

Vera, L. (2019). Aguas residuales y oportunidades asociadas a su depuración y regeneración. En Afonso-Carrillo, J. (Ed.), *Aqua: reflexiones para una gestión eficaz*, pp. 137-163. Actas XIV Semana Científica Telesforo Bravo. Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias. Puerto de la Cruz. 170 pp. ISBN 978-84-09-15374-9

5. Aguas residuales y oportunidades asociadas a su depuración y regeneración

Luisa Vera

*Dpto. Ingeniería Química y Tecnología Farmacéutica.
Universidad de La Laguna*

De entre todas las aguas: dulces, saladas, subterráneas, etc. las aguas residuales son por origen y características las innobles y olvidadas. Y si bien en el siglo pasado, se avanzó en la búsqueda de vías para minimizar los efectos negativos de su devolución al medio natural, lo cierto es que en el siglo XXI siguen constituyendo un tema escabroso. En general, las aguas residuales no son tema de conversación, y únicamente se hace referencia a ellas en los medios de comunicación, si aparecen en forma de vertido en una costa, son el resultado de un incidente o accidente. En contadas ocasiones, en foros no técnicos, se hace referencia a las aguas residuales como un recurso, capaz de generar productos de valor.

En el presente capítulo se ha intentado describir la situación general de las aguas residuales y su gestión actual así como, las oportunidades que nuevos modelos de gestión y de tratamiento pueden aportar para afrontar los retos que ha de abordar nuestra sociedad por medio de soluciones integradas, autónomas y sostenibles, en el ámbito de las aguas residuales.

Introducción

¿Qué es el agua residual?

Las aguas residuales son aquellas que proceden de las actividades humanas que se desarrollan en: núcleos urbanos, procesos industriales, agrícolas y ganaderos, mineros. Por tanto, son el resultado de incorporar en las aguas de abastecimiento, durante su uso: materia (heces, orina, jabones, arenas, etc.) y energía (en general, en forma de calor en aguas de procesos, como en centrales térmicas, aguas de limpieza, etc.). Las aguas residuales son sinónimo de contaminación pues tal y como define la Directiva Marco del Agua, la contaminación es “la introducción directa o indirecta, como consecuencia de la actividad humana, de sustancias o calor en la atmósfera, el agua o el suelo, que puedan ser perjudiciales para la salud humana o para la calidad de los ecosistemas acuáticos, o de los ecosistemas terrestres que dependen directamente de ecosistemas acuáticos, y que causen daños a los bienes materiales o deterioren o dificulten el disfrute y otros usos legítimos del medio ambiente” (DOUE 2000/60/CE).

El uso a que se destinan las aguas de abasto o potables originará aguas residuales con diferentes materias o impurezas, en diferente cantidad o concentración, y será el grado o extensión en que aparezcan estas impurezas las que determine el nivel de contaminación de estas aguas y su clasificación. Por ello, no es extraño que para poder facilitar su control y estandarización, las aguas residuales se clasifiquen según su procedencia o tipo de uso y esto generalmente, defina el tipo de impurezas a encontrar. No obstante, hay que ser consciente de que no necesariamente puede considerarse por ejemplo, un agua residual como industrial porque se genere en una industria, pues puede ocurrir que las aguas procedan de la cafetería y los aseos existentes en una instalación industrial, y sus características sean idénticas a las presentadas por un agua residual producida en una residencia escolar o de ancianos o un edificio de viviendas. Por tanto, no sólo el origen, sino el tipo de impurezas y su concentración serán factores determinantes para clasificar las aguas residuales.

En general, se habla de aguas residuales pluviales, aguas residuales industriales, aguas residuales de ganadería, y aguas residuales urbanas. Estas últimas también se denominan domésticas o municipales.

El término “aguas residuales urbanas” incluye las aguas residuales domésticas o la mezcla de estas con aguas residuales industriales o con aguas de escorrentía pluvial cuando las redes de saneamiento alcantarillado recogen también las pluviales. Por otra parte, las aguas residuales domésticas son las aguas residuales procedentes de zonas de vivienda y de servicios, generadas principalmente, por la higiene personal (duchas, baños,

lavabos), residuos del metabolismo humano (heces y orina) y otras actividades domésticas (lavadoras, lavaplatos, etc.).

La situación global de las aguas residuales en España

En julio de 2018, la comisión europea recordó a España su incumplimiento en materia de gestión y recogida selectiva de residuos sólidos así como, en el tratamiento adecuado de las aguas residuales. Siendo este último ámbito el que ha llevado a que el tribunal de justicia de la Unión Europea imponga a España su primera sanción pecuniaria ambiental por valor de 12 millones de euros y casi 11 millones adicionales por semestre de demora en cumplir la normativa ambiental de referencia. Esta sanción es el resultado de las denuncias a 17 municipios de 5 comunidades autónomas: Andalucía, Asturias, Galicia, Comunidad Valenciana y Canarias (Díaz, 2019).

Es importante indicar que si bien España realizó un gran esfuerzo por transformar la gestión de las aguas residuales en las últimas décadas del siglo XX, logrando revertir una situación deficiente en términos de cobertura y calidad del servicio hasta unos niveles inéditos hasta entonces, varios factores llevaron a un colapso generalizado de dicho avance en la segunda década del nuevo siglo (IAGUA 2019). La llegada de la crisis económica junto al corte de recepción de fondos comunitarios, ha contribuido junto a una falta generalizada de previsión política, en los diversos niveles de competencias de la administración, a diezmar los esfuerzos en recolección y tratamiento de las aguas residuales. Esto ha llevado al país a transitar por una senda de regresión impropia de un país desarrollado, que aspira a mejorar año tras año su entorno y a las indicadas multas (IAGUA, 2019).

En la actualidad, España recoge el 96,9% de las aguas residuales y somete a tratamiento el 84,1%, pero quedan 700 aglomeraciones urbanas que no cumplen las exigencias comunitarias, sobre las que pesan cinco procedimientos de infracción, incluyendo el ya fallado. La inversión para cumplir la normativa, y cerrar los procedimientos, asciende a unos 10.000 millones; según las últimas previsiones, no se conseguirá hasta el período 2027-2030 (Steggman, 2017).

Además de incumplir en materia de depuración, España debe medir mejor las extracciones y los usos del agua -acabar con la extracción descontrolada-, y cumplir los plazos de la Planificación Hidrológica (Díaz, 2019).

Por tanto, parece indispensable buscar nuevas fórmulas para afrontar los retos indicados en materia de agua y los correspondientes en materia de residuos sólidos o emisiones a la atmósfera. Aumentar los impuestos

ambientales que en la actualidad son los quintos más bajo de la Unión Europea, reduciendo la carga fiscal sobre el trabajo, podría ser una vía que se plantea como una opción para dar mayor visibilidad a la problemática ambiental y aumentar la sensibilización hacia esta temática, aplicando la máxima de “quien contamina paga”. No obstante, implementar una medida de este alcance requiere de un compromiso entre las diferentes administraciones, una visión a medio-largo plazo que posibilite el desarrollo normativo y los programas de actuación necesarios así como, desarrollar una sinergia compleja que requerirá el coraje de la clase política y la concienciación ciudadana.

Un informe de la ONU de marzo de 2017 indicaba que los niveles de tratamiento de las aguas residuales alcanzan de media, el 70% en los países ricos, una proporción que cae hasta el 38% en los países de renta medio-alta y se reduce al 28 % en los de renta medio-baja.

Según el Instituto Nacional de Estadística (INE), una familia española gasta de media el 0,9% de su presupuesto anual en el recibo del agua, mientras que su gasto en teléfono le supone casi el 3%, y lo mismo para electricidad. Según Morcillo, el esfuerzo que hace una familia española para pagar el agua es el 63% del que hace la media europea. Puesto que la tarifa del agua está constituida por todos los servicios, es decir, abastecimiento y saneamiento (alcantarillado y depuración), el precio que paga una familia española es un 60% por el abastecimiento y un 40% por el saneamiento.

En España se reutilizan alrededor de 400 hm³, lo que representa un 9% de las aguas residuales depuradas. Respecto al destino del agua reutilizada, el 41% es la agricultura, el 31% es el riego de jardines y zonas de ocio, el 12 % a usos industriales, y el 9 % a usos varios (Stegmann, 2017).

