



Microcontaminantes químicos más habituales en las aguas residuales: origen y gestión

Este artículo presenta un breve recorrido sobre los contaminantes químicos más habituales en las aguas residuales, tanto urbanas como de procedencia industrial. A este tipo de microcontaminantes se los denomina actualmente 'contaminantes de preocupación emergente' (CPE). Entre ellos cabe destacar, además de los conocidos metales pesados y compuestos organometálicos, a fitosanitarios y plaguicidas, disolventes orgánicos, compuestos orgánicos de síntesis, plastificantes y preservantes de superficies, fármacos, antibióticos, medicamentos, e incluso drogas, sustancias adictivas y microplásticos. También debe destacarse que muchos de estos compuestos químicos tienen carácter de disruptores endocrinos con una potencial e indeseable afección tanto sobre el ser humano como sobre la biota de los medios acuáticos. En cuanto a su origen, proceden tanto del uso industrial como del ámbito doméstico, cada vez de forma más acusada. Finalmente, su gestión comporta su eliminación o reducción a niveles emisivos admisibles en las estaciones de depuración de aguas residuales industriales (EDARI) o bien en las propias estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) municipales si no se ha hecho antes en origen, así como su reutilización siempre que ello fuese posible. Además, y paralelamente, una mayor calidad de las aguas depuradas sin duda podrá favorecer y potenciar los diversos usos de las aguas regeneradas en nuestro entorno.

Palabras clave

Aguas residuales, compuestos de preocupación emergente, EDAR, EDARI, RD 817/2015, RD 508/2007, Reglamento de Reutilización 2020/741 (UE), Propuesta Directiva Europea de Aguas Residuales.

CHEMICAL MICROPOLLUTANTS MORE FREQUENT IN WASTEWATER: ORIGIN AND MANAGEMENT

In this paper we will carry out a review about the chemical pollutants more frequent in wastewater, in both urban wastewater and industrial ones. In this way these pollutants are named now as emerging concern compounds. This group is integrated for very substances such as: loud metals, organometal compounds, pesticides, organic solvents, organic synthetic compounds, plasticizers and surface preservatives, pharmaceutical products, antibiotics, and even drugs, addiction substances and microplastics. It is be said that a lot of these substances have endocrine disruption effect with a potential risk over humans and environmental biota. Origin of chemical micropollutant to wastewater can be as from industrial products as well from domestic products: in this sense, homes are actually a very relevant source of chemical to sanitations. Once chemicals are in wastewater, they may be discarded of water through treatment in municipal wastewater treatment plants, or better, before to come to sanitation being treated into producer industries (pollutants origin control). Moreover, if possible, chemicals could be concentrated promoting reuse. Finally, the higher quality of treated wastewater will be positive to favor the regeneration of this recurse and its contribution as a routine source available to society.

Keywords

Waste water, emerging concern compounds, WWTP, IWWTP, RD 817/2015, RD 508/2007, European Regulation 2020/741 (UE), Proposal of European Directive of Wastewater.

Rafael Marín Galvín
responsable de Control
de Calidad de la Empresa
Municipal de Aguas
de Córdoba, S.A. (Emacsa)



1. INTRODUCCIÓN

1.1. MICROCONTAMINANTES QUÍMICOS, ¿DÓNDE ESTÁN?

Los microcontaminantes químicos más relevantes en las aguas residuales entran entre los que se conocen como 'contaminantes de preocupación emergente' (CPE). Son, en general, aquellos contaminantes desconocidos, o no reconocidos como tales, cuya presencia en el medio ambiente no es nueva, pero sí la preocupación y el control por sus posibles consecuencias. Como características principales comparten: manifestarse al poder contar con nuevos y más sensibles equipos y métodos de análisis; estar cada vez más regulados; su elevada producción y consumo, y su continua introducción en el medio ambiente; un uso tanto a escala industrial como doméstica; no necesitar ser persistentes para ocasionar efectos nocivos de índole carcinogénica y mutagénica, o disrupción endocrina; y una amplia dispersión en el medio. La **Tabla 1** presenta una aproximación a la tipología de los microcontaminantes químicos presentes en diversos productos de uso habitual en hogares e industrias.

Tradicionalmente, la emisión de microcontaminantes químicos, y en general de contaminación a las aguas residuales, se ha adscrito al sector industrial. Así, en la **Figura 1** se presenta una gráfica sobre los sectores industriales más contaminantes, donde la industria alimentaria y de fabricación de materiales no metálicos de base se sitúan al frente. No obstante, esta situación ha ido cambiando paulatinamente en los últimos 20 años al disponerse en el mercado, y emplearse profusamente en hogares, múltiples productos limpiadores, desengrasantes, deter-

