



FACULTAD DE FARMACIA
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE

TRABAJO FIN DE GRADO

TÍTULO: CONTAMINANTES EMERGENTES.
IMPACTO SOBRE LA SALUD Y EL MEDIO
AMBIENTE

Autor: Laura Baz Sanz

Fecha: 28/05/19

Tutor: Concepción González Huecas

Índice

1. Resumen.....	3
2. Introducción y antecedentes.....	3
2.1. Presencia de contaminantes emergentes en aguas	4
2.2. Legislación de contaminantes emergentes.....	5
3. Objetivos.....	7
4. Material y métodos	7
5. Resultados y discusión	7
5.1 Contaminantes emergentes.....	7
5.1.1 Productos farmacéuticos	8
5.1.2 Productos de cuidado personal.....	10
5.1.3 Disruptores endocrinos.....	12
5.3 Destino de los contaminantes emergentes durante el tratamiento de aguas residuales	13
5.4. Eliminación de los contaminantes emergentes.	14
5.4.1- Tratamiento tecnológico.....	14
5.4.2. Tratamiento natural	16
6. Conclusiones.....	16
Bibliografía	17

1. Resumen

Los productos farmacéuticos, productos de cuidado personal y disruptores endocrinos conforman un grupo de sustancias comunmente denominadas “contaminantes emergentes”. Estos compuestos han suscitado a lo largo de las últimas décadas un interés creciente, ya que se han encontrado (gracias al avance en las técnicas analíticas) en aguas ya tratadas, lo que implica un problema para la salud humana y ambiental. Su presencia en el medio se da a unas concentraciones muy bajas, pero esto no implica una falta de riesgo en la salud, ya que se tratan de compuestos que se incorporan constantemente en el medio ambiente por su elevado uso en actividades industriales, agrícolas y domésticas. Aunque es conocida la presencia de estos contaminantes en el medio ambiente, aun no se han obtenido los suficientes datos acerca de los efectos nocivos que pueden ocasionar ni sobre el destino final de estos contaminantes. Se plantea por lo tanto la necesidad de encontrar métodos más eficaces para su eliminación del medio, el desarrollo de nuevas medidas legislativas para controlar los límites máximos permitidos en aguas de consumo, así como estudios sobre los posibles efectos nocivos en la salud humana y medioambiental.

2. Introducción y antecedentes

Gracias al avance de las técnicas analíticas de detección, se ha podido observar a lo largo de las últimas décadas la presencia de compuestos de origen antropogénico a niveles traza en aguas residuales. Estos compuestos, se conocen como “contaminantes emergentes” (CEs) y están suscitando una gran preocupación dentro del mundo científico, ya que se ha demostrado un impacto dañino en toda la biosfera, en las formas de vida acuáticas, terrestres y en la salud humana (1). La causa del aumento de estos tipos de productos de origen antropogénico en el medio ambiente, se puede producir en parte al rápido desarrollo de la urbanización de grandes ciudades, al aumento demográfico, aumento de la calidad de vida y desarrollo industrial (2).

Para poder entender mejor la creciente preocupación por este tipo de contaminantes, es necesario conocer las diferencias entre contaminantes emergentes y contaminantes prioritarios. Estos últimos quedan definidos en la Directiva 2000/60/CE como: “sustancias o grupos de sustancias que son tóxicas, persistentes y pueden causar bioacumulación, así como otras sustancias o grupos de sustancias que entrañan un nivel de riesgo análogo” (3). Este grupo de contaminantes han sido objeto de estudio durante muchos años y están regulados a través de legislaciones. En concreto la Directiva 2000/60/CE especifica medidas como el cese o la disminución de fugas, emisiones o fuentes de contaminación y así conseguir una protección del agua y la calidad química y ecológica de esta (3). Sin embargo, los contaminantes emergentes son compuestos de distinto origen y naturaleza química cuya presencia en el medio ambiente, o las posibles consecuencias de la misma, han pasado en gran parte inadvertidas. A parte de las características fisico-químicas, la principal diferencia es que los contaminantes emergentes carecen de una regulación legislativa, mientras que los contaminantes prioritarios se encuentran regulados por distintas directivas y legislaciones desde hace muchos años. Las principales características de los CEs se pueden resumir en (1):

- Son compuestos de los cuales se sabe relativamente poco o nada acerca de su presencia e impacto en los distintos compartimentos ambientales y en el hombre y que, por tanto, precisan investigación.
- Su estudio se encuentra en las líneas de investigación prioritarias de los principales organismos dedicados a la protección de la salud pública y medioambiental (tales como la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Agencia para la Protección del Medio Ambiente (EPA), o la Comisión Europea).
- Su presencia en el medio ambiente no es necesariamente nueva, pero si la preocupación por las posibles consecuencias de la misma.
- Debido a la falta de conocimiento de estos compuestos en cuanto a su presencia e impacto en los distintos compartimentos ambientales, no han sido regulados y la disponibilidad de métodos para su análisis es nula o limitada.
- Debido a su elevada producción y consumo, y a la continua introducción de los mismos en el medio ambiente, no necesitan ser persistentes para ocasionar efectos negativos.
- Estos efectos nocivos no son fáciles de estimar ya que en ocasiones puede ser la exposición crónica la que produce efectos en la biota y otros casos, en cambio, una pequeña concentración es la que produce efectos negativos en el medio.
- A medida que ha ido mejorando y desarrollándose los métodos de ensayo, se ha hecho más evidente la presencia de contaminantes emergentes.
- Es más común la presencia de estos contaminantes en el medio acuático, ya que, a temperatura y presión ambiente, estas sustancias se disuelven sin evaporarse.
- Aunque sus concentraciones sean muy bajas (ng/L), su impacto en el medio ambiente y la salud humana puede ser muy nociva.
- Todavía existe un gran vacío de conocimiento en cuanto al comportamiento y biodegradabilidad de los contaminantes emergentes en las aguas, por lo tanto, las investigaciones deben centrarse en el desarrollo de un marco y modelos de detección basados en el riesgo.