Aguas residuales y riesgos asociados

Cada habitante español produce un volumen medio diario de 144 litros de aguas residuales urbanas según el Instituto Nacional de Estadística (INE, 2016), constituidas en proporciones prácticamente regulares, por aceites e hidrocarburos; sales, bases jabonosas y almidones, urea, albúminas, urea, proteínas, ácido acético, microorganismos y diferentes gases. Este amplio abanico de componentes se agrupa por consenso, en los denominados: “indicadores de contaminación de las aguas residuales”. Dichos indicadores son básicamente, parámetros de naturaleza física, química o biológica que aglutinan a varios de los componentes mencionados a fin de facilitar la caracterización de las aguas, normalizando métodos para su cuantificación y economizando tiempo y dinero asociado al número de análisis necesarios, de todo tipo.

Los rangos que estos indicadores de contaminación pueden presentar nos ayuda a definir el carácter más o menos contaminante de un agua residual, pero también nos permite realizar un seguimiento cuantitativo y objetivo de un proceso de tratamiento depuración que implantemos, conocer qué limitaciones puede tener, qué factores lo hacen más o menos adecuado para ser aplicado y lo más importante, ante posibles sanciones: saber si el tratamiento es o no eficaz y el agua resultante cumple o no, la normativa.

Entre estos indicadores de contaminación, por su papel relevante en las normativas de depuración, vertido, el control de calidad de los tratamientos, etc. destacan los “Sólidos en suspensión” que contabilizan las especies con un diámetro medio de partícula superior a 0,45 µm, entre las cuales se encuentran desde bacterias o algas, hasta arenas. Comprende por tanto, un tipo de contaminantes de las aguas que en su gran mayoría pueden verse a simple vista y en consecuencia, es un parámetro relacionado con el aspecto antiestético que acompaña a lo que de manera intuitiva, consideramos un agua contaminada o un agua residual.

También entre los contaminantes presentes en aguas residuales se encuentra la materia orgánica biodegradable ligada con su procedencia, principalmente aguas fecales que salen de nuestros inodoros, restos de comida que acompañan a aguas de lavado de vajillas y utensilios de cocina, duchas, etc. y que está compuesta porcentualmente en un 20-25% de azúcares, 40-60% son aminoácidos y alrededor de un 10%, ácidos grasos. Estas especies de carácter biodegradable es decir, degradables por la acción de seres vivos, no son cuantificadas de manera independiente por medio de métodos específicos y por ello, más caros, sino por medio de un único parámetro: la “Demanda Bioquímica de Oxígeno-DBO” que cuantifica las necesidades de oxígeno de los microorganismos presentes en el agua residual en el proceso de degradación de estos compuestos biodegradables y que estos llevan a cabo, de manera espontánea.

Por otra parte, otras muchas especies presentes en las aguas residuales no son biodegradables, pero si oxidables en presencia de una sustancia química con gran capacidad oxidante. Esta última circunstancia permite cuantificar las especies a oxidar, conociendo la concentración de oxidante necesaria para dicha oxidación expresada como si se tratase de oxígeno como la “Demanda Química de Oxígeno-DQO”.

Obviamente algunas sustancias aparecen inevitablemente por su naturaleza, cuantificadas en más de uno de estos indicadores, si bien esto no es un problema pues el valor global de cada parámetro es el que define y se aplica en la clasificación de las aguas y el diseño de instalaciones de tratamiento o vertido. De hecho, atendiendo al valor medio que presentan estos indicadores en las aguas residuales, estas se clasifican según su nivel de contaminación: poco, medio o fuerte. Esto que puede parecer

únicamente una curiosidad explica que en ocasiones, algunas tecnologías de tratamiento aplicadas con éxito a unas aguas residuales resulten poco eficientes para tratar otras. Así por ejemplo, los datos recopilados por el ISTAC (Instituto Canario de Estadística) en 2009 (último año disponible) en relación a las aguas residuales urbanas producidas en Canarias, indican que estas presentan un nivel de contaminación fuerte tal y como se recoge en la Tabla 1. Esto requiere diseñar instalaciones de tratamiento más exigentes, que deben gestionar aguas residuales más complejas, por su alta concentración y por no generarse caudales por habitantes muy elevados en comparación con los de otras regiones, es decir las aguas residuales canarias están en general, más cargadas de contaminantes.

Tabla 1. Clasificación de las aguas residuales urbanas según su nivel de contaminación (Adaptado Metcalf & Eddy, 1995).

Contaminante (mg/l)	Concentración			CANARIAS ISTAC (2009)
	Débil	Media	Fuerte	
Sólidos en suspensión (mg/l)	100	220	350	350
Demanda bioquímica de oxígeno (mg/l)	110	220	400	565
Carbono orgánico total (mg/l)	80	160	290	
Demanda química de oxígeno (mg/l)	250	500	1.000	905
Nitrógeno total (mg/l)	20	40	85	64
Fósforo total (mg/l)	4	8	15	5
Coliformes totales (UFC/100ml)	$10^6\text{-}10^7$	$10^7\text{-}10^8$	$10^7\text{-}10^9$	

El vertido de agua residual urbana sin tratar puede tener efectos adversos sobre el medio receptor (terrestre o marino) y la salud de las personas. Por un lado, el agua residual contiene mayoritariamente sustancias procedentes de la actividad doméstica que pueden modificar las características físico-químicas del medio receptor y, como consecuencia, la pérdida de su función ecológica. Además, estas aguas sin tratar pueden contener numerosos microorganismos, causantes de enfermedades intestinales graves en humanos como tifus, cólera, disentería y hepatitis A. Esto es algo que se sabe desde hace siglos, de hecho los antiguos romanos conocían la problemática sanitaria asociada a las aguas residuales y construyeron una red de alcantarillado, la “cloaca máxima”, para recoger las aguas residuales de Roma y conducirlas lejos de la población hasta el río Tíber. Esta filosofía la trasladaron a las provincias romanas, como Itálica (Sevilla). Además llenaron sus casas y palacios de letrinas que permitieran la recogida de las aguas y su transporte hasta la red general (Fig. 1). Sin embargo, el abandono de estas instalaciones tras la caída del imperio romano y el ingreso del ser humano en la edad media, época repleta de oscurantismo e ignorancia, llevó a deshacerse de las aguas residuales

vertiéndolas directamente a las calles, contribuyendo a que la población conviviese con sus residuos en unas condiciones insalubres que contribuyeron a las grandes epidemias de aquellos siglos.



Fig. 1. Letrinas y red de canalización en los restos arqueológicos de Itálica, antigua ciudad romana situada al norte de la localidad de Santiponce (Sevilla).

Otra consecuencia del vertido de aguas residuales al medio receptor es el consumo de oxígeno disuelto en dicho medio, que puede reducir su presencia de manera dramática e incluso, llevarlo a estar ausente. Este efecto en el medio, denominado anoxia, afecta a los seres vivos presentes.

Asimismo, el vertido de nutrientes contenidos en las aguas residuales sobre medios acuáticos, estimula el crecimiento de plantas acuáticas, dando lugar al proceso conocido como eutrofización, cuyo efecto principal es el crecimiento incontrolado de algas que impiden la penetración de la luz en las zonas más profundas donde deja de tener lugar la fotosíntesis y la consecuente generación de oxígeno. Asimismo, el enriquecimiento de materia orgánica que experimentan los sedimentos en las zonas de influencia de los vertidos y el incremento de su descomposición influye en las comunidades biológicas existentes. Esto tiene como consecuencia la alteración radical del ambiente por cambios en la composición, estructura y dinámica del ecosistema haciendo inviable la existencia de la mayoría de las especies que previamente formaban el ecosistema y su desaparición como tal.