TABLA 1 BREVE RESUMEN DE LA TIPOLOGÍA DE LOS MICROCONTAMINANTES QUÍMICOS PRESENTES EN DIVERSOS PRODUCTOS DE USO HABITUAL EN HOGARES E INDUSTRIAS.	
Productos de uso habitual doméstico e industrial	Compuestos químicos presentes en los productos comerciales
Productos farmacéuticos Antibióticos Analgésicos Antiinflamatorios	Eritromicina, azitromicina, aspirina, ibuprofeno, diclofenaco y aceclofenaco, diazepam,propranolol, codeína, paracetamol, amoxicilina, hidroclorotiazida, claritromicina, ciprofloxacina, venlafaxina...
Drogas ilegales	Cocaína, heroína, metanfetamina, morfina, éxtasis, etc.
Sustancias adictivas	Cafeína, teobromina y similares, edulcorantes...
Hormonas sexuales	Esteroides, estrógenos
Anticonceptivos	Estrona, estriol, estradiol, dietilbestrol...
Productos personales Perfumes Protección solar	Hidrocarburos aromáticos policíclicos, Benzofenona N,N-dietil-toluamida
Insecticidas, fungicidas	Cipermetrina, endosulfán, hexaclorociclohexano, triluoralina, simazina y atrazinas, clorpirifós, fipronil, tributilestaño... Imazoilo, metconazol, famoxadona (fungicidas)...
Antisépticos	Triclosan, clorofeno, clorhexidina, povidona, merbromina y similares...
Detergentes y metabolitos asociados	Alquilfenoles, nonilfenoles...
Retardantes de llama	Difeniletil éteres polibromados, bisfenol-A, tris(2-cloroetil)fosfato...
Aditivos de la gasolina	Metil-t-butil éter...
Pinturas, tóner de impresoras	Nonilfenoles, metales pesados
Baterías eléctricas, soldaduras, explosivos, joyería y bisutería	Metales pesados (Cd, Hg, Ni, Pb, Zn, Cr)
Aditivos y productos industriales	AEDT, sulfonatos aromáticos, PFA, cloroalcanos, difeniléteres-bromados...
Tuberías de plástico	Polipropileno, PVC, polietileno, poliuretano... Tributilestaño...
Subproductos desinfección aguas	Yodo, bromatos THM, cloritos-cloratos, ácidos haloacéticos, halonitros, bromoaldehídos, NDMA

FIGURA 1. Aportaciones de contaminantes al medio desde la industria (fuente: Internet).



gentes, productos cosméticos, desinfectantes del hogar, fármacos, plaguicidas, aerosoles, etc., que en su formulación contienen en diferente medida compuestos tipificados como microcontaminantes químicos (Figura 2).

1.2. MICROCONTAMINANTES QUÍMICOS: REVISIÓN

A continuación se pasa revista brevemente a los principales microcontaminantes químicos.

1.2.1. Metales pesados y compuestos organometálicos

Los más relevantes pueden ser Cd, Cr, Hg, Pb, Ni, Cu y Zn. En general se emplean en baterías eléctricas, pigmentos, estabilizantes para plásticos, componentes eléctricos, soldaduras, catalizadores, termómetros, fabricación de vidrios, insecticidas, usos médicos, joyería y bisutería, y en el caso del Pb como aditivo en gasolinas. Además, los compuestos de butilestano se emplean como antiincrustantes, como estabilizantes de plásticos o como funguicidas o insecticidas. Finalmente, los compuestos organoestánicos se usan en galvanoplastia y fabricación de vidrios, cerámicas, colorantes y como estabilizante en jabones, perfumes y pastas dentífricas. En este sentido, hay metales no pesados, tipo litio, de amplio uso actualmente en baterías de equipos electrónicos.

1.2.2. Plaguicidas y fitosanitarios

Se consideran aquí tres grupos mayoritarios: organoclorados, organonitrogenados y organofosforados. En cuanto a los primeros, del tipo de endosulfán, hexaclorobenceno, hexaclorociclohexano, pentaclorobenceno, pentaclorofenol y trifluorralina, se usan como insecticidas,

FIGURA 2. Disponibilidad de adquisición de productos domésticos de uso habitual, que son fuentes de microcontaminantes químicos.



acaricidas y herbicidas, además de como dieléctricos, como retardantes de llama, como preservantes de madera, en fabricación de explosivos y como aditivos de cauchos y similares.

En relación con los nitrogenados, como alacloro, simazina y atrazinas, diruón e isoproturón, son herbicidas típicos (uso doméstico e industrial). Finalmente, clorfenvinfós y clorpirifós, como más relevantes de los organofosforados, son insecticidas de uso tanto doméstico como industrial.

1.2.3. Compuestos orgánicos volátiles

Se incluyen como más importantes al cloroformo, 1,2-dicloroetano, diclorometano, hexaclorobutadieno y triclorobenceno. Sus usos generales

son los de anestésicos, fabricación de colorantes, preparación de productos farmacéuticos y plaguicidas, aditivos de gasolinas, decapado de pinturas, producción de textiles, preservantes de superficies y uso como dieléctricos.

1.2.4. Alquifenoles

Corresponden a nonilfenoles y octilfenoles, usados en detergentes, textiles y manufactura de cueros, pinturas, espermicidas y fabricación de plaguicidas.

1.2.5. Hidrocarburos aromáticos policíclicos

Los cinco HAP típicos son benzo(a)pireno, benzo(b)- y benzo(k)fluoranteno, benzo(g,h,i)perileno, e indeno(1,2,3-cd)pireno, siendo todos ellos subproductos de la combustión incompleta de materia orgánica y de los combustibles fósiles.

También se incluyen en este grupo al antraceno, naftaleno y fluoranteno, que en general también proceden de la combustión de materia orgánica, siendo además empleados como aditivos de PVC o repelentes de insectos, y usados también en colorantes fluorescentes.

1.2.6. Otros compuestos orgánicos

Con respecto a los cloroalcanos de 10 a 13 carbonos, se usan como retardantes de llama, refrigerantes, aceites de corte para metales, aditivos en cauchos, pinturas y selladores. En cuanto al di(etilhexil)ftalato se emplea como aditivo de PVC y cosméticos, en suelos, papeles pintados, muebles, ropa, juguetes y perfumes. Finalmente, los difeniléteres bromados son retardantes de llama, empleándose en fabricación de plásticos, espumas y componentes eléctricos y electrónicos.



1.2.7. Drogas ilegales o de abuso, y sustancias adictivas

Desde 2005 algunos estudios revelan la presencia de pequeños niveles de diversas drogas ilícitas en aguas superficiales de ríos en Italia, España, Alemania, Reino Unido, Estados Unidos, Austria y Bélgica entre otros. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) las más utilizadas actualmente pueden ser: marihuana, cannabis, cocaína, fentanilo, inhalantes (pegamentos), heroína, crack, estimulantes (ritalina), polvo de ángel (fenciclidina) y depresores.

