of Environmental Management*. 250. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109526>.
50. Ahmed, S.F., Mofijur, M., Nuzhat, S., Tasnim Chowdhury, A., Rafa, N., Alhaz Uddin, Md., Inayat, A., Mahlia, T.M.I, Chyuan Ong, H., Yi Chia, W. & Loke Show P. (2021). Recent developments in physical, biological, chemical, and hybrid treatment techniques for removing emerging contaminants from wastewater. *Journal of Hazardous Materials*. 416: 1-23. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125912>.