Consciente de los riesgos y el conjunto de afecciones asociados al vertido de aguas residuales sin tratar ha impulsado el desarrollo de diferentes normativas por parte de la Unión Europea. Por ejemplo, para el caso de vertido a aguas costeras entre otras problemáticas que puedan resultar una amenaza para las mismas, se ha desarrollado la Directiva Europea 2006/7/CE, relativa a la gestión de la calidad de las aguas de baño, entre las que destaca la clasificación de la calidad de las aguas de baño en función de los niveles de bacterias fecales detectadas: Enterococos intestinales y *Escherichia coli*. Además hay que considerar otra cuestión ante los vertidos, el hecho de que estos pueden contener concentraciones de sustancias que pueden resultar perjudiciales para los organismos del medio por su toxicidad y capacidad de bioacumulación, siendo un fuente común de perturbación antropogénica (Riera *et al.*, 2013).

En el caso de que las aguas residuales sin tratar sean vertidas directamente al suelo o infiltradas en el subsuelo sin un tratamiento previo adecuado, provocan un problema ambiental quizás más inquietante que el que se puede visualizar en la costa o en una playa. Por lo general, sobre el primer problema las autoridades pueden actuar, alertando a la población para minimizar los riesgos asociados. En el caso de la infiltración de aguas residuales en el subsuelo, el peligro asociado es silencioso y tomar conciencia de él resulta más complejo.

Con el fin de regular el vertido de las aguas residuales urbanas, la Unión Europea promulgó la Directiva 91/271/CEE – transpuesta al marco español a través del Real Decreto (RD 509/96) sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas y posteriormente, desarrolló la Directiva Marco del Agua 2000/6/CEE para la preservación de las grandes masas de agua

(Tabla 2). Es en base a la primera de estas normativas, que España y algunos otros países europeos han sido sancionados por la ausencia o la deficiencia en el tratamiento de las aguas residuales procedentes de núcleos urbanos en 2018.

Tabla 2. Concentraciones y rendimientos mínimos de los procesos de depuración de aguas residuales urbanas (RD 509/96)

Parámetros	Concentración	Porcentaje de reducción
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅ a 20°C)	25 mg/l O ₂	70-90%
Demanda química de oxígeno (DQO)	125 mg/l O ₂	75%
Sólidos en suspensión (SST)	35 mg/l 60 mg/l	90% (> 10.000 h-e) 70% (2.000 – 10.000 h-e)

En zonas sensibles a eutrofización:

Parámetros	Concentración	Porcentaje de reducción
Nitrógeno total	10 mg N/l (>10.000 h-e)	70-80%
	15 mg N/l(10.000-100.000 h-e)	
Fósforo total	1 mg P/l (>10.000 h-e) 2 mg P/l(10.000-100.000 h-e)	80%

Algunas cifras de las aguas residuales en Canarias

En 2016, según datos del ISTAC, se generaron en el conjunto de Canarias unos 341.769 m³/día de agua residual doméstica, de los cuales un 77,9% fueron vertidos al mar y el 0,2% del agua residual tratada se vertió por infiltración en el terreno.

En Canarias se han realizado notables inversiones en las últimas décadas para dotar a las islas de infraestructuras para la recogida y tratamiento de aguas residuales, pero estas resultan en la actualidad, insuficientes. El grado de desarrollo de las redes de saneamiento y el número y capacidad de las estaciones de tratamiento no dan servicio a un porcentaje razonable de la población. A ello contribuyen diversos factores específicos: la especial orografía de algunas islas, la complicada red de atribuciones y competencias entre las diversas administraciones locales y sus departamentos, la dispersión poblacional en el territorio, la elevada carga orgánica y salinidad del agua residual, etc.

Un inventario realizado en 2008 por el Gobierno de Canarias (Parlamento de Canarias, 2016) indicaba la existencia de unos 500 puntos de vertidos de aguas residuales al mar, de los cuales unos 200 son vertidos

directos al mar (sin canalización), y otros 312 mediante conducciones a emisarios (emisarios submarinos o aliviaderos de emergencia de estaciones de bombeo). Una década después, un nuevo informe publicado en noviembre de 2017 arrojaba un total de 394 puntos de vertido, de los cuales 49 son emisarios submarinos, 306 son conducciones de desagüe y 30 son instalaciones en Dominio Público Marítimo Terrestre (DPMT). De estos 394 puntos de vertidos al mar, 224 corresponden al vertido exclusivo de aguas residuales urbanas o domésticas, aquellas generadas en los hogares o instalaciones análogas: cafeterías, colegios, residencias, etc.

La isla de Tenerife cuenta con una superficie aproximada de 2.034 km² que constituye el 27% del territorio insular regional, y según los últimos datos recogidos por el ISTAC en el 2018, en Tenerife habitan unas 904.713 censadas, cerca de la mitad de la población total de Canarias. A todo ello también es necesario sumar los cerca de 7.000.000 de turistas que visitan la isla anualmente, sin incluir al resto de la población flotante de la isla. Con estos datos es revelador la presión que las aguas residuales pueden ejercer sobre el medio receptor, sea terrestre o marítimo. De hecho, por los datos del **PLAN HIDROLÓGICO DE SEGUNDO CICLO DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DE TENERIFE (2015-2021)** (Consejo Insular de Aguas de Tenerife, 2018), se estima el volumen de aguas residuales generadas en Tenerife en 2015, por la población residente y el turismo, en 68,8 hm³/año. El 56% de estas aguas residuales fueron recogidas por las redes centralizadas de saneamiento y solamente un 39,3% de las recogidas fueron depuradas.

La memoria del Plan Hidrológico Insular de Tenerife (Consejo Insular de Aguas de Tenerife, 1996), indicaba que en 1996 sólo el 56% de la población se encontraba conectada a una red de saneamiento. Gran parte de los hogares de la isla que no están conectados a las redes de saneamiento recurren a pozos ciegos o filtrantes para evacuar sus aguas residuales, y estos dispositivos no pueden ser considerados un tratamiento “adecuado” de las aguas residuales. En otros casos, las viviendas disponen de fosas sépticas, que por lo general, carecen de la adecuada conservación, dando lugar a que se puedan producir infiltraciones en el terreno y eventos de contaminación difusa. Esto parece no haber preocupado en exceso a la ciudadanía, tal vez porque siguiendo la máxima de “Ojos que no ven, corazón que no siente”, la infiltración de aguas residuales poco tratadas en el subsuelo no se ha considerado hasta ahora como un problema, al anular su visión. De hecho, la utilización de pozos filtrantes no es cuestionada generalmente y términos como fosa séptica y pozo filtrante se confunden coloquialmente, a pesar de tratarse de instalaciones sensiblemente diferentes. Esto conlleva a que no se hagan grandes esfuerzos por cambiar una situación que la inercia, la falta de financiación o de medios, el desconocimiento, etc. ha convertido en habitual. Es cierto que no suele ser

una medida popular, el cierre de una calle para proceder a abrir zanjas, instalar conducciones, cerrar dichas zanjas, re-asfaltar las vías o acondicionar las aceras, adaptar las tarifas municipales para abordar la depuración, etc. Pero también es cierto que es obligación municipal recoger dichas aguas residuales, tratarlas de forma adecuada según indique la normativa, en función del núcleo o sector urbano implicado y disponerlas de manera segura. En ocasiones, mancomunar los servicios de saneamiento y depuración, al igual que se hace con la recogida de residuos sólidos urbanos, puede ser una solución que ayude a minimizar los costes. En todo caso, la distribución de los núcleos de población e incluso su tamaño o localización en un mismo municipio, puede ser muy diversa y por tanto, no hay una solución única.

Las maneras o criterios para disponer o verter agua residual o agua residual depurada, ya tratada, se encuentran reguladas principalmente por normativas de la Unión Europea. Estas están orientadas a preservar la calidad de las grandes masas de agua natural, que en islas como Tenerife, se encuentran alojadas en el subsuelo, en forma de acuíferos, cuya calidad pudiera verse comprometida en un futuro, dada la gran presión demográfica ejercida sobre el territorio. No obstante, la información que maneja el Consejo Insular de Aguas de Tenerife en torno a esta cuestión no revela por el momento, problemas de esta índole, si bien, sería aconsejable un plan de actuación que garantice que dicho escenario no pueda desarrollarse en un futuro. Para ello, es precisa una mayor implicación de la población, que reclame una inversión eficaz y prioritaria en materia de saneamiento y de depuración.