Además, hay que considerar ahora otras sustancias adictivas tales como el café, té y tabaco, así como edulcorantes asociados a su consumo (sacarina, ciclamato y sucralosa) cuyas trazas se suelen detectar habitualmente en las aguas residuales urbanas.

Todas estas sustancias de uso desafortunadamente habitual, o sus metabolitos, pueden llegar vía fisiológica a las aguas residuales urbanas e incluso naturales.

1.2.8. Compuestos diversos que actúan como disruptores endocrinos

La Unión Europea (UE) ha elaborado una lista de 680 sustancias que se conocen o sospechan que puedan ser disruptores endocrinos. Además, tanto la UE como Estados Unidos han puesto en marcha un programa para evaluar unas 100.000 sustancias comercializadas en Europa. Dicho esto, existen dos grandes grupos de disruptores endocrinos: naturales y artificiales. Los naturales son las hormonas esteroides, bien masculinas o femeninas. Las masculinas se denominan andrógenos, y comprenden testosterona, aldosterona, cortisol y dehidroepiandrosterona. Entre las femeninas o estrógenos están

estradiol, 17-diona, 17- β -estradiol, progesterona y estríol.

En cuanto a las hormonas esteroideas artificiales, se pueden citar 17- β -etinilestradiol y 4-androsteno-3 (femeninos), y oxandrolona y nandrolona (masculinos), así como otra serie de compuestos de diversa tipología tales como: plaguicidas, nonilfenoles, bisfenol-A, dioxinas y furanos, disolventes orgánicos, estirenos y otros plásticos, ftalatos, bifenilos policlorados, tributilestaño o resorcinol.

1.2.9. Microplásticos en aguas naturales y residuales

Son restos plásticos de menos de 5 mm de tamaño (<1 mm según nueva definición de ISO) y se trata de partículas primarias en origen, o secundarias procedentes de la desintegración de elementos plásticos más grandes vía física, UV, térmica, química o microbiana. Se han encontrado tanto en aguas oceánicas libres (Ártico y Antártida) como en profundidades abisales y aguas dulces, flotando en superficie, en suspensión o sedimentados en el fondo en función de su densidad.

Los microplásticos se utilizan en productos de cuidado personal (pasta dentífrica, cremas faciales y exfoliantes), textiles sintéticos, tintas de impresión, esprays, molduras de inyección y abrasivos. Las fuentes más comunes de basuras plásticas son el transporte naval, pesca, acuicultura, plataformas petrolíferas y cruceros (origen marino), y las aguas residuales, agricultura y horticultura y vertederos ilegales (origen terrestre). Una vez en el océano, son ingeridos por organismos marinos filtradores (ostras y mejillones) dificultando su digestión y progresando en la cadena trófica (ballenas, tortugas...). Los

microplásticos más frecuentes son: polietileno (PE), tereftalato de polietileno (PET), PVC, polipropileno (PP), poliestireno (PS), poliuretano (PU) y policarbonatos (PC). Los microplásticos también contienen aditivos para mejorar sus prestaciones y pueden absorber contaminantes orgánicos (DDT, PCB, HAP) más o menos tóxicos.

1.2.10. Compuestos orgánicos más actuales

Con respecto al bisfenol-A (2,2-bis-(4-hidroxifenil)-propano) es un compuesto empleado para fabricación de resinas epoxi y plásticos del tipo policarbonatos, empleándose en latas y botellas para líquidos, e incluso biberones infantiles. También se usa en construcción y sector naval, siendo considerado por la UE como disruptor endocrino.

En cuanto a los PFA o perfluoroalquilos o perfluoroalquiléteres con 4 o más C, se fabrican desde 1940, empleándose en utensilios de cocina (teflón), envases alimentarios, antiadherentes, repelentes de manchas, ceras, pinturas, limpieza y espumas contra incendios. Son muy persistentes en el medio (los 'químicos eternos') y se bioacumulan en peces, animales y humanos. Pueden provocar en animales, y probablemente humanos, afecciones sobre la reproducción, desarrollo embrionario, hígado, riñón, sistema inmune y tiroides.

Finalmente, los ácidos haloacéticos son subproductos típicos de la cloración de las aguas derivados del ácido acético por sustitución de H del grupo metilo por cloro o bromo fundamentalmente. Son muy volátiles y se generan en mayor medida a pH ácido y en aguas con mucha materia orgánica, y especialmente en primavera-verano con aguas a potabilizar ricas en fitoplancton.

2. LOS MICROCONTAMINANTES QUÍMICOS EN LAS NORMATIVAS SOBRE AGUAS NATURALES Y RESIDUALES

Los microcontaminantes químicos, dentro de la tipología genérica de los compuestos de preocupación emergente, se encuentran ampliamente regulados en varios ámbitos acuáticos: aguas naturales, aguas residuales depuradas (un contribuyente mayoritario a estos medios) y aguas de consumo (aspecto que no se trata en este artículo).

En el apartado de las aguas naturales, la normativa aplicable es actualmente el RD 817/2015 sobre Normas de Calidad Ambiental, que a su vez traslada al cuerpo legislativo español la correspondiente Directiva Europea 2008/105/CE del Parlamento Europeo y del Consejo. En esta norma se recogen todos los compuestos con limitaciones de emisión al medio acuático. Según su incidencia negativa sobre los ecosistemas acuáticos, las sustancias se clasifican como prioritarias peligrosas (por ejemplo, antraceno, cadmio, endosulfán, tributilestano), prioritarias (atrazina, diclorometano, plomo, cipermetrina) y otros contaminantes (tetracloruro de carbono, aldrín y similares, tricloroetileno y tetracloroetileno). En general, el grado de toxicidad ambiental de las sustancias va en sentido descendente (prioritarias peligrosas > prioritarias > otros contaminantes) y las concentraciones limitadas más bajas suelen corresponder a los más contaminantes.

