

MATERIA 3: UTILIZACIÓN SOSTENIBLE DE LOS RECURSOS NATURALES

Proyecto de investigación 3: El impacto del cuidado de la salud humana y animal en el recurso natural del agua desde un enfoque holístico One Health.

Objetivo 1.- La depuración en pequeños municipios: retos y soluciones. Análisis de las tecnologías existentes y de las soluciones basadas en la naturaleza.

NOVIEMBRE 2021

tiempo de actuar

Proyecto de investigación 3: El impacto del cuidado de la salud humana y animal en el recurso natural del agua desde un enfoque holístico One Health

Fecha: noviembre 2021

Índice

INTRODUCCIÓN	7
ESTACIONES DEPURADORAS DE AGUA RESIDUAL (EDAR)	13
SITUACIÓN EN ESPAÑA	17
LA LEGISLACIÓN EN MATERIA DE DEPURACIÓN	23
DESAFÍOS DE LA DEPURACIÓN	31
SOLUCIONES TECNOLÓGICAS	41
CASOS DE ÉXITO	59
SOLUCIONES ADAPTADAS A LA ACTIVIDAD ECONÓMICA EN MEDIOS RURALES	59
SOLUCIONES ADAPTADAS A LA DEPURACIÓN DE LOS MUNICIPIOS	63
SOLUCIONES ORIENTADAS A LA RECUPERACIÓN DE RECURSOS PARA LA AGRICULTURA	70
RECOMENDACIONES PARA LOS PEQUEÑOS MUNICIPIOS	79
ENTREVISTAS	85
JUAN JOSÉ SALAS. FUNDACIÓN CENTRO DE LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS DEL AGUA	85
DOLORES FORNALS. INSTITUTO ARAGONÉS DEL AGUA	88
BIBLIOGRAFÍA	92



Introducción

6 de cada 10 personas carecen de acceso a instalaciones de saneamiento gestionadas de forma segura.

La preocupación de esta situación se refleja en el sexto objetivo de desarrollo sostenible.

—Organización de las Naciones Unidas—

Introducción

El agua es fundamental para la vida y un recurso estratégico. Su demanda aumenta de la mano con el crecimiento de la población y de actividad económica, y con ello la producción de aguas residuales [1]. La importancia de este recurso ha hecho que la ONU (Organización de las Naciones Unidas) reconozca de manera oficial el derecho humano al agua y al saneamiento. Además, incluye en la Agenda 2030 el Objetivo de Desarrollo Sostenible “Agua Limpia y Saneamiento” (ODS 6), persiguiendo el acceso universal a los servicios de saneamiento e higiene, así como mejorar la calidad del agua reduciendo su contaminación [2].

En la Península Ibérica, el volumen de negocio agregado de las empresas dedicadas a la depuración de agua experimentó un crecimiento del 2,4% en 2020, hasta situarse en 1300 millones de euros, según el Observatorio Sectorial DBK. Para reafirmar estas cifras, se estima que el caudal total depurado por las actuales 4700 EDAR (Estación Depuradora de Aguas Residuales) fue de 4950 hectómetros cúbicos en ese año, lo que supuso un aumento del 1,2% respecto a 2019.

Es necesario destacar que el año 2020 estuvo marcado por la crisis sanitaria del COVID-19, lo que, acompañado de un confinamiento, tuvo un importante efecto en la disminución de la actividad industrial y del turismo (España es uno de los países que más turistas recibe). En condiciones normales se hubiera esperado unas necesidades de depuración incluso mayores [3].



Figura 1. Composición de las aguas servidas [1]

El origen y la composición de las aguas de vertido que llegan a la estación depuradora variarán según la zona y la época, teniendo su origen en el agua residual domestica e industrial, a la que hay que sumarle

el agua de lluvia. Para referirse al conjunto de aguas residuales que tienen un origen antropogénico se usa el término de aguas servidas.

El caudal de agua a depurar se define como el volumen de agua que llega a la estación depuradora por unidad de tiempo. Este caudal varía en función del tamaño de la población, del sistema de alcantarillado, del nivel de industrialización de la zona y del volumen de lluvias. Pese a esta variación, pueden establecerse unos intervalos habituales tanto para los caudales como para las características fisicoquímicas de los vertidos, los cuales determinarán el tamaño y tipología del sistema de tratamiento.

Los caudales de aguas residuales producidas por las poblaciones se caracterizan por presentar grandes variaciones horarias, coincidiendo las franjas de menor producción con las horas nocturnas. La Figura 2 y la Figura 3 muestran dichas variaciones al comparar poblaciones rurales con alta y baja densidad demográfica, respectivamente. Como se ve, su variación a lo largo del día en zonas de baja densidad es menor que en las zonas más densamente pobladas; debido a que su menor población conlleva unos picos de vertido menores. Por este motivo, el problema de las EDAR en medios rurales no es absorber únicamente los picos de producción diarios, sino los incrementos estacionales. Esto suele ocurrir durante el periodo estival, especialmente en las zonas turísticas donde la población se multiplica en esos meses [5].

El problema de las EDAR en medios rurales no es absorber únicamente los picos de producción diarios, sino los incrementos estacionales. Esto suele ocurrir en durante el periodo estival, especialmente en las zonas turísticas donde la población se multiplica en esos meses.

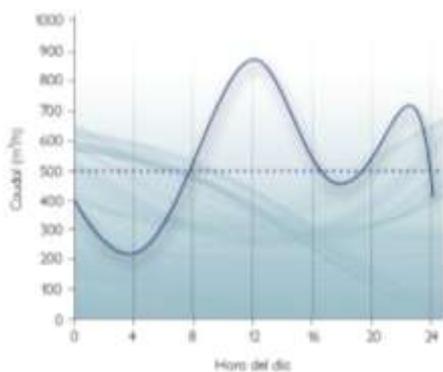


Figura 2. Variación del caudal de vertido en función de la hora del día en poblaciones rurales densamente pobladas [1].

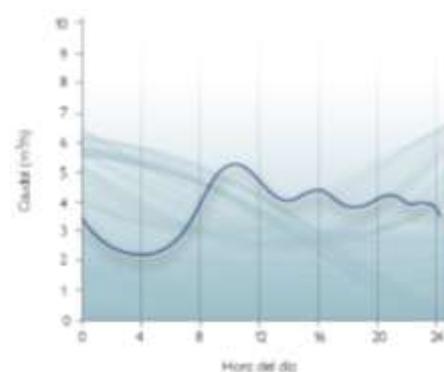


Figura 3. Variación del caudal de vertido en función de la hora del día en zonas densamente poco pobladas [1].

Contaminantes habituales y métodos de análisis

Además del caudal, la composición exacta de las aguas residuales varía enormemente en contaminantes y concentración dependiendo de la zona. Los contaminantes más comunes se pueden clasificar en función de su densidad; de este modo, en una disolución en reposo se distribuirán en distintas posiciones, según su densidad, como se muestra en la Figura 4.