La depuración de las aguas residuales

La depuración de las aguas residuales define el conjunto de tratamientos a aplicar a un agua residual para adaptar sus características a las exigidas para poder ser vertidas a colectores municipales, aguas marítimas, aguas continentales, etc. Dichos tratamientos se abordan en las Estaciones de Depuración de Aguas Residuales (EDAR) diseñadas para alcanzar los siguientes objetivos (Hernández, 2015):

- Eliminación de residuos, aceites, grasas, flotantes, arenas, etc.
- Eliminación de materias sedimentables orgánicas e inorgánicas.
- Eliminación de la materia orgánica.
- Eliminación de compuestos nitrogenados, que contengan fósforo, especialmente si el vertido se va a realizar en una zona sensible.
- Transformar los residuos retenidos en fangos estables (sin peligro para la salud).

Para la consecución de estos objetivos, las estaciones depuradoras se basan en lo que se denomina, procesos unitarios. Estos procesos unitarios pueden ser de tipo físico, químico o biológico en función de si se aplican o neutralizan fuerzas de distinta naturaleza, se añaden determinadas sustancias o se recurre a organismos vivos para reducir la presencia en las aguas residuales de determinados parámetros: indicadores de contaminación. Estos procesos unitarios se suelen agrupar por etapas o fases que reciben nombres tales como tratamientos: previo, primario y secundario.

La etapa de tratamiento previo puede variar de una a otra estación depuradora según el caudal de agua residual a tratar, la discontinuidad del flujo de agua residual o el espacio disponible, pero su función es la misma: la reducción del contenido y del tamaño de los sólidos presentes en el agua residual. En el agua residual pueden encontrarse sólidos de gran variedad de tamaños, pensemos si no, en aquellos objetos que podamos tirar por el retrete o que puedan acceder a una alcantarilla si no está debidamente cerrada. Trozos de madera, plástico, telas, bastoncillos, compresas, papel higiénico, toallitas desechables, colillas, etc., constituyen ejemplos de estos objetos que aparecen con el agua residual en la cabecera o entrada de una estación depuradora. Estos cuerpos más o menos voluminosos, son por lo general, abrasivos y pueden provocar obstrucciones y roturas en tuberías, válvulas, bombas de impulsión, etc. y por ello, son los primeros elementos a retirar en las estaciones depuradoras (Fig. 2).

Además, en esta etapa se eliminan arenas, que podrían causar el desgaste y la rotura de equipos mecánicos como los mencionados anteriormente. Asimismo, se retiran aceites y grasas que puedan impedir por flotación, la sedimentación de arenas y sólidos finos. Esta etapa es la responsable generalmente, de la mayor parte de olores desagradables que se asocian a las aguas residuales y su proceso de depuración, y que son debidos a los gases que se producen durante la degradación de la materia orgánica adherida sobre estos sólidos. Realmente, se trata de un olor similar aunque más intenso, al que desprenden redes de saneamiento o alcantarillas en épocas secas, especialmente verano. En este sentido es importante aclarar que este tipo de generación de olores es habitual e independiente del tipo de estación depuradora por el que se opte, pues la eliminación de los sólidos mayores y esa materia orgánica en esta fase de la depuración es inevitable.

La siguiente etapa en el tratamiento de depuración, el tratamiento primario, comprende la decantación por acción de la gravedad, de los sólidos más finos, además de la flotación de aceites, grasas y otros flotantes más ligeros. Por lo general, en estaciones de mediana-gran capacidad de tratamiento, estos decantadores son elementos llamativos por ocupar un porcentaje elevado de la superficie disponible para el tratamiento.



Fig. 2. Equipo de cribado y eliminación de sólidos habitual en Tratamiento previo-primario de EDAR.

Las estaciones depuradoras de aguas residuales tienen como núcleo de la depuración, el tratamiento secundario también denominado, tratamiento biológico, pues recurre a organismos para degradar la materia orgánica presente en las aguas residuales. Esta materia orgánica procedente de las heces aportadas al agua, los restos de comida, etc. puede promover el desarrollo de todo tipo de microorganismos, algunos de ellos patógenos, es decir, causantes de enfermedades. Por tanto, es prioritario en el proceso de depuración, reducir el contenido en materia orgánica presente en las aguas antes de ser vertidas, a fin de minimizar los problemas sanitarios que puedan derivarse de ello.

El tratamiento secundario por excelencia es el proceso biológico de “lodos activados o activos” desarrollado a principios del siglo XX y tan extendido que ha recibido el apodo de “convencional”. Este proceso consta a su vez de dos elementos: un reactor biológico y un clarificador (Figs 3-5). En el reactor biológico se promueve el desarrollo de microorganismos aerobios, que requieren oxígeno para su desarrollo, inyectando aire en el seno del agua residual, rica en materia orgánica. De esta manera las bacterias degradarán y asimilarán la materia orgánica a una velocidad relativamente alta, generándose más bacterias que conformarán colonias y estas, a su vez se aglutinarán formando conglomerados o flóculos que

podrán separarse del agua por sedimentación. Esta sedimentación tiene lugar en el clarificador, elemento que actúa de forma similar al decantador del tratamiento primario. Si el aire incorporado al reactor se distribuye de manera adecuada y uniforme, se logrará una correcta homogeneización del agua residual, una adecuada distribución del oxígeno a todas las bacterias aerobias, y un buen rendimiento de depuración. La eficacia del tratamiento global puede verse perjudicado por la presencia de aceites que generen micelas y láminas que dificulten una buena transferencia del oxígeno al agua y por extensión, a las bacterias aerobias. También la formación de flóculos o aglomerados de bacterias es crucial para una adecuada sedimentación en el clarificador y la producción de aguas depuradas. Asimismo, una elevada y variable salinidad de las aguas residuales puede limitar, o incluso llegar a impedir, el correcto desarrollo de las bacterias responsables de la depuración (Asano *et al.*, 2007).

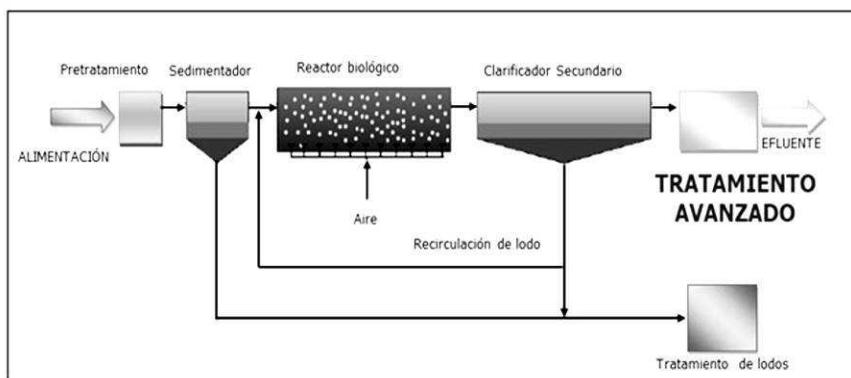


Fig. 3. Esquema del proceso de depuración de aguas residuales por lodos activos y tratamiento avanzado.

En ocasiones se puede recurrir a otros tratamientos secundarios, donde los microorganismos responsables de la depuración se encuentran libres en el agua residual al igual que en el proceso de lodos activos pero sin incorporar aire. Esto conlleva la coexistencia de microorganismos aerobios y otros que no requieren oxígeno, los anaerobios e incluso, un tercer tipo de microorganismos capaces de actuar con y sin oxígeno. En este caso, la depuración es más lenta pero el espacio requerido puede ser elevado, y al imitar el proceso de depuración que tiene lugar en ríos o lagunas, recibe el nombre de lagunaje artificial.