Además, existe otro grupo de contaminantes específicos para cada estado de la UE en concreto, que se denominan sustancias preferentes, y que en el caso de España contempla por ejemplo entre otros, a etilbenceno, selenio, clorobenceno y cobre. Como resumen de todo lo

Categoría 1 (sustancias que pueden tratarse con mucha facilidad)	Categoría 2 (sustancias que pueden eliminarse con facilidad)
Amisulprid (nº CAS 71675-85-9)	Benzotriazol (nº CAS 95-14-7)
Carbamazepina (nº CAS 298-46-4)	Candesartán (nº CAS 139481-59-7)
Citalopram (nº CAS 59729-33-8)	Irbesartán (nº CAS 138402-11-6)
Claritromicina (nº CAS 81103-11-9)	Mezcla de 4-metilbenzotriazol (nº CAS 29878-31-7) y 5-metil-benzotriazol (nº CAS 136-85-6)
Diclofenaco (nº CAS 15307-86-5)	
Hidroclorotiazida (nº CAS 58-93-5)	
Metaloprolol (nº CAS 37350-58-6)	
Venlafaxina (nº CAS 93413-69-5)	

dicho, metales pesados, plaguicidas, orgánicos de síntesis, disolventes, fármacos y antibióticos son los compuestos químicos integrantes de esta normativa.

Aparte de todo ello, existen actualizaciones periódicas de nuevos compuestos químicos limitados desde el RD de normas de calidad ambiental, en formato de listas de observación correspondientes a 2018, 2020 y 2022 y que han incluido diversas sustancias tales como: amoxicilina y clindamicina (antibióticos); clotrimazol y famoxadona (antimicóticos); diclofenaco (fármacos); 17-β-estradiol y estrona (hormonas); fipronil y diflufenicán (plaguicidas); y butil-metoxidibenzoilmetano y benzofenona (protectores solares).

En cuanto a la consideración de los contaminantes en las aguas residuales depuradas (el principal aporte a los medios acuáticos libres), la normativa genérica aplicable es el RD 509/1996 que limita las emisiones de contaminación biodegradable (DBO₅, DQO, sólidos en suspensión, nitrógeno y fósforo). La normativa aplicable para los CPE, si bien solo

para EDAR de 100.000 habitantes equivalentes (he) de capacidad de tratamiento, es el Reglamento Europeo de Emisiones y Fuentes Contaminantes al Medio o Reglamento E-PRTR (RD 508/2007). Obsérvese que aquí la cuantificación de compuestos se hace por carga, y no por concentración. Es decir, se informa sobre las emisiones computadas por kg/año de sustancia no imponiéndose sanciones, sino solo la obligación de trasladar los datos a la administración, que a su vez los enviará a la UE.

En el E-PRTR se incluyen compuestos contaminantes convencionales, por ejemplo, cloruros, fluoruros, nitrógeno y fósforo, y CPE propiamente dichos tales como metales pesados, disolventes, compuestos orgánicos de síntesis, fitosanitarios y plaguicidas. A destacar que no se consideran fármacos ni antibióticos y que existe mucha coincidencia en compuestos con los considerados en la normativa reseñada para aguas en cauces libres.

Es interesante señalar en este momento que en la nueva Directiva de Aguas Residuales, actualmente en



curso de elaboración en la UE y cuyo texto ya ha sido aprobado por el Parlamento Europeo en noviembre de 2023, se incluirá la determinación periódica de diversos microcontaminantes químicos concretos, los cuales se pueden cotejar en la **Tabla 2**.

3. GESTIÓN DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES Y SU DEPURACIÓN

Existe una gran variedad de procesos y técnicas de carácter químico o fisicoquímico que se pueden aplicar a fin de depurar aguas residuales y efluentes de procedencia industrial en función de sus características concretas. A continuación se realiza una breve revisión de todas las disponibles, indicando algunas ideas muy generales sobre ellas.

3.1. PRECIPITACIÓN QUÍMICA

La precipitación química es aplicable para la eliminación de metales que precipiten bien como carbonatos o bien como sulfuros mediante alcalinización del medio. Son los casos de Fe, Sn, Ag, Hg, Ni, Zn, y Cu. Con la precipitación química se logran altos rendimientos de eliminación de metales, incluso a valores de pH más bajos que los estequiométricos, y aún en presencia de compuestos y sustancias químicas con capacidad de formar complejos metálicos. Con respecto al empleo del sulfuro, su principal inconveniente radica en la posible formación de H_2S , con lo que se reserva para casos muy concretos (**Figura 3a**).

3.2. COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN

Los procesos de coagulación-floculación y sedimentación subsiguiente (es decir, el tratamiento químico en aguas residuales urbanas, con adición de sales de Fe o Al) pueden emplearse para reducir altas cargas

FIGURA 3. Decantador para coagulación-floculación (a) y flotador (b).



orgánicas, incluso cargas con un alto porcentaje de biodegradabilidad, contando con la ventaja adicional de que además los efluentes puedan presentar un contenido importante de metales u otros compuestos inorgánicos, que también se separarían colateralmente (**Figura 3a**).

3.3. FLOTACIÓN

La flotación es un proceso consistente en adicionar al sistema sustancias coagulantes, en general sales de Al o Fe, pero dosificando paralelamente una sustancia surfactante, al mismo tiempo que se procede a inyectar aire en forma de finas burbujas desde el fondo del sistema o tanque de flotación empleado. Este proceso sirve para eliminar grasas y aceites, tanto vegetales como sintéticos (como las taladrinas) de efluentes de industrias variadas, tan dispares como alimentarias (precocinados, aceiteras) o metálicas (transformados de cobre) (**Figura 3b**).