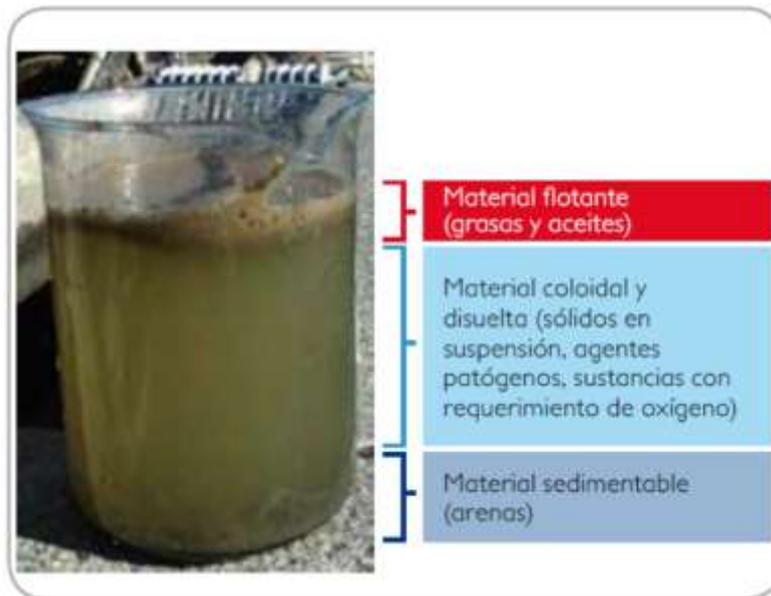


Figura 4. Distribución de los contaminantes en una muestra de agua residual [1].

- *Material grueso: son los residuos más voluminosos y en esta categoría se incluyen piedras, grava, arena, ramas, plásticos, papeles, latas, botellas, componentes orgánicos y muchos otros compuestos residuales.*
- *Arenas: en esta categoría se incluyen las partículas de menor tamaño que las anteriores, incluyendo las arenas, gravas y partículas de origen tanto mineral como orgánico.*
- *Aceites y grasas: dado que tienen una menor densidad que el agua, estos compuestos quedan flotando en la superficie. Su procedencia puede ser tanto doméstica como industrial.*
- *Sólidos en suspensión: aunque no sean solubles en agua, su pequeño tamaño hace que queden en suspensión, necesitando de tiempos largos de reposo para decantar. Su naturaleza y procedencia son muy variadas.*
- *Sustancias con requerimientos de oxígeno y nutrientes: en esta categoría se incluyen aquellos compuestos orgánicos e inorgánicos fácilmente biodegradables y que pueden provocar eutrofización en los cuerpos de aguas. receptores.*

Una vez conocidas las categorías en las que se clasifican los contaminantes, se pueden entender mejor qué medidas se emplean para su control. Las pruebas más habituales son:

Aceites y grasas: aprovechando la inmiscibilidad de estos compuestos con el agua, el contenido de grasas y aceites presentes se determina mediante su extracción de una muestra empleando un disolvente adecuado (apolar), posteriormente se procede a la evaporación de dicho disolvente, dejando solo la grasa y aceite como residuo que posteriormente pueden ser pesados.

Contaminación microbiológica: El indicador más habitual para determinar el nivel de contaminación por patógenos en aguas es la determinación del grupo de los coliformes.

DQO (Demanda Química de Oxígeno) y DBO₅ (Demanda Bioquímica de Oxígeno a los cinco días): ambas medidas cuantifican la cantidad de materia orgánica presente en el agua residual, medida en forma de mg O₂/L. Aunque las dos técnicas mencionadas miden “lo mismo”, la información que proporcionan es distinta: mientras que DBO₅ indica la materia orgánica que hay en el medio susceptible de ser degradada biológicamente (mediante microorganismos), la DQO indica la materia orgánica total que hay en el medio. DBO y DQO están relacionadas y mantienen su relación para cada tipo de agua.

Sólidos en Suspensión (SS): cuantifica el impacto de los sólidos en el cauce receptor, cuya acumulación da lugar a la turbidez y a la formación de fangos. Una de las formas más comunes de medir los SS es filtrar una cantidad conocida de agua residual, secar el residuo en el horno y pesarlo en la balanza. A día de hoy es más habitual medirlo mediante su turbidez, permitiendo tomar medidas en continuo.

Nitrógeno Total (NT) y Fósforo Total (PT): medida de nutrientes responsables de la eutrofización (crecimiento excesivo de algas y otras plantas). Para determinar el nitrógeno total se emplea el método Kjeldahl, el cual determina la suma del nitrógeno orgánico en sus diversas formas (proteínas y ácidos nucleicos en diversos estados de degradación, urea, aminas, etc.) y el ion amonio NH_4^+ , presentes en una muestra de agua. En cuanto al fósforo, su medida es algo más compleja y requiere de la adición de ácido sulfúrico para medir el fósforo hidrolizable.

La relación DBO_5/DQO es un factor importante, que indica la biodegradabilidad de las aguas residuales urbanas. Las sustancias biodegradables pueden ser utilizadas como sustrato por microorganismos, que las emplean para producir y crear otros nuevos tejidos.

El cálculo de los habitantes-equivalentes es un factor sumamente importante en el ámbito de la depuración de las aguas residuales, ya que se emplea para estimar las necesidades de depuración de un vertido y, en consecuencia, aplicar la tecnología de depuración que se adapte a ellas. Hay que tener en cuenta la población de derecho (empadronada) y la población de hecho (empadronados y transeúntes), que puede ser mucho mayor en los núcleos pequeños teniendo en cuenta la estacionalidad. En cualquier caso, los habitantes-equivalentes siempre tienen que ser mayores que los habitantes de hecho, ya que los habitantes-equivalentes incluyen los habitantes de hecho y los vertidos procedentes de la industria.



Estaciones Depuradoras de Agua Residual

*El nuevo paradigma de este siglo
es pasar del agua residual al agua
reutilizable.*

*—Fernando del Amo. Aqualia—
(Fuente iAgua)*

Estaciones depuradoras de agua residual (EDAR)

Una vez que el agua es usada se convierte en agua residual. Las aguas residuales son conducidas a una estación depuradora de aguas residuales (EDAR) donde son tratadas en diferentes fases antes de volver a ser vertidas al medio ambiente. De esta forma se protege la salud y el medio ambiente al eliminar del agua microorganismos, determinados compuestos químicos y materia orgánica, entre otros.

Cuando se diseña una depuradora se tiene en cuenta la carga contaminante que le llega y la que le va a llegar en un futuro. Al ser infraestructuras con periodos de vida útil largos y costosas de construir, deben dimensionarse teniendo en cuenta el crecimiento de la población en los siguientes años.