En otros casos: filtros biológicos y humedales artificiales de flujo horizontal sub-superficial, las bacterias encargadas de la depuración se desarrollan fijadas – adheridas a un soporte o relleno que puede ser de

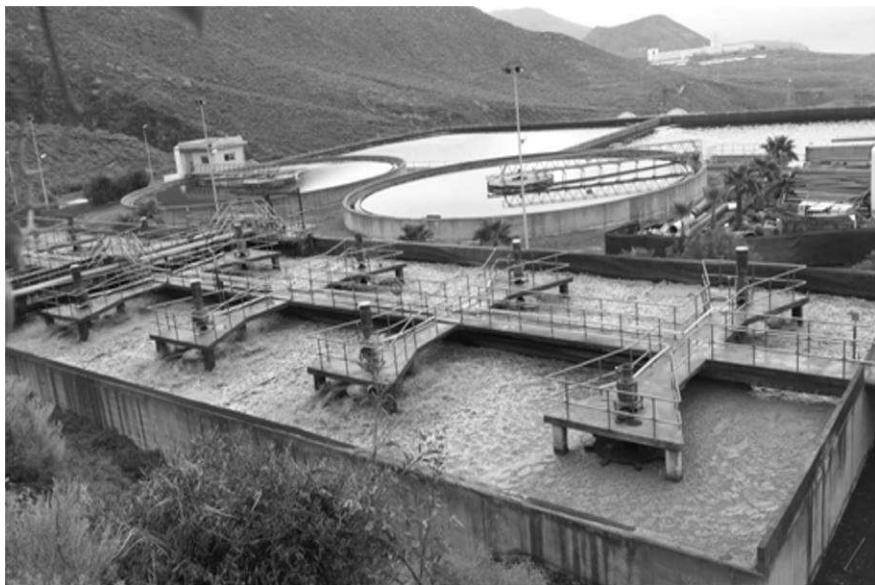


Fig. 4. Reactores biológicos de lodos activos y clarificadores secundarios al fondo, en un sistema de lodos activos convencional.

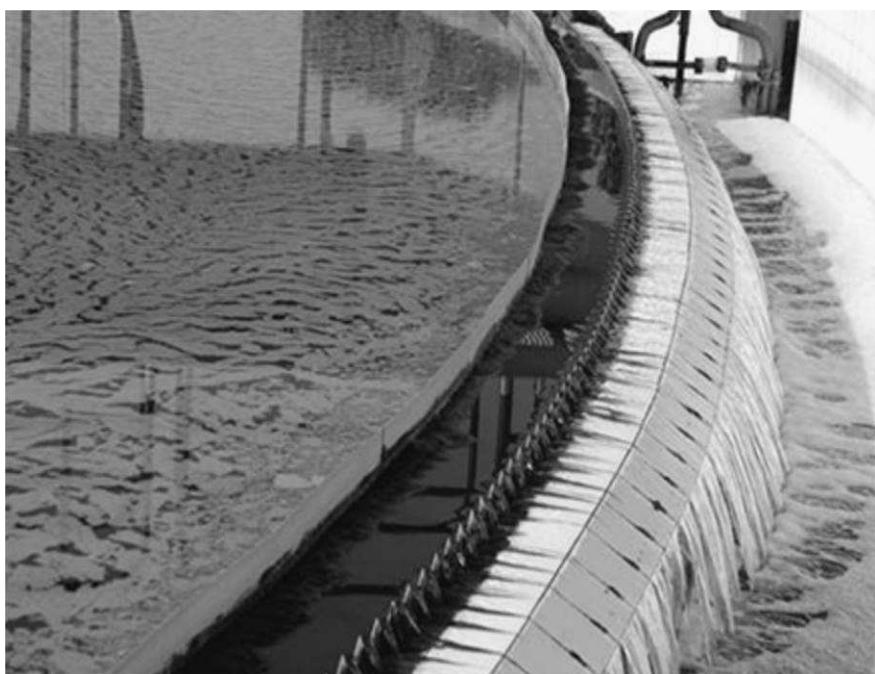


Fig. 5. Detalle de clarificador secundario de una EDAR convencional.

diversa naturaleza: plástico, cerámica, grava, y a través del cual fluye el agua residual a depurar. En este caso, también se desarrollan bacterias de distinta naturaleza y el proceso de depuración, más lento que en lodos activos, requiere más espacio.

Sea cual sea el tipo de tratamiento secundario, de tipo biológico, este debe facilitar el contacto entre la materia orgánica y la biomasa, dar tiempo de contacto entre bacterias y agua residual para que tenga lugar la metabolización de la materia orgánica. Sin embargo, en el caso del proceso de lodos activos, este debe además permitir la estructuración de las bacterias floculadas. Esto último es primordial para conseguir una decantación satisfactoria del flóculo que posibilite la clarificación y la consiguiente depuración de las aguas residuales, si bien en ocasiones, esto no es suficiente para que el agua depurada tenga una calidad aceptable no para ser vertida, sino para reutilizarla.

La regeneración de aguas residuales

En este punto, hemos de introducir un nuevo término: aguas regeneradas, con el que se refieren las aguas residuales depuradas que, tras el proceso de depuración han sido sometidas a un proceso de tratamiento adicional o complementario que permite adecuar su calidad al uso al que se destinan.

La incorporación de etapas adicionales de tratamiento en los esquemas habituales de las estaciones depuradoras (EDARs) ha dado lugar a un nuevo concepto “Estaciones Regeneradoras de Agua Residual” para referirse al conjunto de instalaciones donde las aguas residuales depuradas se someten a procesos de tratamiento adicional que puedan ser necesarios para adecuar su calidad al uso previsto (RD 1620/2007). En la actualidad el Real Decreto 1620/2007 regula a nivel nacional la calidad que debe cumplir un agua regenerada para un uso determinado, distinguiendo cuatro niveles principales de calidad según el destino final del agua: riego agrícola, uso urbano, industrial, recreativo y ambiental. Esta norma también prohíbe independientemente de su calidad, su reutilización como agua de consumo humano directo, en industrias alimentarias e instalaciones hospitalarias, entre otras, aunque si indica expresamente, la posibilidad de su aplicación en la recarga de acuíferos. El Real Decreto 1620/2007 establece los criterios de calidad atendiendo principalmente, a las concentraciones de nematodos intestinales, *Escherichia coli*, sólidos en suspensión y turbidez (Tabla 3).

Mejorar la calidad del agua residual depurada para transformarla en agua regenerada implica: retirar nutrientes, organismos patógenos, sales, por medio de tratamientos complementarios que se denominan terciarios o avanzados. Entre estos tratamientos avanzados, la filtración a través de

medios granulares, la desinfección con compuestos clorados, ozono, radiación UV o los procesos de membranas como micro o ultrafiltración, electrodiálisis reversible, etc. son los más habituales.

Tabla 3. Resumen del RD 1620/2007, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas (Adaptada de RD 1620/2007).

	Calidad Excepcional	Calidad I	Calidad II	Calidad III
<i>E. coli</i>	0/ausencia	100 UFC/100ml	1000 UFC/100ml	10^4 UFC/100ml
Sólidos en suspensión	10 mg/l	20 mg/l	35 mg/l	35 mg/l
Nematodos intestinales	1 huevo/10L	1 huevo /10L	1 huevo /10L	1 huevo /10L 10 NTU
Turbidez	2 NTU	10 NTU	No se fija	No se fija
Observaciones	Torres de refrigeración SST<5 mg/l Turbidez< 1 NTU	Riego de parque y baldeos de calles E. coli < 200 UFC/100 ml		Aguas de proceso Turbidez 15 NTU
USOS	Riego jardines privados. Descarga de aparatos sanitarios. Torres de refrigeración. Recarga de acuíferos por inyección.	Riego cultivos (consumo crudo y contacto directo). Campos de golf. Riego parques y jardines públicos. Baldeo de calles.	Riego cultivos (contacto directo y consumo no fresco). Agua proceso y limpieza de industrias alimentarias. Recarga acuíferos por percolación.	Riego cultivos industriales, viveros, leñosos, flores, etc. Agua de proceso y limpieza. Estanques y masa de agua sin acceso público Riego de pastos.

La implantación de tratamientos terciarios o avanzados ha proliferado en las estaciones depuradoras más antiguas, donde no es posible una remodelación completa de las mismas, como fórmula para afrontar la creciente demanda de agua de calidad, fundamentalmente para riego. De hecho, si se tiene en cuenta que las fuentes hídricas naturales, entendiéndose por éstas las subterráneas y superficiales, alcanzan los 111.000 hm³/año en España (MITECO, 2019) y que el sector agrícola

español consume en torno a un 80% de la capacidad hídrica disponible (Montoya *et al.*, 2016), resulta obvio que incorporar este nuevo recurso, “artificial” o “no convencional”, puede aliviar la presión sobre los recursos naturales de mayor calidad que deben ser destinados a consumo humano o usos industriales más exigentes, como la producción de alimentos, cosmética, etc.