3.4. CEMENTACIÓN

La cementación discurre procediendo a poner en contacto el efluente residual con chatarra de hierro, de tal forma que se promueve la sustitución del Fe^{2+} presente en la chatarra, por iones metálicos del agua residual, los cuáles quedarían depositados sobre aquella superficie metálica de desecho que posteriormente sería retirada del sistema. Se trata de un proceso electroquímico. En todo caso, esta técnica tiene la ven-

taja de la reutilización de un residuo de amplia generación en la sociedad actual, es decir, de la chatarra, que de esta forma es valorizada consiguiendo un rendimiento suplementario y aumentando su vida útil.

3.5. COMPLEJACIÓN

Las técnicas de complejación se basan en procesos químicos de formación de moléculas de un determinado tipo, denominadas complejos de coordinación que se generan entre iones metálicos y sustancias químicas complejantes, o quelatantes como un caso especial de las primeras (AEDT, difenilcarbocida, citratos, etc.). Recuérdese que en un complejo el átomo metálico se une covalentemente a una o en general a varias moléculas complejantes, que en el caso de los quelatantes, poseen varios grupos de unión por molécula a cada átomo metálico.

La complejación o quelatación es una técnica enfocada para eliminación de especies químicas, tanto las inorgánicas (o iones metálicos) adicionando complejantes orgánicos, como las especies orgánicas presentes ahora mediante la adición de iones metálicos o compuestos inorgánicos.

3.6. ADSORCIÓN

Se entiende por adsorción la propiedad de algunos materiales de fijar superficialmente moléculas extraídas de la fase líquida o gaseosa en contacto con ellos. El adsorbente más

empleado en tratamiento de aguas es el carbón activo usándose además otros adsorbentes inorgánicos (por ejemplo, sepiolita, tierra de diatomeas, vidrios manganosos). También pueden emplearse microorganismos fijados sobre un sustrato o matriz inerte, en este caso para eliminar sustancias orgánicas o inorgánicas específicas por las que el microorganismo presente alta afinidad, en este caso generalmente, proteínas, azúcares, enzimas, etc. (Figura 4).

FIGURA 4. Fundamento de la adsorción sobre carbón activo (izquierda) y equipos industriales de filtración-adsorción sobre carbón activo granular (derecha).



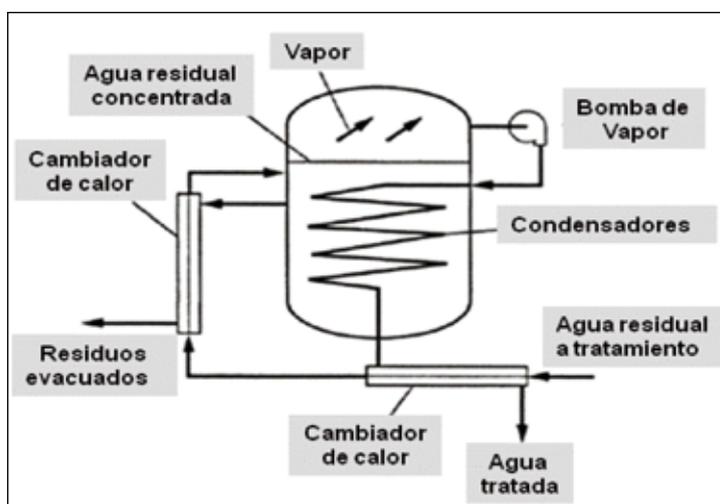
3.7. EXTRACCIÓN CON DISOLVENTES

En las técnicas extractivas se hace uso de los coeficientes de reparto de una sustancia dada frente a otra u otras, es decir, de su distinta afinidad con relación a los componentes existentes en mezclas de sustancias variadas. Para ello suelen emplearse compuestos orgánicos activos para extraer otros compuestos orgánicos o inorgánicos contaminantes del efluente. Así mismo, la extracción de especies metálicas puede llevarse a cabo mediante procesos de solvatación (que es el proceso de asociación de moléculas de un disolvente con moléculas o iones de un soluto -en este caso, especie metálica-), complejación, quelatación, intercambio aniónico o intercambio catiónico.

3.8. EVAPORACIÓN-DESTILACIÓN

Este proceso podría aplicarse solo en el caso de vertidos suficientemente concentrados en el contaminante a eliminar, y siempre que su punto de ebullición fuese apreciablemente distinto al del agua. Existen cuatro modos típicos de operación: destilación al vacío, destilación a presión atmosférica, en circuito abierto y en circuito cerrado. En la práctica la destilación se emplea más para recuperar un contaminante valioso

FIGURA 5. Esquema de un destilador industrial.



que como técnica depuradora (Figura 5).

3.9. INTERCAMBIO IÓNICO

En los procesos de intercambio iónico el sólido intercambiador es una matriz porosa con cargas fijadas a ella. Arcillas hidratadas con reemplazo isomorfo del silicio por aluminio, o del aluminio por magnesio, dan lugar a cargas negativas netas, constituyendo partículas capaces de actuar como intercambiadores iónicos naturales. El agua incluida en la matriz constituye un medio acuoso distinto del seno de la disolución, en el que la electroneutralidad se mantiene por inclusión de un exceso de contraiones provenientes del seno

de la disolución. Existen tres tipos de resinas que se emplean habitualmente en depuración de vertidos industriales:

- Resinas catiónicas, que intercambian especies químicas cargadas positivamente (orgánicas e inorgánicas).
- Resinas aniónicas, que intercambian especies químicas cargadas negativamente (orgánicas e inorgánicas).
- Resinas quelatantes, que contienen grupos funcionales como el imino-diacético, la amidoxina y el amino-fosfónico y forman por lo tanto quelatos con las sustancias presentes en el agua residual.