De forma general, las EDAR tienen las etapas que se describen a continuación y que se muestran en la Figura 5: 1) Pretratamiento, 2) Tratamiento primario, 3) Tratamiento secundario, y 4) Tratamiento terciario (si existe reutilización de agua). A continuación, se explican en más detalle:

Tratamiento primario: en esta fase se realiza un tratamiento físico-químico del agua que consiste en la aportación de reactivos químicos al agua. Este tratamiento se subdivide en dos fases consecutivas que requieren de una agitación fuerte del agua, seguida de una agitación lenta. La primera fase, denominada coagulación, consiste en adicionar sales metálicas, como puede ser el sulfato de aluminio que, por diferencia de cargas eléctricas, permite la unión entre partículas de medida muy pequeña, denominadas coloidales, las cuales todavía no decantan. En la segunda fase, denominada floculación, se adicionan polímeros al agua que permiten la unión entre los coágulos, formando un elemento visible de mayor medida y que decanta rápidamente.

Tratamiento secundario: En esta fase de la depuración, se elimina la materia orgánica disuelta medida como demanda biológica de oxígeno (DBO₅) y demanda química de oxígeno (DQO). Además, también se retira el exceso de nutrientes del agua, que son principalmente nitrógeno y fósforo. Cada una de estas etapas se realiza en los dos grandes elementos de la instalación: el reactor biológico y la decantación secundaria.

En el reactor biológico llega un agua pretratada, pero cargada de materia orgánica disuelta, que se convierte en la fuente de alimentación de los microorganismos presentes en el reactor biológico. A este tanque es necesario aportar la cantidad necesaria de aire para la supervivencia, crecimiento y reproducción de las bacterias.

Los microorganismos encargados del tratamiento biológico residen durante un tiempo determinado en el sistema, antes de ser extraídos del mismo para mantener una población adaptada a la carga contaminante que se pretende tratar, con el fin de eliminar completamente la materia orgánica disuelta. Al final del reactor biológico, el agua está limpia de contaminantes, pero los microorganismos depuradores siguen mezclados en ella. En la decantación secundaria se produce la separación entre el agua tratada y el fango generado en el proceso biológico.

Línea de fangos y otros residuos. A lo largo del proceso de depuración, se han generado dos tipos de residuos o subproductos:

Durante la primera etapa de la depuración, en el pretratamiento se genera un residuo grueso, que se retira en contenedores y se transporta a un gestor autorizado.

El segundo tipo de residuo se produce en las decantaciones. Aquí se generan los denominados lodos, que son sometidos a un proceso de deshidratación en la propia instalación. Posteriormente son evacuados por un gestor autorizado hasta su tratamiento final. Estos lodos deshidratados pueden destinarse a plantas de compostaje para producir abono, ser incinerados o ser depositados en vertederos.

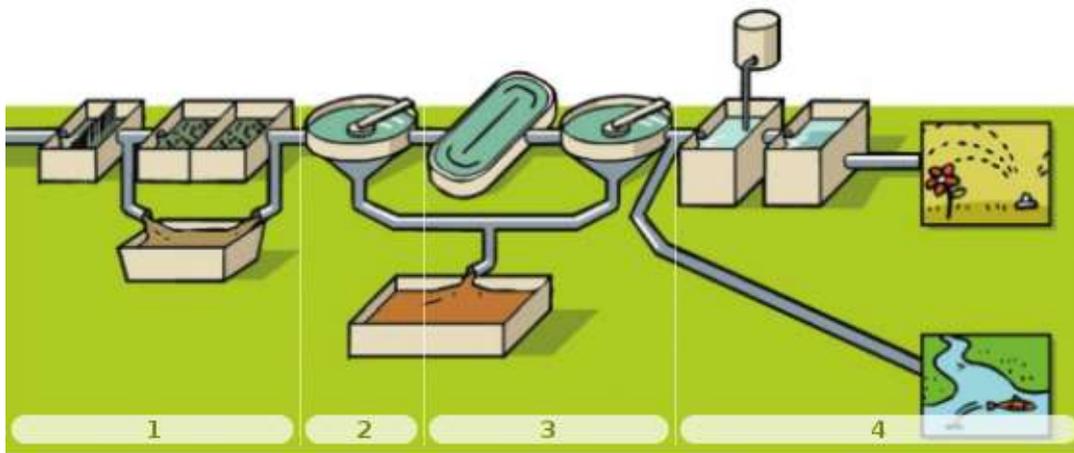
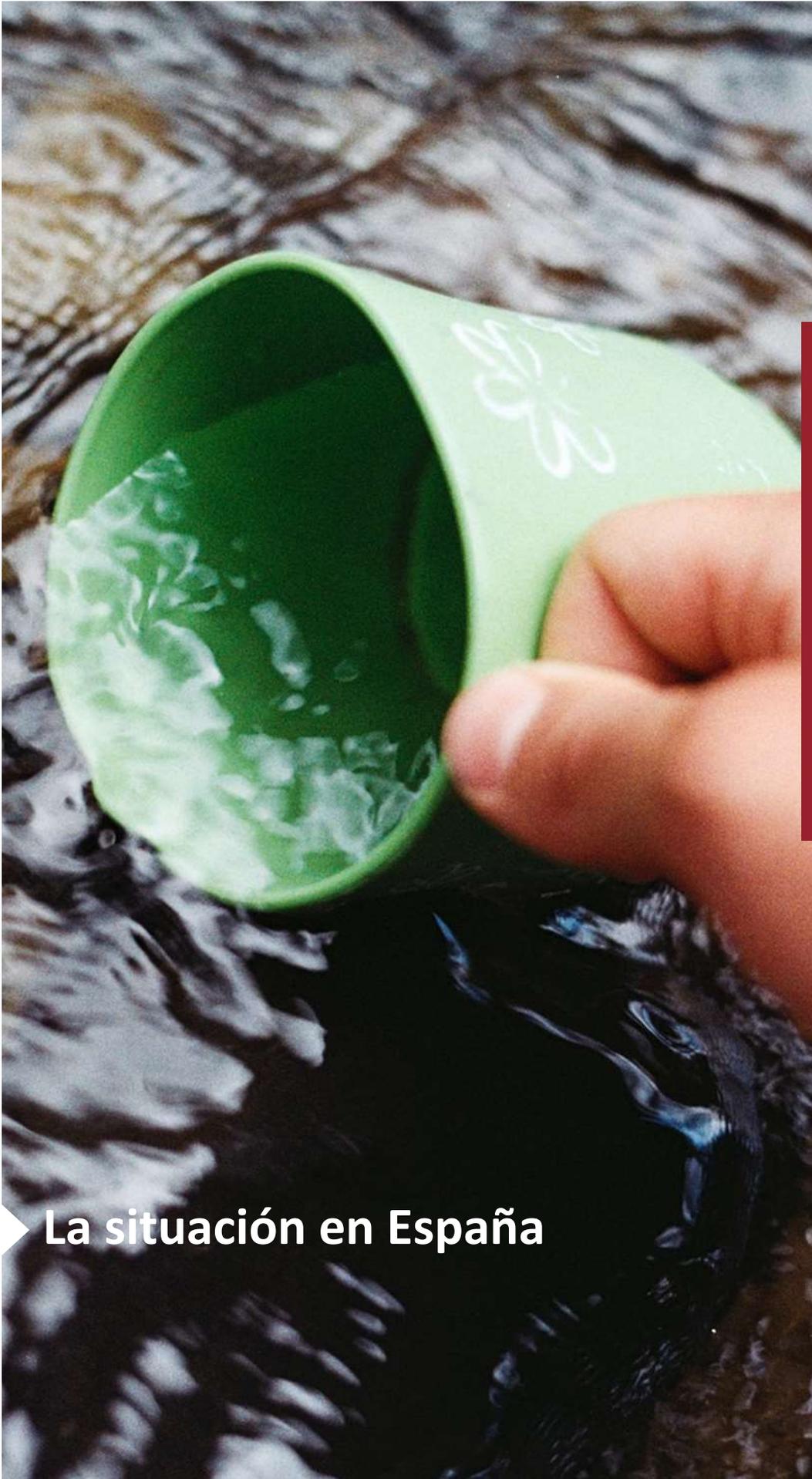


Figura 5. Esquema de las distintas etapas de una EDAR [1].