Canarias fue una de las regiones pioneras en la implantación de sistemas de reutilización de aguas depuradas para riego a principios de la década de los 90 del siglo XX. En la actualidad, es la cuarta comunidad autónoma en porcentaje de reutilización respecto al volumen de agua depurado (INE, 2016) y el porcentaje volumétrico de agua depurada que es reutilizada representa un 27%, muy lejos del 62% que presenta la región de Murcia, pero muy superior a la media nacional situada en un 10%. En el caso concreto de la isla de Tenerife, la reutilización se ha convertido en una herramienta esencial para afrontar la escasez de agua, llegando a aportar el 55% del volumen de agua distribuido por BALTEN para riego de cultivos y campos de golf en 2018.

Por otra parte, es importante recalcar que la Directiva Marco del Agua supone un reto para la gestión del agua, ya que obliga a proteger y conservar los ecosistemas acuáticos promoviendo un uso sostenible de los recursos hídricos. Por tanto, no sólo se trata de proteger las aguas superficiales y subterráneas, sino también de cambiar el modelo de gestión, de forma que se fomente el ahorro y el uso eficiente del agua. En este sentido, la regeneración de las aguas depuradas, que consiste en tratar éstas hasta alcanzar la calidad requerida en función del uso final que se les desee dar, alcanzando incluso, grado de potabilidad, es fundamental. Así la combinación de factores como el aumento de la demanda en un escenario de cambio climático que conlleva períodos de sequías más habituales y prolongados, la necesidad de cumplir las directrices de la Directiva Marco del Agua y de otras directivas europeas posteriores, elaboradas para dar soporte a la primera han impulsado el interés por la reutilización de aguas.

Los biorreactores de membrana en la regeneración de las aguas

La apuesta de Canarias por la integración de la reutilización de agua regenerada en la gestión del ciclo agua queda patente en los planes hidrológicos insulares, no sólo en el de la isla de Tenerife. En línea con esta apuesta las nuevas estaciones de depuración y la ampliación de las más antiguas se han orientado hacia la construcción de biorreactores de membrana (en inglés, *membrane bioreactor-MBR*) (Fig. 6). Este proceso es

una modificación de los sistemas de lodos activos tradicionales, donde se sustituye el clarificador secundario por membranas, para producir un efluente clarificado y parcialmente desinfectado (Fig. 7). El reactor es similar al de los lodos activos pero opera con mayores concentraciones de microorganismos, lo que propicia elevados rendimientos en cuanto a eliminación de materia orgánica (Cote *et al.*, 2012). Incluso, según su configuración, se puede transformar el nitrógeno presente en las aguas residuales, cuyo vertido directo al medio natural puede generar episodios de eutrofización, en compuestos nitrogenados más asimilables por las plantas y en concentraciones no peligrosas para el entorno.



Fig. 6. Biorreactor de membranas de la EDAR del Noreste de Tenerife con tanque de membranas al fondo.

La normativa cada vez más exigente en cuanto a calidad de los recursos hídricos y el desarrollo de la industria de las membranas, han propiciado el desarrollo exponencial de los sistemas MBR en los últimos años y su implantación en muchos países (China, Corea, Japón, Estados Unidos, etc.) (Judd, 2011). En el caso concreto de España, existen varias instalaciones: San Pedro del Pinatar, Sabadell y Gava con capacidades de 20.000 a 50.000 m³/d, o Alcoy, Arenales y Tamaraceite con capacidades intermedias de 10.000-20.000 m³/d en (Judd, 2011).

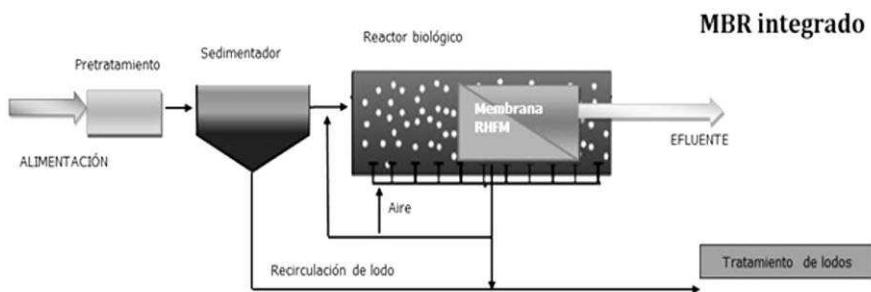


Fig. 7. Esquema de un biorreactores de membranas (MBR) para depuración – regeneración de aguas residuales urbanas.

Su instalación se recomienda en zonas con elevada sensibilidad ambiental, en que las aguas deban ser vertidas con una elevada calidad, o donde sea necesario reutilizar el agua y la disponibilidad de terreno para implantar una instalación de depuración-regeneración sea limitada. También en el caso de que sea preciso desalar el agua antes de su reutilización en riego de cara a evitar problemas de salinización de suelos o deterioro del cultivo, pues su aplicación evita problemas de colmatación de membranas específicas de desalinización: ósmosis inversa o electrodialisis reversible, las empleadas habitualmente.

Además, recientes estudios vinculan los procesos que tienen lugar en los biorreactores de membrana (sorción, biodegradación y retención por la membrana) a la mayor retención observada en estas instalaciones respecto a otras de depuración, de microorganismos patógenos y microcontaminantes orgánicos emergentes (fármacos, compuestos perfluorados, hormonas, drogas y productos de cuidado e higiene personal) habituales en las aguas residuales (Ma *et al.*, 2018; Xiao *et al.*, 2019). Estas últimas sustancias se saben que tienen efectos perjudiciales sobre la salud humana e incluso algunos son disruptores endocrinos, por lo que están siendo objeto de seguimientos más exhaustivos tanto en las aguas a reutilizar, como en las estaciones de tratamiento. También la capacidad de los MBRs en relación a depuradoras de carácter convencional como lodos activos, para retener microplásticos procedentes de la rotura o desgaste de objetos plásticos, productos de cuidado personal o lavado de textiles sintéticos, ha sido constatada en recientes trabajos (Talvitie *et al.*, 2017). Por tanto, la calidad de agua regenerada que puede ofrecer un MBR es significativamente mayor que la de otros sistemas de depuración y ocupando para ello, menos terreno.

En todo caso, los costes de implantación y de operación de los MBRs los hace aconsejables para caudales superiores a 1.000 m³/d y para dar servicio a aglomeraciones urbanas de más de 2.000 habitantes equivalentes.

La recuperación de recursos de las aguas en la economía circular

Sabemos que los límites requeridos de calidad del agua regenerada que se utiliza para riego requieren procesos adicionales que encarecen los costes de tratamiento, y es posible que en un futuro próximo una legislación mucho más estricta suponga un incremento notable de estos costes. De hecho, en el mes de febrero de 2019 se ha dado un impulso importante en el Parlamento Europeo a una nueva norma para regular la reutilización que prevé mayores controles en la calidad y en los usos. Esta norma es el resultado de un proceso de reflexión y preocupación en el seno de la Unión Europea, donde los recursos hídricos están bajo una creciente presión que conlleva escasez y deterioro de la calidad. El calentamiento global, los patrones climáticos impredecibles y la sequía están restringiendo la disponibilidad de agua dulce necesaria para el desarrollo urbano y de la agricultura. Por ello, los europarlamentarios consideran que extender el uso de aguas regeneradas, especialmente en la agricultura donde pueden aportar nutrientes valiosos para la agricultura, como el nitrógeno o el fósforo, contribuiría a limitar la extracción de agua. Según la Comisión Europea, la frecuencia e intensidad de las sequías y su impacto económico y medioambiental ha aumentado de manera drástica en los últimos treinta años.

En todo caso, la regeneración llevada a cabo con garantías sanitarias y legislativas, de las aguas residuales, implica un elevado coste económico asociado a la operación de las instalaciones, su seguimiento y control, su mantenimiento, así como a la distribución del agua regenerada.