FIGURA 6. Esquema del funcionamiento de intercambiadores iónicos en tratamiento de aguas. La eliminación de cationes genera agua blanda y la eliminación de aniones genera agua desmineralizada.

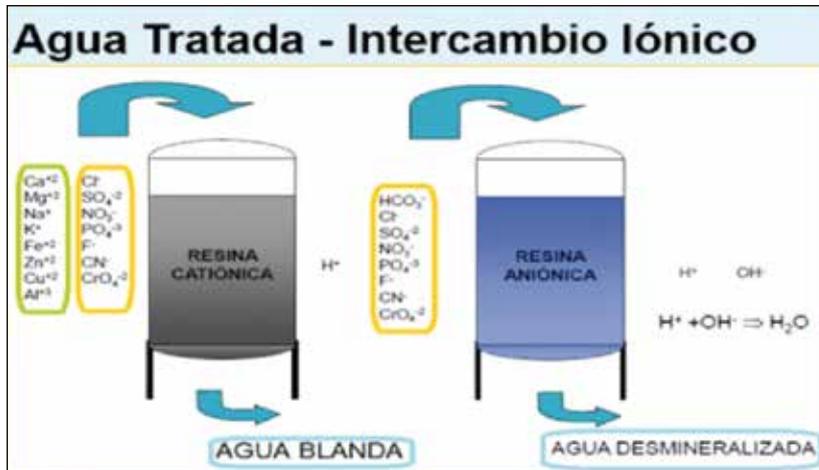
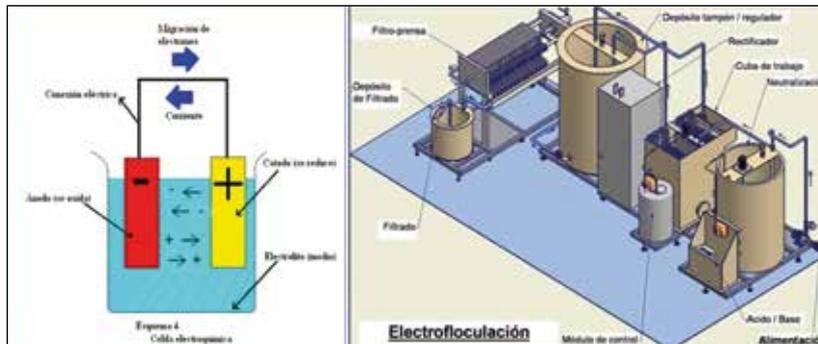


FIGURA 7. Procesos electrolíticos en depuración de aguas. Esquema general (izquierda) y el caso concreto de la electrofloculación (derecha).



El intercambio iónico se lleva a cabo en columnas de lecho fijo con relleno específico en función del contaminante concreto, empleándose series de columnas con propiedades intercambiadoras complementarias para incrementar el rendimiento del sistema aplicado (**Figura 6**).

3.10. TRATAMIENTOS ELECTROLÍTICOS

En estos tratamientos se utiliza la posibilidad de que las especies del agua residual a eliminar sean capaces de experimentar procesos de oxidación o reducción química (intercambio de e⁻) mediante la aplicación de un potencial eléctrico generado entre dos conductores inmersos en el efluente

industrial a tratar. Los componentes de un sistema de electrólisis son: célula electrolítica; electrodos; diafragma o elemento que separa las dos zonas de la disolución, una concentrada en el contaminante y la otra más diluida; elementos productores de turbulencia; y rectificadores de corriente.

A su vez, los electrodos pueden operar bidimensionalmente (placas paralelas, discos, lecho fluido...) o tridimensionalmente (electrodos porosos, de lecho compacto...), como se observa en la **Figura 7a**). Ejemplos típicos de eliminación de metales contaminantes presentes en diferentes vertidos son los casos del Zn, Cu y Ag, en los que se suele trabajar

en rangos de valores de pH ácidos y con voltajes aplicados de hasta 3 V y superiores.

Otra aplicación de la electrólisis es la del proceso de electrofloculación en que el reactivo coagulante se genera vía electroquímica en el propio vertido residual rico en metales (**Figura 7b**).

3.11. PROCESOS DE MEMBRANA

Se trata de procesos de índole física y su eficacia y el tipo de membrana lo marca el tamaño de la separación de compuestos buscada (**Figura 8**). Aquí se incluyen la ultrafiltración y nanofiltración, la ósmosis inversa, y la electrodiálisis. En cuanto a la ósmosis inversa, cabe recordar que se aprovecha la presión aplicada al líquido la cual ha de superar la presión osmótica del mismo. En ultrafiltración se trabaja con presiones más bajas, consiguiéndose la separación en función de tamaño molecular. Finalmente, en la electrodiálisis se aplica un campo eléctrico continuo sobre membranas selectivas (**Figura 9**). Aplicaciones típicas de estas técnicas son la desalación o desmineralización de aguas y vertidos en general, tales como la eliminación de sodio, fluoruro, ácido bórico, cianuros, eliminación-recuperación de cromo en vertidos de curtidos, y recuperación de ácidos minerales en efluentes muy ácidos.

3.12. PROCESOS AOX

En estas técnicas se involucra la generación y empleo de radicales libres como agentes oxidantes (especialmente el radical hidroxilo OH[·]) y se usan para lograr oxidaciones que no son llevadas a cabo por técnicas convencionales con reactivos oxidantes típicos. El radical hidroxilo presenta un alto poder oxidante que lo hace reaccionar con muchos sus-

tratos a los que oxida prácticamente hasta mineralización total. Se trata de procesos poco selectivos pero capaces de actuar con alta eficacia sin condiciones más extremas de temperatura y presión, presentando además la ventaja de apenas generar subproductos problemáticos y contaminantes.