Una vez han finalizado los tratamientos mencionados anteriormente las aguas son vertidas al medio ambiente. Sin embargo, cada vez es más habitual la reutilización de esta agua y todo apunta a que, en el futuro, el agua regenerada será mucho más utilizada. Para poder reutilizar el agua es necesario aplicar un tratamiento adicional de depuración denominado tratamiento terciario.

Estos tratamientos pueden usar distintos procesos tecnológicos o la combinación de varios de ellos. La elección de las tecnologías concretas depende de los contaminantes específicos, de su concentración, de la calidad de agua necesaria y del volumen de vertido. Adicionalmente, es necesario tener en cuenta el consumo energético y los costes asociados a la instalación del sistema.

Los usos de esta agua regenerada son varios, pudiendo destacarse el uso en el riego de agricultura o de zonas verdes y la reutilización dentro del ciclo del agua de la industria. Es necesario tener en cuenta que estas aguas reutilizadas no deben entrañar riesgo para la salud. Por poner un ejemplo, la reutilización en el riego o en las aguas de procesos agroindustriales —como el lavado— requiere niveles de purificación y tratamientos distintos.



▶ La situación en España

La depuración debe ser un proceso personalizado a las necesidades de cada zona.

*—Irene Bustamante,
Coordinadora del
Máster de Hidrología
y Gestión de
Recursos Hídricos—*

Situación en España

Distribución de las EDAR en el territorio español

La despoblación rural en España comenzó con la industrialización a finales del siglo XIX. A pesar de que a inicios del siglo XXI esta pérdida de población se vio mitigada por la inmigración, la tendencia sigue a la baja.

Actualmente, en España el número de municipios considerados como rurales representa el mayor porcentaje del total nacional. Como se puede observar en la Figura 6, la mayoría de municipios españoles se encuentran por debajo de los 20 000 habitantes, llegando a suponer el 95% del total.

Actualmente, el número de municipios considerados como rurales representa el mayor porcentaje del total nacional.

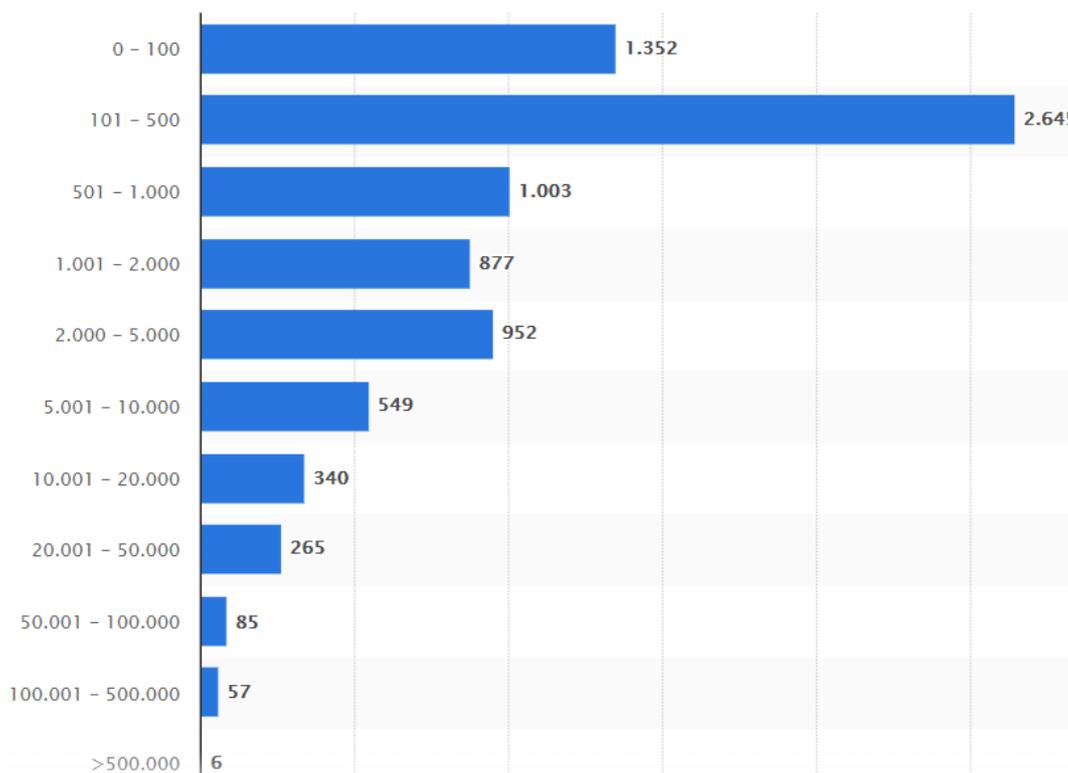


Figura 6. Número de municipios por intervalo de habitantes [6].

Otro punto a tener en cuenta al evaluar la depuración en los pequeños municipios es la distribución de la población. Como se observa en la Figura 7, las regiones costeras y de la capital se encuentran densamente pobladas, quedando las zonas interiores con menor población. Este contraste es tan marcado que coloca a España como el país con mayor porcentaje de territorio deshabitado (casi el 90%), teniendo en el otro extremo a Barcelona como el punto de mayor densidad poblacional en Europa, según un estudio del Banco de España [7].