2.1. Presencia de contaminantes emergentes en aguas

Como consecuencia de factores como el aumento de población, desarrollo económico y cambios en los patrones de consumo, la demanda de agua ha ido aumentando a un ritmo del 1% anual y se estima que seguirá creciendo en las próximas dos décadas, sobre todo en lo que se refiere a actividades industriales y domésticas. La calidad del agua ha empeorado desde los años 90, lo que supone una amenaza para la salud humana, el medio ambiente y el desarrollo sostenible. La gran preocupación a nivel mundial es la carga de nutrientes asociada a una carga de patógenos y productos químicos que afectan a la calidad del agua (4). Dicho esto, la contaminación del agua es una preocupación cada vez más creciente a nivel mundial, ya que se trata de un recurso natural esencial tanto para los humanos como para el medio ambiente (5).

El patrón de uso/consumo, los procesos de tratamientos de aguas y la legislación vigente en cada comunidad serán factores determinantes en la concentración de los contaminantes en el agua, aunque debido a la globalización de la industria química y farmacéutica, hace que cada vez sean más parecidas las concentraciones de los

contaminantes en las aguas de todo el mundo. A su vez, se ha comprobado que existen procesos de atenuación natural tales como dilución, sorción, volatilización y degradación. El transporte fluvial, o través de humedales y mediante el proceso de recarga de los acuíferos pueden contribuir también a la atenuación natural de las concentraciones de CE. Por otra parte, la escorrentía y la lluvia se han identificado como fuente de sustancias emergentes (2).

Las fuentes de contaminación al medio ambiente acuático son principalmente a través de efluentes de plantas depuradoras de aguas residuales, haciendo evidente así la ineficacia de los tratamientos actuales de depuración de estas aguas. A estas plantas de tratamiento llegarán a través de distintas vías. Las principales son aquellas de origen industrial (muchos de los compuestos industriales, no están regulados y se liberan directamente en el agua superficial) (6); de origen agrícola (productos farmacéuticos veterinarios utilizados en ganadería y acuicultura y pesticidas utilizados para proteger los cultivos y mejorar su rendimiento) (7); y las aguas provenientes de uso doméstico (productos de uso cotidiano que contienen estos contaminantes, productos farmacéuticos excretados de forma inalterada o como sus metabolitos, a través de la orina y/o heces y a través de una descarga directa de contaminantes provenientes de instalaciones hospitalarias) (5).

La falta de conocimiento acerca de los efectos a medio/largo plazo exigen un comportamiento preceptivo debido a la exposición crónica y prolongada. Los efectos continuos pero no detectados de estos contaminantes pueden acumularse dando lugar a efectos nocivos en la salud humana y animal (8). Además, en el agua se encontrarán distintos contaminantes que pueden actuar con un efecto sinérgico. Ejemplos de estas interacciones se dan entre metales y productos farmacéuticos como un aumento de bacterias con gen resistente a antibióticos en aguas con elevados niveles de Cu y ampicilina. Otro ejemplo de efecto sinérgico proviene de la mezcla de fármacos como el antiepiléptico carbamazepina y el fármaco hipolipemiante ácido clofibrato (9). Se puede concluir que, tanto las especies acuáticas como los seres humanos, son sensibles a los contaminantes presentes en el medio acuático, pudiendo ocasionar efectos a largo plazo en su salud (5).

Los CE tienen una alta resistencia a la degradación, al metabolismo y la mayoría comparten la cualidad de ser liposolubles. Esto hace que sean fácilmente acumulables en la grasa animal. Su capacidad para ser almacenados en la grasa animal, hace que sean persistentes a lo largo de la cadena trófica y por lo tanto, altamente acumulables a lo largo de la cadena alimentaria, haciendo que la concentración de contaminante sea cada vez mayor a medida que asciende la cadena trófica (10-12)

2.2. Legislación de contaminantes emergentes

Debido a la creciente demanda de agua segura y limpia, la calidad del agua es uno de los temas prioritarios en la agenda de la política ambiental. En la actualidad, existen algunos reglamentos que identifican ciertas sustancias que pueden ser peligrosas y por ello, deben ser monitorizadas para, en su caso, proporcionar medidas de atenuación cuando sea necesario. Desde el año 2000 en Europa se han ido publicado algunas directrices como la Directiva 2000/60 / CE, con objeto de establecer un marco para la acción comunitaria en el campo de

la política del agua (13). Dicha Directiva de la UE representó un avance en la política de protección del agua, con el propósito de lograr un buen estado ecológico y químico de las aguas superficiales, lo que requirió que la Comisión de la UE identificara las sustancias y/o grupo de sustancias prioritarias (PS) que podían representar un riesgo significativo para el medio ambiente acuático. Además, estableció los Estándares de Calidad Ambiental de la UE definidos como “la concentración de un contaminante particular o grupo de contaminantes en aguas, sedimentos o biota que no se deben sobrepasar para proteger la salud humana y el medio ambiente”.

En el año 2001, la Decisión 2455/2001/EC estableció la primera lista de 33 PS que debían ser monitorizadas a nivel comunitario, algunos de ellas fueron marcadas como sustancias peligrosas de alta prioridad (PHSs). En la Directiva 2008/105 / EC (14) esta lista se amplió a otros 8 posibles contaminantes. Cinco años después, 2013/39/UE (15) se actualizó los documentos anteriores, recomendándose el seguimiento de 53 PS, 49 sustancias orgánicas y 4 metales: cadmio, plomo, mercurio y níquel. Es en la Decisión 2015/495/UE de 20 de marzo de 2015 (16) cuando se propuso el seguimiento de los llamados contaminantes de preocupación emergente, contaminantes no regulados y que aún no presentan Estándares de Calidad Ambiental definidos. No obstante, se están recopilando datos de su monitoreo de la con el fin de respaldar en un el futuro su reglamentación. Se incluirán en la llamada lista de observación, lista que debe ser dinámica y su validez en el tiempo ha de ser limitada, para evitar prolongar de forma innecesaria el tiempo de seguimiento de dichas sustancias. Ejemplos de inclusión en las listas de sustancias prioritarias son retardantes de llama difenil éteres polibromados, los detergentes de tipo alquilfenol etoxilados y las parafinas cloradas. Además, para mantener a unos niveles óptimos los costes del seguimiento de las nuevas sustancias que son de mayor interés para estudiar, se realizará una lista con un número limitado de sustancias (3).