Existen dos tipos de tecnologías de oxidación avanzada: las que emplean ozono y las que no lo emplean. En todo caso, las tecnologías más aplicadas hoy día son las de O₃-UV, O₃-H₂O₂, UV-H₂O₂ y procesos Fenton y foto-Fenton (con uso de chatarras de hierro, lo que les da un valor medioambiental añadido).

4. SOBRE LAS AGUAS REGENERADAS

La reutilización de aguas regeneradas en España se sitúa, según los últimos datos de la Asociación Española de Abastecimiento y Saneamientos (AEAS) en el 8,1% (343 hm³ de un total de 4.216 hm³ de agua depurada). Se trata de mejorar el tratamiento aplicado a un agua residual urbana depurada para posibilitar su uso. En España ya se contaba con un RD de reutilización (RD 1620/2007), pero la publicación del Reglamento Europeo 2020/741 (UE) ha modificado el marco aplicable estando en elaboración un nuevo RD español.

Contando con la alta exigencia en cuanto a la calidad del agua regenerada derivada de la norma europea, el tratamiento del agua residual depurada deberá ser más mucho complejo. En este sentido, la línea de proceso aplicable podría esquematizarse como sigue:

- 1. Agua residual depurada procedente de una EDAR municipal convencional.

FIGURA 8. Gradación del uso de membranas en función del tamaño del compuesto.

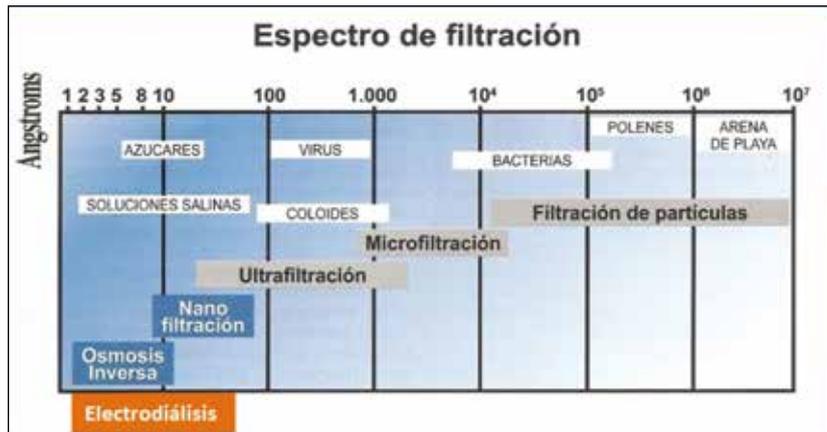
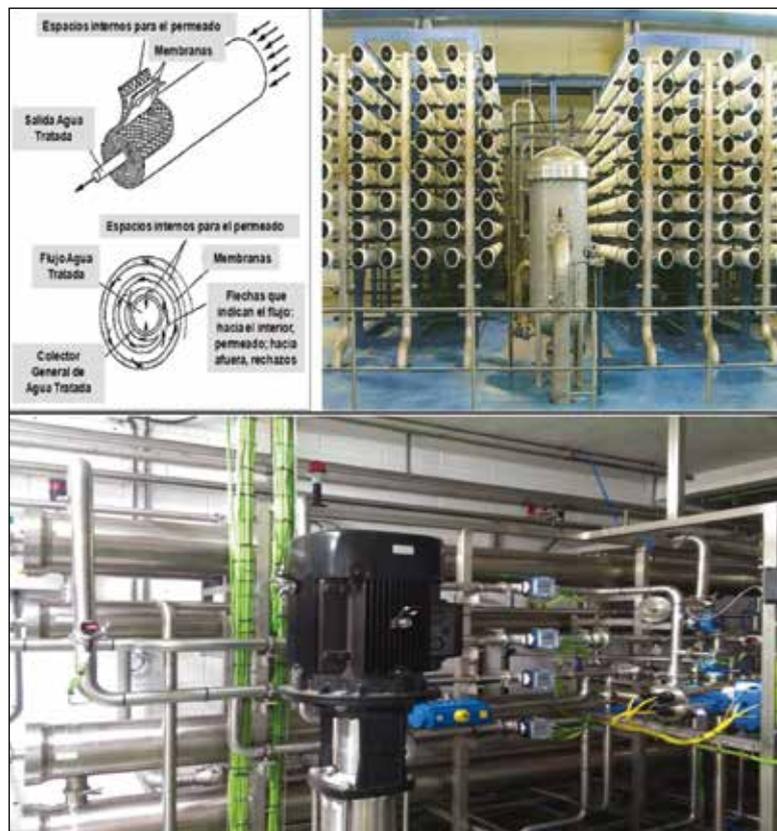


FIGURA 9. Esquema de una membrana (imagen superior izquierda), equipo de ultrafiltración (imagen superior derecha) y equipo de ósmosis inversa (imagen inferior).



- 2. Eliminación de nutrientes (N y P) si no se lleva a cabo anteriormente.
- 3. Desinfección opcional (UV).
- 4. Coagulación-floculación opcional.
- 5. Filtración sobre arena o arenacarbón activo granular
- 6. Ultrafiltración.
- 7. Ósmosis inversa.
- 8. Desinfección final (ozonización...).

Este esquema, en líneas generales, posibilitará el uso del agua regenerada en España, si bien con unos cos-



tes de implantación y mantenimiento que no está claro que puedan ser fácilmente asumibles por la gran mayoría de operadores de aguas españolas sin contar con medios externos públicos o privados, ni tampoco por el usuario final (agricultores, ayuntamientos, etc.), que habrá de valorar entre disponer de un recurso de alta calidad pero caro, o bien no disponer de tal recurso.