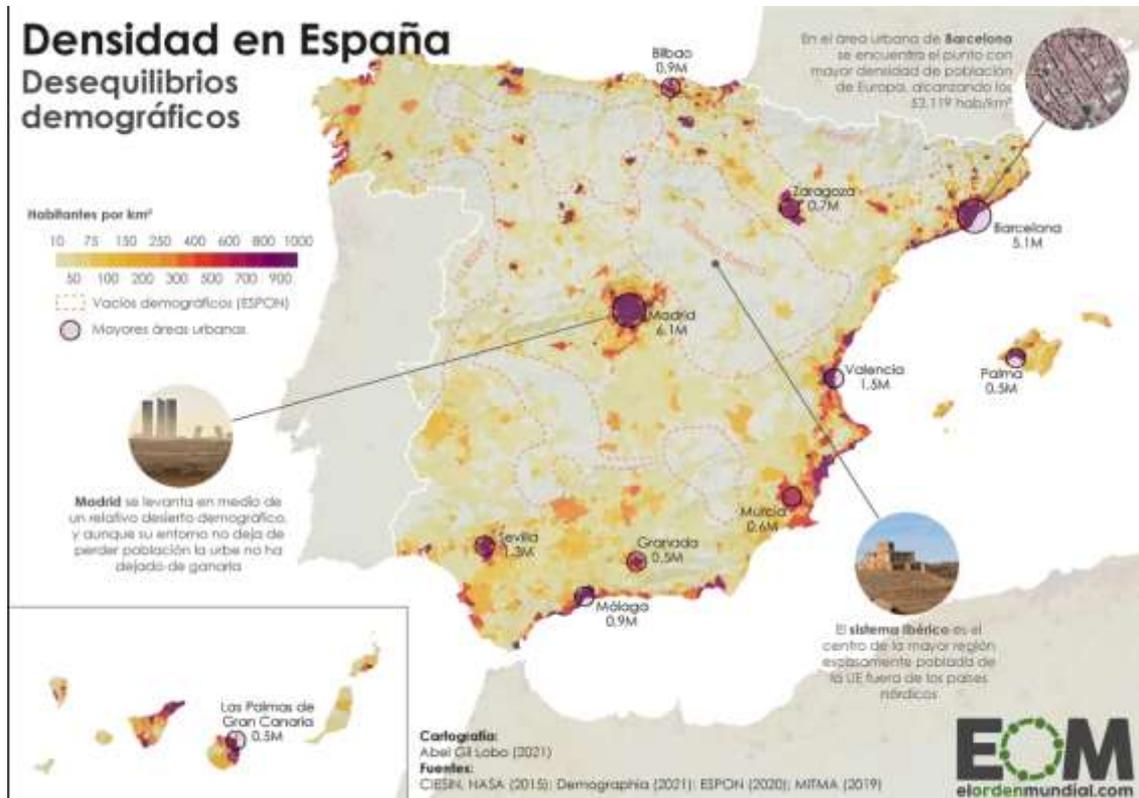


Figura 7. Distribución de la población en el territorio español [7].

Esta fuerte diferencia poblacional a lo largo del territorio tiene como consecuencia una distribución heterogénea de las depuradoras, que se concentran en las regiones más pobladas frente a las menos pobladas (Figura 8). De esta forma se generan zonas que no tienen acceso a sistemas de depuración al no poder costear su instalación y mantenimiento, teniendo que verter sus aguas residuales directamente al medio.

Cabe mencionar que existen depuradoras que están trabajando por debajo de la mitad de su caudal de diseño (caudal máximo que pueden depurar) debido, entre otras razones, a que estaba planificado que dieran servicio a las pequeñas localidades circundantes pero que, por falta de fondos, nunca se llegaron a conectar los conductos de vertido con la EDAR.

Además de los impactos ambientales producidos por esta falta de depuración, España es uno de los países con más desertificación de la Unión Europea (con más de un 74% de su territorio) por lo que es de los países que más se beneficiaría de la reutilización del agua. Pese a esto, solo las grandes depuradoras tienen la capacidad para invertir en los tratamientos necesarios para alcanzar los estándares de pureza requeridos, haciendo necesarias nuevas tecnologías económicamente accesibles en el caso de los pequeños municipios.

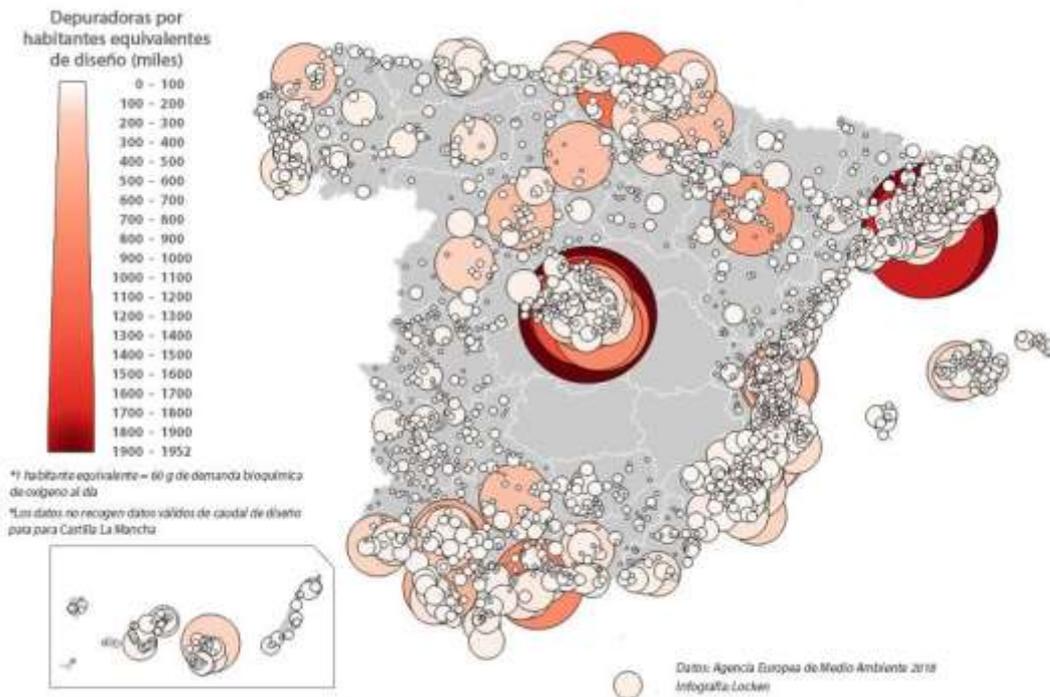


Figura 8. Distribución de las depuradoras en España [7].

Problemas derivados

El agua residual sin depurar presenta una serie de componentes, que dependiendo de su naturaleza y concentración, pueden producir alteraciones en los equilibrios fisicoquímicos y biológicos del ecosistema receptor [8]. Entre estos efectos destacan:

- **Aparición de fangos y flotantes:** si las aguas residuales se vierten sin tratar, los residuos sólidos gruesos (plásticos, restos de alimentos, etc.) y sólidos en suspensión sedimentables (arenas y materia orgánica), pueden originar sedimentos sobre el fondo o acumulación en la superficie formando capas de flotantes. Los depósitos de fangos y flotantes originan un impacto visual que afecta al ecosistema y generan malos olores.
- **Agotamiento del contenido de oxígeno presente en las aguas:** los organismos acuáticos necesitan oxígeno para vivir. Al verter a los medios receptores residuos fácilmente oxidables (materia orgánica y compuestos amoniacales), las bacterias empezarán a alimentarse y consumirán oxígeno del medio. Si este consumo es excesivo, el contenido en oxígeno del agua descenderá por debajo de los valores mínimos necesarios para el desarrollo de la vida acuática, produciéndose la muerte de los organismos existentes en el medio.
- **Fenómenos de eutrofización en los medios receptores:** debido al aporte excesivo de nutrientes (nitrógeno y fósforo principalmente), se produce el crecimiento masivo de algas y otras plantas en los medios receptores. Estos crecimientos pueden llegar a impedir el empleo de estas aguas para usos domésticos e industriales.
- **Daño a la salud pública:** el aumento de la concentración y propagación de microorganismos patógenos para el ser humano, en el medio receptor, pueden provocar enfermedades que se propaguen a través de las aguas contaminadas vertidas, destacando el tifus, el cólera, la disentería, la poliomielitis y la hepatitis (A y E).
- **Influencia sobre la microbiología del medio natural receptor:** tras un vertido de aguas residuales a un ecosistema acuático, se produce una disminución en el número de eubacterias (mayoría de las bacterias presentes, cuya composición química es similar a la de las eucariotas) y algas, mientras aumentan las que se desarrollan en aguas residuales con gran cantidad de materia

orgánica, como la *Sphaerotilus natans*, (forma parte de los llamados hongos del lodo y causa *bulking* en los procesos de lodos activados), que son más perniciosas.

- **Introducción de vertidos químicos tóxicos o inhibidores:** algunos vertidos industriales pueden producir contaminación de los organismos por este tipo de compuestos. A pesar de que una exposición aguda a los mismos no tiene por qué suponer un problema, la bioacumulación de los mismos de forma crónica puede suponer un fuerte impacto en los seres vivos que entren en contacto con los mismos.
- **Impacto en la economía de la zona:** en ciertas zonas rurales, el mantenimiento del medio ambiente tiene especial importancia, dado que el turismo es un factor determinante para el desarrollo sostenible del territorio de la zona. Los efectos negativos mencionados anteriormente reducen el valor paisajístico de la zona.



Figura 9. Ejemplo de contaminación en un río por la falta de tratamiento en las aguas residuales vertidas [8].

Se calcula que en España la necesidad económica, para los próximos diez años, es de 25 000 millones de euros adicionales para todo el ciclo urbano del agua (abastecimiento, depuración, digitalización, renovación, etc.). Esta inversión económica supondría una mejora del medio ambiente, creando empleo de calidad y fomentando la economía circular. Actualmente, los fondos de recuperación europeos son una excelente oportunidad para impulsarlo [9].



La legislación en materia de depuración

Las medidas de protección del agua protegen a mucho más que el agua.

—Consejo para la Defensa de Recursos Naturales—

La legislación en materia de depuración

El diseño de las EDAR ha estado condicionado en cada momento por los requerimientos exigidos en las diferentes normativas. Las consideraciones ambientales han ejercido una gran influencia en esta legislación, en especial en lo relativo al control del espacio, ruidos, olores y eficiencia energética.

En la Tabla 1 se recoge la cronología de la legislación más relevante en materia de depuración de aguas.

Tabla 1. Cronología de la legislación aplicada en España [10]

Año	Ley
1974	Clasificación de ríos. Recomendaciones CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas).
1985	LEY DE AGUAS Control de vertido mediante autorización. Estrategia de acuerdo con Plan Hidrológico. Canon de vertido.
1986	INCORPORACIÓN CEE Directivas de Objetivos de Calidad (OOCC). Estrategia según usos del agua.
1991	DIRECTIVA 91/271/CEE Estrategia de normas de emisión.
1995	PLAN NACIONAL DEPURACIÓN Diagnóstico de situación. Evaluación de necesidades a nivel nacional. Depuración para cumplimiento de la Directiva.
1998	DIRECTIVA 98/15/CE DE LA COMISIÓN POR LA QUE SE MODIFICA LA DIRECTIVA 91/271/CEE Tratamiento de las aguas residuales urbanas. Zonas sensibles propensas a eutrofización.
1999	DECISIÓN DEL CONSEJO 1999/468/CE Competencias de ejecución atribuidas a la Comisión por el Consejo de la Unión Europea.
2000	DIRECTIVA MARCO DEL AGUA – DMA Protección ecosistemas. Recuperación costes.
2003	REGLAMENTO (CE) No 1882/2003 Adaptación de la decisión 1999/469/CE.
2006	DECRETO RÉGIMEN JURÍDICO DE REUTILIZACIÓN Criterio de calidad según usos.
2007	DECRETO RÉGIMEN JURÍDICO DE REUTILIZACIÓN Criterios de calidad según usos.
2008	REGLAMENTO (CE) No 1137/2008 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO Adaptación a la Decisión 1999/468/CE del Consejo determinados actos. Adaptación al procedimiento de reglamentación con control.
2012	PLAN DE REUTILIZACIÓN DE AGUAS DEPURADAS Capacidad prevista de regeneración de aguas depuradas.
2013	DIRECTIVA 2013/64/UE DEL CONSEJO DE 17 DE DICIEMBRE DE 2013 Modifica las Directivas 91/271/CEE y 1999/74/CE del Consejo y las Directivas 2000/60/CE, 2006/7/CE, 2006/25/CE y 2011/24/UE del Parlamento Europeo y del Consejo como consecuencia de la modificación del estatuto de Mayotte respecto de la Unión Europea.

Recomendaciones CEDEX. En 1974, el Centro de Estudios Hidrográficos (uno de los órganos del CEDEX, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas) estableció las recomendaciones para el diseño de instalaciones de depuración, donde, por primera vez, se establecía que los tratamientos de depuración propuestos debían cumplir unas condiciones para la calidad del efluente. Posteriormente, en 1984, se rebajaron los límites máximos admitidos en materia de sólidos en suspensión y DBO₅ hasta los 30 mg/L.

Ley de Aguas de 1985. Con esta ley se inició una nueva visión en el control de la contaminación al incluir una serie de estipulaciones que significaron un cambio de estrategia en relación con los vertidos. Los aspectos más relevantes fueron:

- *Todos los vertidos capaces de provocar contaminación pasaron a requerir una autorización. De esta forma era obligatorio llevar a cabo medidas correctoras para minimizar el impacto de los vertidos al medio.*
- *Los vertidos de agua residual empezaron a ser gravados con un canon en función de su tipología y características contaminantes.*
- *El incumplimiento de los límites impuestos en la autorización abriría un expediente sancionador por daños al dominio público hidráulico.*

Planes Hidrológicos de Cuenca (PHC): junto a la ley de aguas de 1985 se establecieron los primeros PHC que recogían las condiciones de calidad y la ordenación de los vertidos, ya que hasta ese entonces las autorizaciones de vertido carecían de referentes, al no concretarse los objetivos de calidad.

La aprobación de estos planes se tradujo en la construcción de instalaciones con evidentes mejoras sobre las de la década anterior. Empezando por la línea de tratamiento del agua, se favoreció el cerramiento del pre-tratamiento para evitar malos olores y se mejoró el diseño del tratamiento biológico, en el que ya se empezó a utilizar una aireación por difusión. Paralelamente, la línea de tratamiento de fangos mejoró en su espesamiento, estabilización y deshidratación, abriendo así nuevas posibilidades para su uso y disposición final.