Los principales CEs encontrados en las aguas derivan de tres grandes grupos (1):

- a) Productos farmacéuticos (PhACs). Destacan antibióticos de uso humano y veterinario, medicamentos recetados y de venta libre, así como hormonas sexuales y esteroides
- b) Productos para el cuidado personal (PCPs). Incluyen sustancias químicas que se encuentran en los productos de consumo, como por ejemplo galaxolide y tonalide
- c) Disruptores endocrinos (EDCs). Estos compuestos pueden provocar efectos adversos en los sistemas endocrinos, ya que tienen actividades androgénicas o estrogénicas incluso a bajas concentraciones

Existe una gran brecha de conocimientos en cuanto a los posibles efectos nocivos que pueden suponer la presencia de estos contaminantes en el medio debido a la falta de controles para la evaluación del riesgo ecológico que supone la descarga de agua contaminada con estos productos, en el medio ambiente y en los organismos vivos (17)

3. Objetivos

Este trabajo pretende aportar una visión general sobre los principales contaminantes emergentes de interés en la actualidad como los productos farmacéuticos, productos de cuidado personal y disruptores endocrinos. Se estudiará sobre todo los efectos nocivos que pueden ocasionar estos productos en la salud y en el medio ambiente.

También se analizará la eficiencia de eliminación de los procesos de tratamiento de agua para estos contaminantes desde un punto de vista tecnológico y natural y se mostrarán estudios sobre el destino y el comportamiento de los contaminantes en la EDAR y en el medio ambiente.

4. Material y métodos

La elaboración de este trabajo se ha basado en la búsqueda y estudio de artículos científicos y documentos electrónicos, así como de material bibliográfico de apoyo relacionado con el tema aquí tratado. Se ha recurrido a bases de datos tales como Web of Science, BUCea, PlosOne y Google Scholar. La búsqueda incluyó publicaciones mundiales a partir de 2012, considerando al menos una de las siguientes palabras clave como «contaminantes emergentes», «productos farmacéuticos», «disruptores endocrinos», etc. Además, se ha recogido información de diferentes libros y artículos de revista validados y publicados. También, se ha consultado documentación de las siguientes páginas web relacionadas con el tema elegido: la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) o la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR).

5. Resultados y discusión

5.1 Contaminantes emergentes

La presencia elevada en el agua de CE's conduce a una alta probabilidad de incorporación de estas sustancias a cultivos irrigados con agua contaminada y producir daños en la salud humana durante su consumo (1).

Los efectos ecológicos y la biodisponibilidad de los CE's en el entorno dependerán de factores como el pH, tipo de suelo o agua, los compuestos ionizables, etc. lo que supone una dificultad añadida a la hora de establecer el comportamiento esperado de estas sustancias y los daños que puedan causar en el medio. Es decir, las pruebas de laboratorio pueden dar resultados que no se asemejan con el comportamiento que seguirá el contaminante en el medio ambiente (1, 18).

5.1.1 Productos farmacéuticos

Aunque se traten de compuestos cuya presencia y descarga en el medio ambiente se conoce desde hace muchos años, ha sido recientemente cuando ha comenzado la investigación sobre los efectos adversos que pueden ocasionar a los organismos vivos. Se consideran contaminantes pseudo-persistentes ya que ingresan en el medio ambiente de manera constante pero en concentraciones bajas. Los conocimientos sobre el impacto ecotoxicológico es inadecuado, pero se tiene como objetivo estudiar los efectos que puedan ocasionar, sobre todo en organismos acuáticos ya que están expuestos constantemente a estos contaminantes (1).

En los años 70 se identificó por primera vez la presencia de fármacos en el medio acuático. Fue en EEUU donde se identificó la presencia del ácido clofíbrico (metabolito activo de reguladores de lípidos en sangre) en aguas residuales, pero hasta los años 90 no aumentó el interés y los estudios para detectar fármacos en el medio ambiente (19)

La presencia de productos farmacéuticos en el entorno es un indicador de la actividad humana y, por lo tanto, es fácil imaginar que sus principales fuentes de ingreso son las aguas residuales urbanas y en menor medida, aunque sin subestimarlas, las operaciones de alimentación agroganadera, actividad industrial, los residuos de efluentes y vertederos no controlados (9, 20). Aunque se han estimado concentraciones ambientales muy bajas, no se ha demostrado qué efecto pueden tener estas concentraciones en la salud ambiental, animal y humana (20).

Las principales características de los productos farmacéuticos por lo que producen una elevada toxicidad son la bioacumulación y su persistencia en el medio. Cada grupo de fármaco tiene un nivel de persistencia diferente. Fármacos como el ibuprofeno y el paracetamol tienen una persistencia baja en el medio (3,1-7 días), mientras que el ácido clofíbrico, diazepam y carbamazepina se clasificaron como fármacos de elevada persistencia (119-328 días) (21).

A continuación se detallarán algunos ejemplos de fármacos y efectos nocivos demostrados en organismos del medio:

- **Antibióticos**
 - Penicilina, sulfonamida y tetraciclinas causan resistencia a agentes bacterianos (1)
 - Toxicidad de ciprofloxacina a algas verdes (21)
 - Toxicidad del ácido oxolínico (aditivo para piensos, usado en piscifactorías) a *Daphnia magna* (21)
 - Toxicidad de los antibióticos fluoroquinolonas en cianobacterias (21).
 - Roxitromicina, claritromicina, tylosin: inhibición de crecimiento del alga *Pseudokirchneriellsubcapitata* (1)
- **Antiepilépticos (Carbamazepina)**
 - Estrés oxidativo en la trucha arcoiris (1)

- Reducción en plasma de 11-ketotestosterona en peces macho (principal andrógeno necesario para el funcionamiento reproductivo normal). Esto se traduce en una influencia en la reproducción de los peces (20).
- Junto con gemfibrozilo y venlafaxina, alteración del desarrollo del embrión y una alteración en el desarrollo de ovocitos y la fecundidad del pez cebra femenino (*Danio rerio*) (20).