5. CONCLUSIONES

Los microcontaminantes químicos entran en el grupo general de los que se denomina actualmente como 'contaminantes de preocupación emergente', que son, en general, aquellos contaminantes desconocidos, o no reconocidos como tales, cuya presencia en el medio ambiente no es nueva, pero sí la preocupación y el control por sus posibles consecuencias ambientales o sanitarias.

Como características principales comparten: manifestarse al poder contar con nuevos y más sensibles equipos y métodos de análisis; estar cada vez más regulados; una elevada producción y consumo, y continua introducción en el medio ambiente; un uso tanto a escala industrial como doméstica; no necesitar ser persistentes para ocasionar efectos nocivos de índole carcinogénica y

mutagénica, o disrupción endocrina; y una amplia dispersión en el medio.

Entre ellos cabe destacar, además de los conocidos metales pesados y compuestos organometálicos, a fitosanitarios y plaguicidas, disolventes orgánicos, compuestos orgánicos de síntesis, plastificantes y preservantes de superficies, fármacos, antibióticos, medicamentos, e incluso drogas, sustancias adictivas y microplásticos.

También debe destacarse que muchos de estos compuestos químicos tienen carácter de disruptores endocrinos con una potencial e indeseable afección tanto sobre el ser humano como sobre la biota de los medios acuáticos.

En cuanto a su origen, pueden proceder tanto del uso industrial como del ámbito doméstico, cada vez de forma más acusada en el segundo caso. Además, su gestión comporta su eliminación o reducción a niveles emisivos admisibles en estaciones de depuración de aguas residuales industriales, o en las propias EDAR municipales si no se ha hecho antes en origen, antes de su evacuación a los saneamientos, así como su reutilización siempre que ello fuese posible.

La minimización o eliminación de los microcontaminantes químicos

de las aguas residuales, aparte de su aspecto de cumplimiento de las normativas aplicables y de sostenibilidad ambiental, cada vez estará más enfocada a potenciar el uso de las aguas regeneradas, recurso que puede ayudar a paliar la endémica falta de recursos naturales motivada por las sequías recurrentes que se experimentan tanto en España como en otros países de climatología similar.

Bibliografía

- [1] AWWA (2012). *Water treatment plant design*. 5th ed., New York.
- [2] Barceló, D.; López, M.J. (2007). Contaminación y calidad química del agua: el problema de los contaminantes emergentes. En: Panel Científico- Técnico de seguimiento de la política de aguas. Instituto de Investigaciones Químicas y Ambientales, CSIC, Barcelona.
- [3] Marín Galván, R. (2012). *Procesos fisicoquímicos en depuración de aguas*. Ed. Díaz de Santos, Madrid.
- [4] Marín Galván, R. (2017). Contaminación emergente: sustancias prioritarias y preferentes, productos farmacéuticos, drogas de abuso, disruptores endocrinos, microplásticos y patógenos emergentes. *Tecnoaqua*, núm. 24, págs. 66-77.
- [5] Marín Galván, R. (2018). *Fisicoquímica y microbiología de los medios acuáticos. Tratamiento y control de calidad de aguas*. Ed. Díaz de Santos, 2ª edición, Madrid.
- [6] Marín Galván, R.; et al. (2019). Microplásticos en aguas: presencia, investigación y potencial incidencia sanitaria sobre el ser humano. *Tecnoaqua*, núm. 36, págs. 76-86.
- [7] Marín Galván, R.; et al. (2022). Actualización de la presencia de compuestos de preocupación emergente a los saneamientos españoles. *Tecnoaqua*, núm. 57, págs. 44-56.
- [8] Metcalf & Eddy Inc. (2003). *Wastewater engineering, treatment and reuse*. Ed. McGraw Hill, 4th ed., New York.
- [9] Nemerow, N. (1998). *Tratamiento de vertidos industriales y peligrosos*. Ed. Díaz de Santos, Madrid.

wit
water solutions

Ingeniería
Desarrollo
Fabricación
Mantenimiento
SAT



Tratamiento de
Aguas Residuales
Industriales
Plantas
depuradoras

www.witwatersolutions.com
wit@witwatersolutions.com
Tlf: 00 34 943 084 785
Abendaño, 7
20800 Zarautz
(Gipuzkoa) Spain

TECNOAQUA

www.tecnoaqua.es

Órgano de difusión de:

a Aeas
Asociación Española de
Abastecimientos de
Agua y Saneamiento

AQUA ESPAÑA
Asociación Española de Empresas
del Sector del Agua

Colaborador de:

AEDyR
ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE
DESALACIÓN Y REUTILIZACIÓN

Microcontaminantes
químicos más habituales
en las aguas residuales:
origen y gestión

Estudio e identificación
de microplásticos,
sustancias prioritarias
y contaminantes
emergentes en las aguas
residuales de Sevilla

Por qué calibrar un
contador de partículas
automático (APC)
en aguas bajo la norma
ISO 21501-3

Tecnología para la
transformación digital
del ciclo urbano del agua

Mejora de la eficacia y
costes de un sistema de
dosificación mediante
sensores de H₂S

Complejo Ambiental
Copero: modelo
integrador y avanzado
para el tratamiento
y la gestión de lodos

El hidrógeno verde,
oportunidad para
el sector del agua

Entrevista a Marina
Arnaldos, directora
de Cetaqua Barcelona

Eficiencia energética
mediante autoconsumo
en las EDAR



MEJORAS

Ser más eficientes **detectando fugas
de agua** está en nuestra mano.

Digitalización de la
gestión integral de
fugas de agua.

+34 91 640 34 62

www.mejoras-energeticas.com

Consulta nuestro artículo en la pág. **64.**