A finales de la década de los ochenta se debatió sobre el interés de la incineración de fangos en algunas instalaciones, así como sobre la aplicación de reactivos químicos para la reducción de la carga industrial y limitar su efecto en el tratamiento biológico. También se sentaron las bases para reducir los nutrientes (nitrógeno y fósforo) presentes en los vertidos, aunque hasta la década siguiente no se aplicaron estos procesos en sistemas dignos de mención.

Directiva 91/271/CEE sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. Con el objetivo de proteger al medio ambiente de los efectos negativos de los vertidos de las aguas residuales procedentes de los núcleos urbanos y de determinados sectores industriales, a través de su recogida, tratamiento y posterior vertido, prevé que las aguas residuales tratadas se reutilicen como parte del requisito sobre el vertido de aguas residuales. El enfoque dado por la Ley de Aguas pronto se vio sobrepasado al incorporarse España a la Comunidad Económica Europea en 1986 y tener que cumplir con la normativa europea. Primero fueron las directivas de objetivos de calidad o de primera generación (baños, vida piscícola, prepotables, etc.) y después las de segunda generación (normas de emisión) cuyo principal exponente fue la Directiva 91/271/CEE sobre depuración de aguas residuales urbanas. Todas ellas tuvieron que ser incorporadas a la legislación nacional y, por tanto, se convirtieron en normas de obligado cumplimiento en nuestro país. Esta directiva imponía a todos los estados miembros la implantación de sistemas de depuración en todas las aglomeraciones urbanas (tratamientos adecuados para las de ≤ 2000 habitantes equivalentes), con exigencias bastante similares a las ya recomendadas por el CEDEX unos años antes.

Para vertidos realizados en las denominadas “zonas sensibles” se requería adicionalmente la reducción de nutrientes (nitrógeno y fósforo), lo que obligó a diseñar las plantas depuradoras con otro esquema, sobre todo en lo que se refiere al tratamiento biológico. El artículo 5 de la Directiva 91/271/CEE establece

que todos los estados miembros están obligados a definir estas zonas de acuerdo con los criterios indicados. La asignación de estas zonas debe ser revisada y evaluada cada cuatro años.

Plan Nacional de Depuración (PND): tras la aprobación de la Directiva 91/271/CEE era necesario un plan que la trasladase a la legislación nacional, lo cual resultó en la elaboración del Plan Nacional de Depuración de 1995. El PND permitió planificar las actuaciones que debían acometerse y aseguró la coordinación entre las administraciones implicadas. Por aquel entonces, se habían construido cerca de quinientas plantas depuradoras en España, de las cuales no todas cumplían las exigencias de la directiva, alcanzando un nivel de cobertura próximo al 40% en relación con toda la carga contaminante. De esta manera se llegó a determinar, y por tanto incluir en el Plan:

- Las plantas depuradoras nuevas que habría que construir.
- Las instalaciones que debían ampliarse en relación con el caudal o con la carga contaminante.
- Las plantas que solo contaban con tratamiento primario y que debían completarse con un tratamiento secundario.
- Las depuradoras que había que adaptar a las nuevas exigencias derivadas de la definición de zonas sensibles o de objetivos de calidad más exigentes.
- Los sistemas de tratamientos de fango que habría que modificar para evitar su vertido al agua, etc.

En cuanto a la gestión de los sistemas de depuración se recomendó, por parte de la Administración Central del Estado a las comunidades autónomas (CCAA), la creación de entes supramunicipales de gestión que se hicieran cargo de la operación de las instalaciones. Además, se generalizó el cobro del denominado canon de saneamiento que permitía cubrir los costes de explotación y mantenimiento, contribuyendo de esta manera al éxito del Plan de Depuración y, por tanto, al cumplimiento de la directiva europea sobre depuración como se observa en la Figura 10. Evolución del grado de conformidad de la depuración en España con las exigencias de la Directiva 91/271/CEE entre 1995 y 2008 [10].Figura 10.

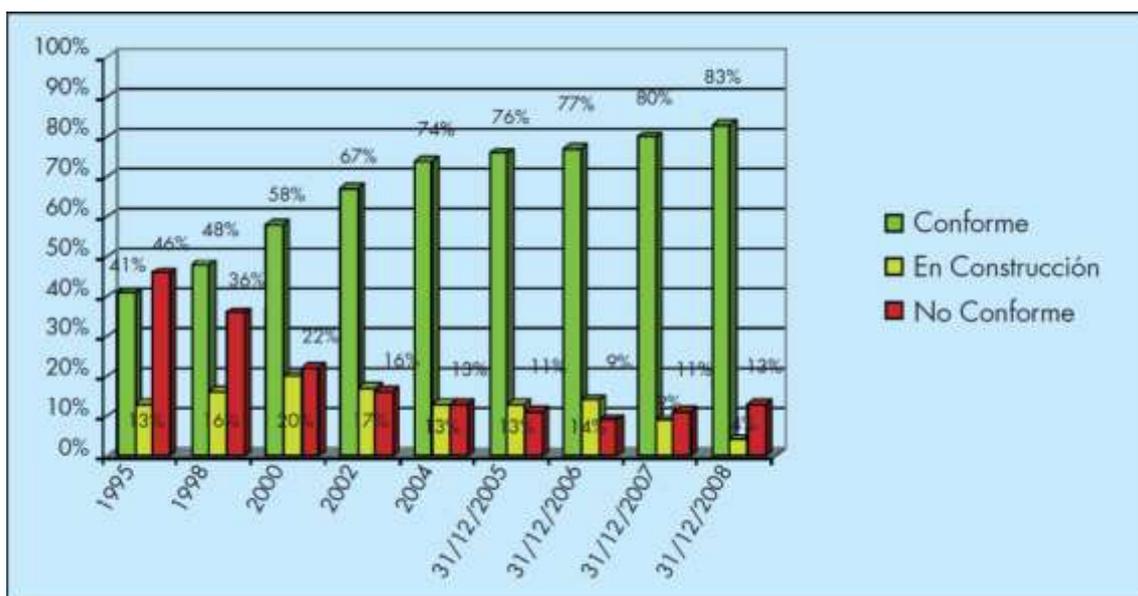


Figura 10. Evolución del grado de conformidad de la depuración en España con las exigencias de la Directiva 91/271/CEE entre 1995 y 2008 [10].

Directiva 98/15/CE de la Comisión. Considera que los requisitos para los vertidos procedentes de instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas realizados en zonas sensibles propensas a eutrofización planteaban problemas de interpretación que debían aclararse.