- *Antiinflamatorios no esteroideos*
 - Diclofenaco, lesiones renales y alteraciones branquiales de la trucha arcoiris (1)
 - Ibuprofeno, demostró una elevación de estradiol en plasma e inducción de vitelogenina (VTG) en peces machos a través del aumento de la actividad de la aromatasas y/u otras dianas moleculares (20).
 - Diclofenaco, puede afectar a la integridad de los riñones y agallas y parámetros inmunes en los peces (20).

- *Antihipertensivos y reguladores de lípidos*
 - Gemfibrozilo, inhibición del crecimiento del alga *Anabaena* (1)
 - Propranolol, reducción de la viabilidad de huevos de la especie *Oryzias latipes* (1)

- *Antidepresivos/ ansiolíticos*
 - Fluoxetina, altera la vía de señalización de la serotonina (5-HT). Este neurotransmisor es un controlador fisiológico en organismos acuáticos y se ha demostrado que la presencia de este fármaco puede alterar la reproducción, el metabolismo y la locomoción de mejillones en concentraciones cercanas o incluso por debajo de las encontradas a nivel ambiental (21)

- *Drogas de abuso*

El grupo de los opiáceos, cannabinoides, cocaínicos, anfetamínicos y drogas de diseño son ejemplos de drogas de abuso que se han encontrado en el medio ambiente. El estudio de la presencia de drogas ilícitas en aguas puede tener varios objetivos. Por un lado se busca determinar los efectos que puedan ocasionar tanto las drogas como sus metabolitos en el medio acuático y en la salud humana, la eficacia de la depuración de las plantas de tratamiento de aguas, y por otra parte, estudiar el consumo en la población de drogas ilícitas y así realizar programas de prevención por parte del gobierno. Por lo tanto, este tipo de estudios puede tratarse de una vía más rápida, económica y fiable del consumo de drogas ilícitas si lo comparamos con estudios epidemiológicos y encuestas. Podemos concluir entonces que el consumo de drogas ilícitas no solo afectaría a la salud de quienes las consumen, si no que también pueden suponer una amenaza para el medio ambiente, al actuar como contaminantes emergentes (19).

Tras la metabolización y consecuente excreción de estas sustancias por el hombre, es el medio ambiente el último destino de estas drogas de abuso. Estas sustancias tras su liberación en el medio ambiente sufren procesos como: absorción, degradación, lixiviación e interacciones con los sólidos, sedimentos, aguas subterráneas, aguas superficiales, etc.

Aunque se ha estudiado que las drogas de abuso no son persistentes (corta vida media) en el medio ambiente, su continuo consumo da como resultado la persistencia en el medio (19).

Los grupos funcionales de estas sustancias pueden suponer un peligro para los organismos acuáticos (bacterias, algas, invertebrados y peces), ya que contienen un receptor que los hace extremadamente sensibles a estas sustancias. Un ejemplo que se ha podido demostrar es la inhibición de la fotosíntesis y de la fijación de nitrógeno en el alga *Chloroella* y la inhibición del crecimiento de esta microalga debido a las aminas de cadena larga presentes en muchos tipos de drogas de abuso (22).

5.1.2 Productos de cuidado personal

Se tratan de productos sin actividad bioquímica significativa, destinados a su uso sobre el cuerpo humano alterando el olor, aspecto y tacto. En este grupo de contaminantes encontramos productos cosméticos, perfumes, champús, filtros UV, etc. (1). Los PCP son liberados en aguas residuales y llegan a las EDAR ya transformados tras un proceso de metabolización en el medio o en su forma natural (17).

Un ejemplo muy actual de PCP son los microplásticos. Recientemente se ha observado un aumento de estos compuestos en productos de uso diario como limpiadores y exfoliantes. Esto supone la llamada contaminación primaria, es decir, el aporte directo de estos productos al medio. Otro tipo de contaminación de plásticos es la contaminación secundaria que se produce como consecuencia de la degradación de macrolásticos en tamaños más pequeños mediante la acción de organismos acuáticos mordéndolos y/o por la abrasión y por radiación UV que hace estos materiales más débiles y facilitan su rotura en pequeños fragmentos (23). Las principales características de estos productos son:

- Dificultad en el tratamiento de las aguas que contienen estos microplásticos por el pequeño tamaño que tienen, lo que les hace escapar de los tratamientos preliminares de las plantas de tratamiento de aguas residuales (23).
- Son capaces de recorrer grandes distancias debido a características como peso ligero, durabilidad, flotabilidad y forma. Debido a esto, se han podido detectar microplásticos en playas, sedimentos de fondos marinos, efluentes de aguas residuales, superficie del agua, sistemas de agua potable, en el hielo marino del Ártico, e incluso en la Antártida, transportados por mar y viento (23).

Aunque los efectos a largo plazo en la salud de los organismos, aun no es bien conocido, se han podido demostrar efectos nocivos que se pueden resumir en los siguientes puntos (21):

- Inanición de animales acuáticos (poliquetos, equinodermos, briozoos y bivalvos que se alimentan por filtración y percebes) al disminuir el consumo de alimentos debido a la saciedad que produce el alimento con microplásticos
- Muerte por bloqueo intestinal.

- Aparición de microplásticos en el intestino de mejillones que se alimentan por filtración, su paso al sistema circulatorio a partir del 3er día de ingesta y su persistencia hasta 48 días después.
- Si estos microplásticos son consumidos por organismos planctónicos como los copépodos, puede llegar a acumularse a mayores niveles de la cadena alimentaria.