Por otra parte, la sostenibilidad de las instalaciones de tratamiento de aguas residuales es una cuestión en entredicho que ya ha sido objeto de estudios y de evaluaciones, al tratarse de sistemas que requieren el aporte de energía producida por lo general a partir de combustible fósil que genera gases de efecto invernadero (GEI). Además, el tratamiento de las aguas residuales presenta un balance energético negativo al estar orientado a metabolizar-transformar la materia orgánica presente en las aguas y no a producir energía a partir de esa materia orgánica. Minimizar estos impactos negativos precisa de mejoras en la eficiencia energética de las instalaciones de tratamiento a través de auditorías energéticas, mayores controles de los sistemas y la sustitución de equipos obsoletos. Es también necesario, optimizar el diseño y/o la operación de la planta para reducir la aireación o la adición de productos químicos, reducir el uso de combustible fósil para producir la energía necesaria, minimizar la generación de residuos y permitir el reciclaje de recursos. En este último ámbito, la generación de energía en el sitio, utilizando la carga orgánica de aguas residuales para producir energía (calor y electricidad) puede ser una opción en la que se

está trabajando intensamente. Para ello es crucial concentrar esta materia orgánica, y transformarla por la acción de microorganismos anaerobios, que operan en ausencia de oxígeno, produciendo biogás: una mezcla de dos gases principales: metano, gas combustible y dióxido de carbono (Mo & Zhang, 2013).

Son varios los retos a desarrollar en las instalaciones de tratamiento de aguas residuales del futuro, desde técnicos hasta medioambientales, pero todos ellos se aglutinan en hacer dichas instalaciones lo más flexible posible. Es necesario seguir trabajando en tecnologías y procesos que permitan reutilizar el agua residual para agricultura de una manera más eficiente y a un menor coste, reduciendo la huella de carbono y otros impactos ambientales asociados e intentando aprovechar todo lo aprovechable y maximizando los recursos, o como se conoce hoy en día, bajo el paraguas de la economía circular. En caso de lograrlo las instalaciones de tratamiento de aguas residuales actuales se podrán transformar en instalaciones de recuperación de recursos hídricos (*Water Resources Recovery Facilities-WRRF*) que conviertan las aguas residuales en una fuente de energía, nutrientes y agua recuperada (Viruela *et al.*, 2018).

En lo que respecta a la presencia de nutrientes en las aguas residuales, los riesgos de eutrofización asociados con la descarga de aguas residuales mal depuradas han promovido la implementación de procesos enfocados en las instalaciones de depuración para eliminarlos. Estos nutrientes suelen ser nitrógeno y fósforo en forma de iones de amonio y fosfato. El primero generalmente se elimina mediante separación y mediante el proceso de nitrificación-desnitrificación a través de la combinación de procesos anaerobios, anóxicos y aerobios, mientras que el fosfato se elimina principalmente por precipitación con la adición de productos químicos. En cualquier caso, estos procesos de eliminación implican el uso de energía e instalaciones adicionales y el consumo de productos químicos que pueden contribuir al calentamiento global debido a la emisión de 0,9 kg CO²/m³ (Hall *et al.*, 2011; Marbelia *et al.*, 2014). Por otro lado, el crecimiento de la población conlleva a un aumento en la demanda de fertilizantes a base de nutrientes destinados a la producción de alimentos, que pueden suministrarse a través de procesos de producción alternativos a los convencionales, en los próximos años (Yan *et al.*, 2018). De hecho, el fosfato es una de las materias primas críticas en el futuro desarrollo de la economía europea, pues no se produce en ningún país de la unión. Por todo ello, la recuperación de nutrientes presentes en las aguas residuales mediante procesos más baratos y eficientes en lugar de su eliminación, se ha convertido en un nuevo objetivo prioritario.

Una vía para recuperar el nitrógeno y el fósforo es su incorporación como estruvita, un compuesto que puede ser utilizado directamente como

fertilizante y que es producido bajo condiciones controladas durante la transformación en ausencia de oxígeno (digestión anaerobia), de la materia orgánica. También es posible aprovechar la capacidad fertilizante de las aguas residuales a través del uso de los lodos, donde se concentran los nutrientes y la materia orgánica a lo largo del proceso de depuración /regeneración y que se ha asociado siempre como un factor negativo del proceso de depuración, pero que actualmente, se puede utilizar para producir un fertilizante bio-estabilizado similar al compost.

En los últimos años, algunos microorganismos como cianobacterias y microalgas han despertado un gran interés por su potencial como vías para recuperar nutrientes de las aguas residuales (Arbib *et al.*, 2012; Beuckels *et al.*, 2015; Whitton *et al.*, 2016). El proceso no requiere la adición de productos químicos y puede reducir los costos de energía. Además, puede proporcionar simultáneamente la eliminación de nutrientes y reducir la huella de carbono, pues estas especies utilizan como fuente de carbono y energía, el dióxido de carbono y producen oxígeno, al igual que hacen las plantas y las masas forestales. El cultivo de microalgas que utilizan aguas residuales en biorreactores es una estrategia sostenible para eliminar contaminantes y producir microalgas para producir posteriormente, productos de alto valor (Mallick, 2002) o para usar como biocombustibles y bioproductos.

En algunos proyectos se ha planteado la producción de plásticos biodegradables, los polihidroxialcanoatos (PHA) son uno de los más prometedores, pues se pueden degradar a agua y dióxido de carbono en condiciones aerobias y a metano bajo condiciones anaerobias por microorganismos presentes en las aguas residuales (Khanna & Srivastava, 2005). Algunas bacterias, arqueas y microalgas sintetizan y acumulan intracelularmente como material de reserva estos bioplásticos, para usarlos posteriormente como fuente de carbono y energía. Estos polímeros, una vez extraídos y purificados presentan propiedades físicas similares a los plásticos derivados del petróleo.

Conclusión

Los conceptos de 'biorrefinería' o instalaciones recuperadoras de recursos en lugar de EDARs o ERARs comienzan a ser cada vez más habituales. Estas instalaciones empiezan a concebirse como industrias en las que se puede regenerar agua, producir energía eléctrica y calor, obtener compost u otros fertilizantes (como la estruvita) para usos agrícolas y productos de valor añadido. Las EDARs pueden convertirse muy pronto en instalaciones, que lejos de ser focos de contaminación y de consumo de energía, sean capaces de autoabastecerse energéticamente y generar

beneficios para la sociedad y el medio ambiente, dadas sus amplias posibilidades (Fig. 8).

Agradecimientos

La autora agradece al Consejo Insular de Aguas de Tenerife, la autorización para incorporar imágenes de las instalaciones gestionadas por dicho organismo al presente capítulo. Asimismo, agradece a BALTEN (Balsas de Tenerife) y a EMMASA (Empresa Mixta de Aguas de Santa Cruz de Tenerife, S. A.), la información aportada; a los miembros del grupo de investigación en “Tratamiento y Reutilización de Aguas” de la Universidad de La Laguna al que pertenece: su apoyo y colaboración para la redacción del presente texto, y por último, al IEHCAN – Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias – la edición del texto.

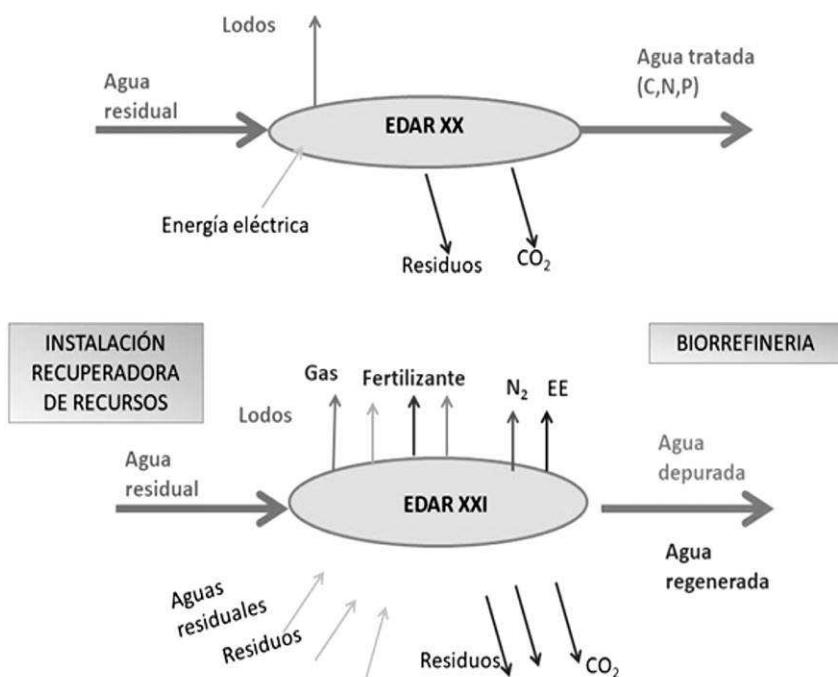


Fig. 8. Esquema ilustrativo de la evolución del concepto de EDAR (ESTACIÓN DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES) entre los siglos XX y XXI (Adaptado de Estévez, 2018).