Pero no es solo el tamaño de estos plásticos lo que puede ocasionar un efecto negativo sobre la salud de los distintos organismos, si no que se ha demostrado que los microplásticos pueden actuar como vectores de contaminantes orgánicos, absorbiendo en su superficie contaminantes hidrófobos tóxicos como bifenilos policlorados (PCBs), ingresando estos contaminantes en las cadenas alimenticias de los animales marinos (21). Según datos de El Sistema Globalmente Armonizado de la ONU, en más de un 50% de los plásticos se encuentran monómeros peligrosos, aditivos y subproductos químicos. Ejemplos de estos son: PET, un potencial carcinógeno humano, utilizado en la producción de botellas de plástico entre otras funciones; PS y PVC utilizados para la producción de vasos desechables, platos, vajillas y PC, son liberadores de monómeros tóxicos que producen cáncer y anomalías reproductivas en humanos, roedores e invertebrados (23).

Aunque menos estudiado, también es una realidad la presencia de plásticos en el territorio terrestre, procedentes de productos de cuidado personal como geles de ducha, limpiadores, pasta de dientes, a través de plantas de tratamientos de aguas residuales, pellets, resinas plásticas, abrasivos industriales como poliestireno o poliéster, así como la aplicación de biosólidos producen la entrada de estos contaminantes en tierras agrícolas. Animales como lombrices o la excavación de mamíferos pueden fragmentar estos plásticos, produciendo la conocida como contaminación secundaria. Las principales preocupaciones de la presencia de plásticos en el suelo son: la descomposición en la parte más profunda del suelo es más lenta (menos cantidad de organismos descomponedores); podrían llegar a alcanzar aguas subterráneas y la descomposición en tamaños más pequeños por la acción de organismos terrestres (lombrices, roedores, excavaciones...) plantea un mayor riesgo ambiental (23).

Por todo lo explicado anteriormente se hace evidente la posibilidad de que estos microplásticos causen un efecto adverso en la salud del ser humano, al ser introducidos en el organismo a través del consumo de mariscos (se han encontrado en tripas y tejidos de algunos bivalvos comercializados, crustáceos y peces) y productos alimenticios terrestres que los contengan. Se ha demostrado su presencia en la superficie y subsuperficie de células epiteliales, fagocitos subyacentes de la piel y en la superficie de las branquias en truchas, por lo tanto, sería una fuente directa de estos contaminantes el consumo de piel y tejido branquial de peces. Además de en mariscos y peces, se ha encontrado la presencia de microplásticos en alimentos como la sal marina, así como en agua de grifo y agua embotellada (23).

No solo se ha demostrado la introducción de microplásticos a través de la ingesta de alimentos contaminados, sino también a través de su inhalación, que puede causar lesiones pulmonares, llegando a observar microplásticos en tejido pulmonar de pacientes con diferentes cánceres de pulmón (23).

Demostrados los efectos adversos que pueden suponer la presencia de plásticos en nuestro medio ambiente, se han comenzado a tomar medidas legales como: prohibir o disminuir el uso de productos plásticos de un solo uso como botellas o bolsas (23).

5.1.3 Disruptores endocrinos

Se tratan de sustancias que intervienen en la formación, liberación, transporte, acoplamiento, actividad o desplazamiento de hormonas naturales del cuerpo que mantienen la homeostasis, el desarrollo, reproducción y comportamiento de los organismos. En general los disruptores endocrinos son estrogénicos, es decir, imitan o alteran el funcionamiento de estrógenos naturales, androgénicos (copian u obstruyen la testosterona natural) y tiroides (causan efectos inmediatos u oblicuos en la tiroides) (1).

Los EDC se encuentran en aguas residuales en concentraciones inmensamente bajas (a niveles de ng/L y µg/L). Llegan al medio a través de actividades humanas e industriales y no son capaces de ser eliminados por las plantas de tratamiento de aguas. Estos compuestos son de gran preocupación porque se desconoce su impacto a largo plazo en humanos (1).

A continuación, se resumirán efectos nocivos que se han demostrado de las principales sustancias clasificadas como disruptores endocrinos (1):

- *Dietilestilbestrol (DES)*, fármaco utilizado para prevenir abortos, terapia de reemplazo estrogénico y tratamiento del cáncer de próstata: Los embriones de las madres tratadas con este fármaco sufrían una serie de desórdenes en el sistema inmune y reproductor
- *Bisfenol-A (BFA)*, debido a su amplio uso en la industria como, por ejemplo, en la elaboración de bolsas esterilizables, recubrimiento de latas de conserva, material marino, barnices, tintas de impresión, aplicaciones ortopédicas. Tiene efectos estrogénicos en ratas y efectos hormonales que incrementan el riesgo de padecer cáncer en humanos. Actúa como un anti-andrógeno, produciendo como efecto secundario la feminización del hombre

Los efectos nocivos en humanos se pueden resumir en (24):

- En hombres: calidad de semen baja o reducida que se manifiesta con un bajo recuento de espermatozoides, disminución de espermatozoides móviles, bajo volumen eyaculado y elevada proporción de espermatozoides anormales. Así como cáncer testicular, órganos sexuales deformes, criptorquidia, penes anormalmente pequeños e hipospadias
- En mujeres: aumento de casos de cánceres dependientes de hormonas (mama y ovario), enfermedad fibroquística de la mama, síndrome del ovario poliquístico, miomas uterinos y enfermedad inflamatoria de la pelvis

Los disruptores endocrinos causan una serie de anomalías reproductivas y sexuales que pueden conducir a la disminución de especies animales y/o el aumento de la frecuencia de embarazos interrumpidos, dificultad para alcanzar el embarazo o abortos espontáneos. La exposición a estas sustancias en el periodo pre y post natal pueden afectar al desarrollo y señalización del sistema endocrino. Estos efectos son irreversibles y permanentes, por lo tanto, las mujeres en edad fértil pueden suponer una población especialmente sensible, porque las dosis que alcanzan al feto dependerá tanto de lo que ingiera durante el embarazo, como de aquellas sustancias acumuladas en la grasa corporal que podrán transferirse al feto durante el embarazo y/o durante la lactancia (1).