Bibliografía

- ARBIB, Z., J. RUIZ, P. ALVAREZ, C. GARRIDO, J. BARRAGAN & J.A. PERALES (2012). *Chlorella stigmatophora* for urban wastewater nutrient removal and CO₂ abatement. *International Journal of Phytoremediation* 14(7): 714-725.
- BEUCKELS, A., E. SMOLDERS & K. MUYLAERT (2015). Nitrogen availability influences phosphorus removal in microalgae-based wastewater treatment. *Water Research* 77: 98-106.
- CONSEJO INSULAR DE AGUAS DE TENERIFE (1996). Plan Hidrológico de Tenerife. Memoria.
https://aguastenerife.org/index.php?option=com_sppagebuilder&view=page&id=10&Itemid=590 [Consultada el 18/07/2019]
- CONSEJO INSULAR DE AGUAS DE TENERIFE (2018). Plan Hidrológico de Tenerife. Segundo ciclo de planificación hidrológica 2015 – 2021. Memoria.
https://www.aguastenerife.org/index.php?option=com_content&view=article&id=138&Itemid=551 [Consultada el 17/07/2019].
- COTE P., Z. ALAM & J. PENNY (2012). Hollow fiber membrane life in membrane bioreactors (MBR). *Desalination* 288: 145-151.
- DÍAZ, T. (2019). España debe invertir 10.000 millones para depurar las aguas residuales. EL ECONOMISTA. <https://www.eleconomista.es/empresas-finanzas/agua-medioambiente/noticias/9811489/04/19/Espana-debe-invertir-10000-millones-para-depurar-las-aguas-residuales.html> [Consultada el 08/04/2019].
- DIRECTIVA 91/271/CEE DEL CONSEJO, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. DOUE-L-1991-80646.
- 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. DOUE-L-2000-82524.
- ESTÉVEZ, F. (2018). Codigestión a escala real en Sevilla EMASESA presentado en XV Jornadas Técnicas de Saneamiento y Depuración FACSA (Benicassim, Valencia).
- HALL, M.R., J. WEST, B. SHERMAN, J. LANE & D. DE HAAS (2011). Long-term trends and opportunities for managing regional water supply and wastewater greenhouse gas emissions. *Environmental Science Technology* 45(12): 5434-5440.
- HERNÁNDEZ, A. (2015). *Manual de diseño de Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales*. Madrid: Garceta.
- IAGUA (2019) <https://www.iagua.es/especiales/depuracion-agua-espana> [Consultada el 16/04/2019].
- IGLESIAS, R., E. ORTEGA, A. MARTÍNEZ, P. SIMÓN, L. MORAGA, J. ROBUSTÉ, E.B. GARCÍA & I. RODRÍGUEZ-RODA (2014). *Guía técnica para la implantación de biorreactores de membrana*. CEDEX. Centro de Publicaciones, Ministerio de Fomento. ISBN: 978-84-7790-548-6; ISSN: 0211-8203.
- INE (Instituto Nacional de Estadística)
<http://www.ine.es/jaxi/Tabla.htm?path=/t26/p067/p01/serie/&file=01005.px>.

- ISTAC (Instituto Canario de Estadística)
<http://www.gobiernodecanarias.org/istac/jaxi-istac/menu.do?uripub=urn:uuid:4c80614c-ee5b-4f77-aab5-564ec7675fe9>.
- JUDD, S. (2011). *The MBR Book. Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment*. Elsevier, Oxford. 2nd edition. ISBN: 978-0-08-096682-3.
- KHANNA, S. & A.K. SRIVASTAVA (2005). Recent advances in microbial polyhydroxyalkanoates. *Process Biochemistry* 40(2): 607-619.
- MA, J., R. DAI, M. CHEN, S.J. KHAN & Z. WANG (2018). Review. Applications of membrane bioreactors for water reclamation: Micropollutant removal, mechanisms and perspectives. *Bioresource Technology* 269: 532-543.
- MALLICK, N. (2002). Biotechnological potential of immobilized algae for wastewater N, P and metal removal: a review. *Biometals* 15: 377-390.
- MARBELIA, L., M.R. BILAD, I. PASSARIS, V. DISCART, D. VANDAMME, A. BEUCKELS, K. MUYLAERT & I.F.J. VANKELECOM (2014). Membrane photobioreactors for integrated microalgae cultivation and nutrient remediation of membrane bioreactors effluent. *Bioresource Technology* 163: 228-235.
- METCALF & EDDY INC. (1995). *Ingeniería de las aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización*. 3^a edición. ISBN: 84-481-1607-0.
- MITECO – MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA (2019). Evaluación de Recursos Hídricos. <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/evaluacion-de-los-recursos-hidricos/> [Consultada el 24/07/2019]
- MO, W. & Q. ZHANG (2013). Energy nutrients water nexus: Integrated resource recovery in municipal wastewater treatment plants. *Journal of Environmental Management* 127: 255-267.
- MONTOYA, F.G., R. BAÑOS, J.E. MEROÑO & F.M. MANZANO-AGUGLIARO (2016). The research of water use in Spain. *Journal of Cleaner Production* 112: 4719-4732.
- ONU (2017). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. *Aguas residuales. El recurso desaprovechado*. ISBN 978-92-3-300058-2. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247647> [Consultado el 02/03/2019]
- PARLAMENTO DE CANARIAS (2016). Consejería de Política Territorial, Sostenibilidad y Seguridad del Gobierno de Canarias - Diario de Sesiones 36/2016, de fecha 24/5/2016 - Punto 27. Comparecencia del Gobierno sobre los emisarios submarinos y conducciones de vertidos.
- REAL DECRETO 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo de la ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas. BOE-A-1996-7159.
- REAL DECRETO 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. BOE-A-2007-21092.
- RIERA, R., F. TUYA, A. SACRAMENTO, E. RAMOS, O. MONTERROSO & M. RODRÍGUEZ (2013). Influencia de la combinación de vertidos de aguas residuales y salmuera sobre la meiofauna. *Ciencias Marinas* 39(1): 15-27.

- RODRÍGUEZ, E. & R.J. VINAGRE (2018). Los retos de la depuración en el siglo XXI. *Tecnoqua*, 31 (Mayo-Junio), 2-9.
- STEGMANN, J.G. (2017). Depuración en España: La gran asignatura pendiente. ABC https://www.abc.es/natural/vivirenverde/abci-depuracion-espana-gran-asignatura-pendiente-201703151331_noticia.html#vca=mod-sugeridos-p3%E2%80%A6 [Consultada el 31/05/2019].
- TALVITIE, J., A. MIKOLA, A. KOISTINEN & O. SETÄLÄ (2017). Solutions to microplastic pollution removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies. *Water Research* 123: 401-407.
- VIRUELA, A., A. ROBLES, F. DURÁN, M.V. RUANO, R. BARAT, J. FERRER & A. SECO (2018). Performance of an outdoor membrane photobioreactor for resource recovery from anaerobically treated sewage. *Journal of Cleaner Production* 178: 665-674
- WHITTON, R., A. LE MÉVEL, M. PIDOU, F. OMETTO, R. VILLA & B. JEFFERSON (2016). Influence of microalgal N and P composition on wastewater nutrient remediation. *Water Research* 91: 371-378.
- XIAO K., S. LIANG, X. WANG, C. CHEN & X. HUANG (2019). Current state and challenges of full-scale membrane bioreactor applications: A critical review. *Bioresource Technology* 271: 473-481.