5.3 Destino de los contaminantes emergentes durante el tratamiento de aguas residuales

Los sistemas tradicionales de tratamiento de aguas residuales comprenden una serie de fases (5):

- Tratamiento primario: las sustancias de deshecho sólidas en el agua (sólidos, plásticos, aceites y grasas, arena y arenilla, etc.) se separan mediante procesos mecánicos como son la filtración y la sedimentación. Este tratamiento es común para la mayoría de las plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas.
- Tratamiento secundario: se realiza una degradación biológica (aeróbica o anaeróbica) de los compuestos orgánicos, sustancias o nutrientes. Estos tratamientos pueden variar de una planta de tratamiento a otra. La técnica más utilizada en esta fase es la activación de lodos. En esta, bajo unas condiciones apropiadas, el nitrógeno y las sustancias orgánicas se eliminan a través de la formación de flóculos biológicos que utilizan oxígeno disuelto.
- Tratamiento terciario: En esta etapa el fósforo se puede eliminar por precipitación y filtración. No es común a todas las plantas de tratamiento.

A parte de estos tratamientos convencionales, algunos efluentes de las plantas de tratamiento de aguas, pasan por un proceso de desinfección mediante irradiación UV o cloración antes de descargarlos en el medio ambiente. Pero estos tratamientos no aseguran la eliminación completa de los contaminantes emergentes. La técnica de lodo activado es eficaz en la eliminación de fármacos como el diclofenaco y la carbamazepina, que son resistentes a la degradación (1).

Además de ser ineficaces en la completa eliminación de estos compuestos, procesos biológicos, químicos de degradación y fotolíticos, pueden transformar estos contaminantes en sustancias más tóxicas que su compuesto original (25).

5.4. Eliminación de los contaminantes emergentes.

5.4.1- Tratamiento tecnológico

Treatment processes	Matrix	Compounds detected	Removal efficiency (%)
Activated carbon adsorption	Wastewater water	Bisphenol-A, Diclofenac, Carbamazepine, Sulfamethoxazole	50-100, 80-100 50-100 40-100
Coagulation/flocculation	Drinking water	Acetaminophen, Diclofenac, Erythromycin 17 α -estradiol, Estrone, Ethynylestradiol Musk Ketone, Triclocarban, Oxybenzone	< 20, < 20 < 40 < 40, < 20 < 20 < 20, < 40 < 20
Advanced oxidation process	Wastewater water	Acetaminophen, Diclofenac, Sulfamethoxazole	> 90, > 90 > 90
Ozonation	River water	Galaxolide, Musk Ketone, Estrone, Estradiol, Estriol, 17 α -ethynylestradiol	20-90, 40-70 98-99
	Drinking water	Estrone, Estradiol, Estriol, 17 α -ethynylestradiol	96 99.1-99.8 > 90
	Wastewater	Acetaminophen, Diclofenac, Sulfamethoxazole, Estrone, Estradiol, 17 α -ethynylestradiol	> 90 -100, 95-99
Chlorination	River water	Estrone, Estradiol, Estriol, 17 α -ethynylestradiol	-100
	Drinking water	Acetaminophen, Diclofenac, Sulfamethoxazole, 17 α -estradiol, Estriol, Ethynylestradiol, Oxybenzone, Triclosan	> 90, > 70 > 40 > 90, > 90 > 70 > 90, > 70
Ultraviolet irradiation	Secondary effluent of a sewage treatment plant	Sulfonamides, Macrolides, Tetracyclines, Fluoroquinolones	45-65 20-45 80-95, > 95 80-95, > 95
	Surface water	Trimethoprim, Sulfonamides, Trimethoprim	45-65 80-95 45-65
Nano filtration	Wastewater	Diclofenac, Ibuprofen, Metronidazole, Moxifloxacin, Telmisartan, Tramadol, Roxithromycin, Azithromycin	- 100 > 87

Tabla 1. Eficiencias de eliminación (%) de CE mediante diferentes procedimientos físico-químicos (1).

Las tecnologías para el tratamiento de aguas/aguas residuales pueden dividirse en *eliminación física* (sedimentación, precipitación, adsorción, filtración, intercambio iónico, etc.), *oxidación/desinfección química* (cloración, ozonización, irradiación ultravioleta, etc.) y *transformación biológica* (lodo activado, reactores enzimáticos, etc). Cada tecnología será rentable para un propósito específico (26):

- La cloración es un método económico para la desinfección en agua potable, debido a su poder de protección residual en los sistemas de distribución de agua.
- La ósmosis inversa es un método eficiente para la desalinización del agua del mar

Sin embargo, el agua residual se trata de una matriz muy compleja que contiene materia orgánica, metales, microorganismos, compuestos orgánicos, productos farmacéuticos, etc. y por lo tanto el empleo de una sola tecnología no logrará una desinfección que logre alcanzar la calidad del agua requerida para un modelo circular de gestión del agua. Hay que tener en cuenta que (26):

- Muchos contaminantes emergentes aún no han sido detectados por falta de conocimientos
- No se conocen muchos datos acerca del destino y daño que pueden ocasionar los productos de transformación formados tras el tratamiento de estas sustancias, pudiendo llegar a ser más tóxicos y dañinos que los productos de origen.

El método del lodo activado es el método convencional más utilizado y económico para reducir la materia orgánica carbonosa, nitrogenada y compuestos de fósforo. Sin embargo, el efluente de las plantas de tratamiento, no son capaces de cumplir con los criterios de calidad de las granjas e industrias, ya que el remanente de sales, metales, sólidos en suspensión, nutrientes y contaminantes pueden degradar la calidad del agua y las propiedades de infiltración del suelo requeridas para la producción de cultivos. Por esto se busca un método capaz de hibridar diferentes tecnologías que pueda resultar en una mayor calidad del agua (26).

Un ejemplo de sistema híbrido es el biorreactor de membrana. A un sistema de lodo activado se le añade una membrana de microfiltración/ultrafiltración. De esta forma se presentan ventajas como la disminución de sólidos en suspensión, disminuye la formación de grandes flóculos, lo que reduce la resistencia de transferencia de masa, disminuye también el uso de productos químicos. Las desventajas que presentan es un mayor coste, aunque la mayor calidad de los efluentes y las ventajas comentadas anteriormente pueden justificar su implantación en un futuro (27).

Aunque se han desarrollado muchas pruebas de configuraciones híbridas para investigar su capacidad de eliminación de contaminantes emergentes, las técnicas aún son muy costosas, lo que dificulta su aplicación. Por lo tanto, se necesita una investigación simplificada para encontrar métodos más económicos y ecológico, al igual que los responsables de implantar estas nuevas tecnologías deben estar convencidos que implantar estas nuevas tecnologías, aunque el coste sea mayor que los procedimientos convencionales (26).

Una alternativa interesante es el uso de los denominados “procesos de oxidación avanzada”, que generan radicales altamente oxidantes capaces de convertir prácticamente cualquier compuesto orgánico en sustancias minerales, inocuas para la salud y el medioambiente. Dos de estos procesos son “fotocatálisis” y “foto-Fenton”. En el primero se utiliza un sólido (el fotocatalizador) capaz de absorber luz y generar el potencial químico necesario para llevar a cabo esta transformación. En el segundo, los radicales se generan mediante la descomposición del agua oxigenada en presencia de hierro y luz. La gran ventaja de ambos métodos, además de su actividad descontaminante, es la posibilidad de utilizar la luz solar como fuente de energía para su activación. Basándose en ello, últimamente se ha desarrollado unos catalizadores mesoporosos compuestos de óxidos de titanio y hierro (es decir, con poros de 0,2 a 5 nanómetros de diámetro) capaces de eliminar el antibiótico norfloxacino. Los catalizadores dióxido de titanio (TiO₂), presentan alta capacidad fotocatalítica, y óxido de hierro (Fe₂O₃), es capaz de llevar a cabo el proceso foto-Fenton sin desprender hierro al medio (27).

5.4.2. Tratamiento natural

La calidad del agua está influenciada por los procesos ecológicos en el paisaje y la forma en la que se mueve el agua a través del ecosistema, la formación del suelo, la erosión y el transporte y depósito de sedimentos. Los suelos, las tierras de cultivo y los bosques tienen un papel crucial en el control del movimiento, almacenaje y transformación del agua. (4)

La vegetación es considerada una “recicladora” de agua. Por esto se ha considerado a la naturaleza una posible solución natural al problema de los contaminantes emergentes. Las infraestructuras verdes (naturaleza) y grises (tecnológicas) pueden y deberán funcionar juntas, para mejorar la problemática de los últimos años relacionada con el tratamiento de agua contaminada con sustancias emergentes. (4)

Los bosques, los humedales y las praderas son capaces de reciclar los nutrientes, reducir la carga de sedimentos, capturar y retener los contaminantes, lo que implica un aumento de la calidad del agua, lo que supone un ahorro en el tratamiento del agua. A continuación, se detallan ejemplos de soluciones basadas en la naturaleza (SbN), que ayudan a mitigar problemas relacionados con la contaminación del medio ambiente (4):

- SbN capaces de rehabilitar los servicios de los ecosistemas que permiten una mejor gestión de los nutrientes, dando como resultado la disminución del uso de fertilizantes y reducen la escorrentía y/o la infiltración de nutrientes a las aguas subterráneas.
- Infraestructura verde urbana: muros verdes, jardines en azotea y cuencas de infiltración o drenaje cubiertas de vegetación, que contribuyen al tratamiento de las aguas residuales y a reducir la escorrentía de las aguas pluviales.
- Humedales en entornos urbanos para reducir el impacto de la escorrentía de las aguas residuales y aguas pluviales.
- Los humedales son capaces de inmovilizar y biodegradar contaminantes emergentes y en ocasiones funcionan mejor que las alternativas tecnológicas, llegando a ser la única solución para ciertos productos.

Aunque las SbN son más o menos eficaces, dependiendo del tipo de contaminante y la concentración en la que se encuentre en la naturaleza, las aplicaciones industriales de estas soluciones descritas están aumentando, en particular, el empleo de humedales artificiales. (4)

6. Conclusiones

Para afrontar el problema de los contaminantes emergentes y prevenir sus efectos adversos tanto evidentes como imprevistos en los próximos años, se requiere desarrollar nuevos protocolos para pruebas de ecotoxicidad y medir diferentes efectos utilizando diferentes organismos con criterios de valoración adecuada. Se aconseja que se lleven a cabo estudios más exhaustivos para llenar los vacíos de conocimiento en la conducta de los contaminantes emergentes que sea más eficaz para eliminar. Por ello, se necesita una estrecha colaboración entre los investigadores y las autoridades responsables de decidir qué

tipo de tecnología se empleará en las plantas de tratamiento de aguas residuales, para afrontar el problema de los contaminantes emergentes. Entre las posibles soluciones se encuentran:

- Uso de productos contaminantes, como por ejemplo antibióticos, en casos necesarios y determinados, evitando su uso abusivo.
- Reemplazo de productos contaminantes por alternativas menos contaminantes.
- Establecer nuevos estándares para la calidad de las plantas de tratamiento de aguas residuales.
- Obligar a las autoridades de los sistemas de gestión de aguas a integrar a los consumidores de agua municipales, agrícolas e industriales en un ciclo cerrado.
- Centrarse en la investigación de sistemas híbridos de degradación y eliminación de estos contaminantes de las aguas residuales.
- Dedicar más investigación a la toxicología de contaminantes emergentes, así como el desarrollo de métodos confiables para pruebas de toxicidad en bajas concentraciones.

Con respecto a la prevención y mitigación, se busca mejorar el rendimiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales y regular la liberación de sustancias orgánicas de las industrias (fuentes puntuales) y el escurrimiento agrícola (fuentes difusas). También se intenta reducir por parte de actividades industriales y agrícolas, reemplazar los compuestos tóxicos por otros menos contaminantes.

Bibliografía

1. Gogoi A, Mazumder P, Tyagi VK, Chaminda GT, An AK, Kumar M. Occurrence and fate of emerging contaminants in water environment: A review. *Groundwater for Sustainable Development*. 2018;6:169-80.
2. Pal A, He Y, Jekel M, Reinhard M, Gin KY. Emerging contaminants of public health significance as water quality indicator compounds in the urban water cycle. *Environ Int*. 2014;71:46-62.
3. Unión Europea. Directiva 2000/60/CE del parlamento europeo y del consejo de 23 de octubre de 2000 por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas L 327, 22 de diciembre de 2000, pp. 1-73
4. UNESCO. 2018. "Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos". [en línea] <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261494>. [consultado el 30/04/18]
5. Sousa JC, Ribeiro AR, Barbosa MO, Pereira MFR, Silva AM. A review on environmental monitoring of water organic pollutants identified by EU guidelines. *Journal of hazardous materials*. 2018;344:146-62.
6. Barbosa MO, Moreira NF, Ribeiro AR, Pereira MF, Silva AM. Occurrence and removal of organic micropollutants: an overview of the watch list of EU Decision 2015/495. *Water research*. 2016;94:257-79.
7. Gorito AM, Ribeiro AR, Almeida CMR, Silva AM. A review on the application of constructed wetlands for the removal of priority substances and contaminants of

- emerging concern listed in recently launched EU legislation. *Environmental pollution*. 2017;227:428-43.
8. Gavrilescu M, Demnerová K, Aamand J, Agathos S, Fava F. Emerging pollutants in the environment: present and future challenges in biomonitoring, ecological risks and bioremediation. *New biotechnology*. 2015;32(1):147-56.
 9. Andreu V, Gimeno-García E, Pascual J, Vazquez-Roig P, Picó Y. Presence of pharmaceuticals and heavy metals in the waters of a Mediterranean coastal wetland: potential interactions and the influence of the environment. *Science of the Total Environment*. 2016;540:278-86.
 10. Fendall LS, Sewell MA. Contributing to marine pollution by washing your face: microplastics in facial cleansers. *Marine pollution bulletin*. 2009;58(8):1225-8.
 11. Barceló D, López MJ. Contaminación y calidad química del agua: el problema de los contaminantes emergentes. *Jornadas de presentación de resultados: el estado ecológico de las masas de agua Panel científico-técnico de seguimiento de la política de aguas, Sevilla*. 2008.
 12. Gil MJ, Soto AM, Usma JI, Gutiérrez OD. Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. *Producción + Limpia*. 2012;7:52-73.
 13. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy, *Off. J. Eur. Union* 317 (2000) 1–72.
 14. Directive 2008/105/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2008 on environmental quality standards in the field of water policy, amending and subsequently repealing Council Directives 82/176/EEC, 83/513/EEC, 84/156/EEC, 84/491/EEC, 86/280/EEC and amending Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council, *Off. J. Eur. Union* 348 (2008) 84–97.
 15. Directive 2013/39/EU of the European Parliament and of the Council of 12 August 2013 amending Directives 2000/60/EC and 2008/105/EC as regards priority substances in the field of water policy, *Off. J. Eur. Union* 226 (2013) 1–17.
 16. Decision 495/2015/EU of 20 March 2015 establishing a watch list of substances for Union-wide monitoring in the field of water policy pursuant to Directive 2008/105/EC of the European Parliament and of the Council, *Off. J. Eur. Union* 78 (2015) 40–42..
 17. Noguera-Oviedo K, Aga DS. Lessons learned from more than two decades of research on emerging contaminants in the environment. *Journal of hazardous materials*. 2016;316:242-51.
 18. Nichols JW, Du B, Berninger JP, Connors KA, Chambliss CK, Erickson RJ, et al. Observed and modeled effects of pH on bioconcentration of diphenhydramine, a weakly basic pharmaceutical, in fathead minnows. *Environmental toxicology and chemistry*. 2015;34(6):1425-35.
 19. Tejada C, Quiñonez E, Peña M. Contaminantes Emergentes en Aguas: Metabolitos de Fármacos. Una Revisión. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*. 2014;10(1):80-101.
 20. Archer E, Petrie B, Kasprzyk-Hordern B, Wolfaardt GM. The fate of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs), endocrine disrupting contaminants (EDCs), metabolites and illicit drugs in a WWTW and environmental waters. *Chemosphere*. 2017;174:437-46.
 21. Ebele AJ, Abdallah MA-E, Harrad S. Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in the freshwater aquatic environment. *Emerging Contaminants*. 2017;3(1):1-16.

22. Rosi-Marshall E, Snow D, Bartelt-Hunt SL, Paspalof A, Tank J. A review of ecological effects and environmental fate of illicit drugs in aquatic ecosystems. *Journal of hazardous materials*. 2015;282:18-25.
23. Karbalaeei S, Hanachi P, Walker TR, Cole M. Occurrence, sources, human health impacts and mitigation of microplastic pollution. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018;25(36):36046-63.
24. Andrade-Ribeiro AL, Pacheco-Ferreira A, da Cunha CLN, Mendes-Kling AS. Disruptores endocrinos: potencial problema para la salud pública y medio ambiente. *Revista Biomédica*. 2006;17(2):146-50.
25. Schlüter-Vorberg L, Prasse C, Ternes TA, Mückter H, Coors A. Toxification by transformation in conventional and advanced wastewater treatment: the antiviral drug acyclovir. *Environmental Science & Technology Letters*. 2015;2(12):342-6.
26. Taheran M, Naghdi M, Brar SK, Verma M, Surampalli RY. Emerging contaminants: Here today, there tomorrow! *Environmental nanotechnology, monitoring & management*. 2018.
27. García-Muñoz P, Zussblatt Niels P, Pliego G, Zazo JA, Fresno F, Chmelka Bradley F, Casas JA. Evaluation of photoassisted treatments for norfloxacin removal in water using mesoporous Fe₂O₃-TiO₂ materials. *Journal of Environmental Management* 238. 2019; 243. DOI: 10.1016/j.envman.2019.02.109
28. Bertanza G, Canato M, Laera G, Vaccari M, Svanström M, Heimersson S. A comparison between two full-scale MBR and CAS municipal wastewater treatment plants: techno-economic-environmental assessment. *Environmental Science and Pollution Research*. 2017;24(21):17383-93.