Plan Nacional de Calidad de las Aguas. Terminado el plazo impuesto por la Directiva 91/271/CEE para su cumplimiento y, por tanto, alcanzado el escenario previsto en el PND en el año 2005, se realizó un nuevo diagnóstico de la situación y, por ello, se acometió una revisión de todo lo que se había hecho y quedaba por hacer. Dado que el grado de cumplimiento de la mencionada directiva era inferior al 80%, la Comisión Europea había iniciado varios procesos de infracción contra España, lo que obligaba a seguir trabajando para conseguir un cumplimiento pleno. Así pues, había que resolver el problema, no solo de grandes aglomeraciones que aún tenían pendiente acometer su depuración, sino de llevar a cabo un plan urgente para depurar las aguas de las aglomeraciones más pequeñas que, en número nada despreciable, seguían incumpliendo la normativa. Además, se había producido una nueva declaración de zonas sensibles lo que aumentaba la población afectada de seis millones de habitantes equivalentes en 1998 a más de veinticuatro millones en ese momento, y ello obligaba a adaptar muchas instalaciones a los nuevos requerimientos de reducción de nutrientes.

Directiva Marco del Agua (DMA). Esta directiva se impuso como gran objetivo la protección de los ecosistemas, obligando a analizar si las depuradoras existentes eran capaces de facilitar el buen estado ecológico de las masas de agua. La depuración era necesaria, aunque no suficiente para alcanzar dicho objetivo, pero era evidente que, en muchos casos, era necesario dar un paso más en la mejora de la calidad a través de una depuración más exigente.

Con la aprobación en el año 2007 del Real Decreto sobre “el régimen jurídico de la reutilización”, en el que se incluyen los criterios de calidad del agua según los usos, se abre paso a diferentes esquemas de tratamiento de regeneración en los que es posible utilizar membranas tanto de microfiltración y ultrafiltración como de electrodiálisis reversible y ósmosis inversa en función de la salinidad del agua.

Reglamento (CE) No 1882/2003 del Parlamento Europeo y del Consejo. El documento indica las modalidades de adaptación de los procedimientos de los comités, exponiendo que deben mantenerse los plazos establecidos y, en los casos en que no se haya previsto ningún plazo concreto para adoptar las medidas de ejecución, es conveniente fijar dicho plazo en tres meses.

Real Decreto 1/2006, de 8 de enero, por el que se aprueba la revisión de los Planes Hidrológicos de las demarcaciones hidrográficas del Cantábrico Occidental, Guadalquivir, Ceuta, Melilla, Segura y Júcar, y de la parte española de las demarcaciones hidrográficas del Cantábrico Oriental, Miño-Sil, Duero, Tajo, Guadiana y Ebro.

Decreto régimen jurídico de reutilización 2007. Este Real Decreto tiene por objeto establecer el régimen jurídico para la reutilización de las aguas depuradas, de acuerdo con el artículo 109.1 del texto refundido de la Ley de Aguas, aprobado por el Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio.

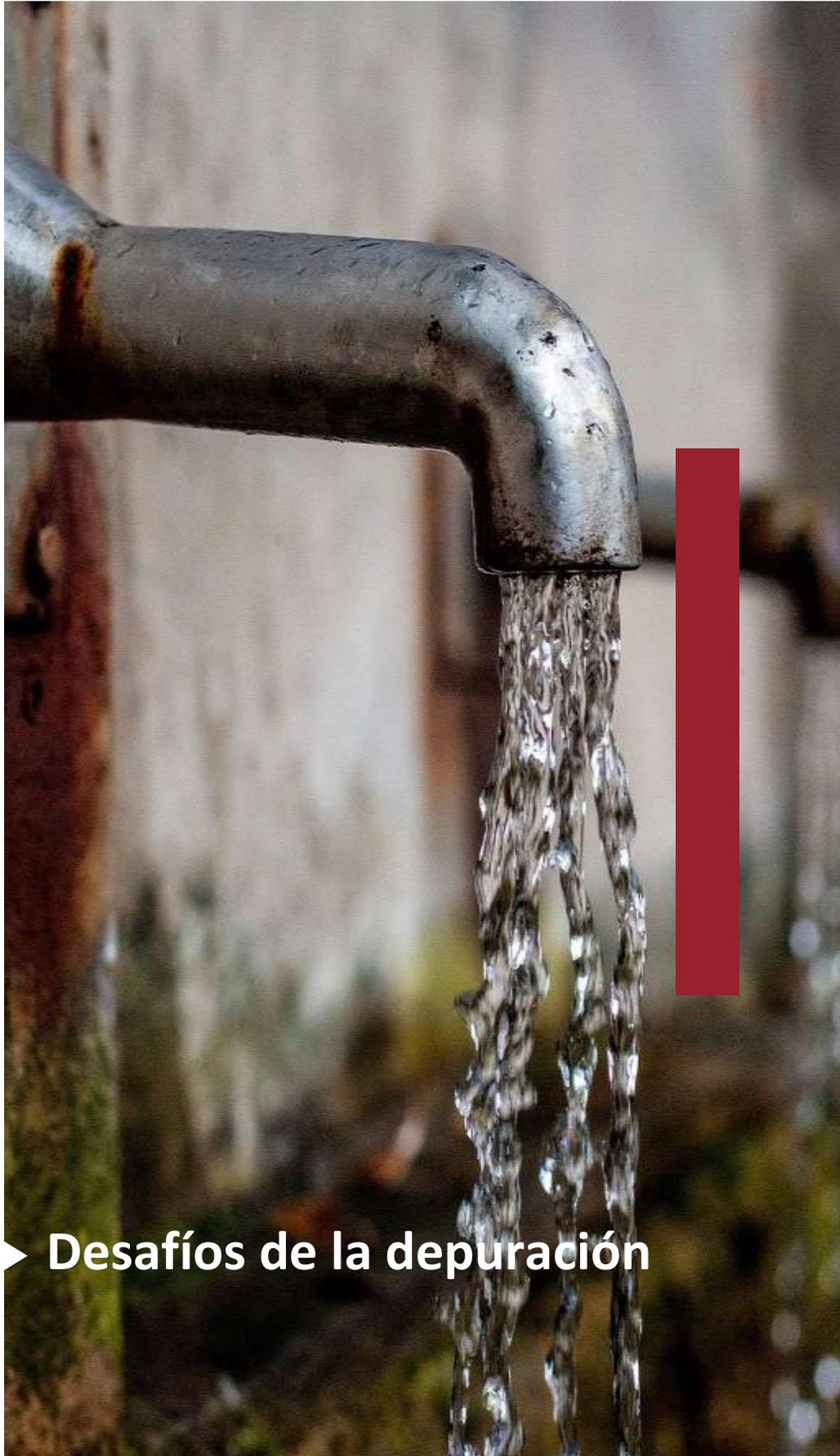
Reglamento (CE) No 1137/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo. La Decisión 1999/468/CE del Consejo, de 28 de junio de 1999, por la que se establecen los procedimientos para el ejercicio de las competencias de ejecución atribuidas a la Comisión fue modificada por la Decisión 2006/512/CE, que introdujo el procedimiento de reglamentación con control para las medidas de alcance general que están destinadas a modificar elementos no esenciales de un acto de base adoptado según el procedimiento establecido en el artículo 251 del Tratado, incluso suprimiendo algunos de estos elementos o añadiendo nuevos elementos no esenciales para completar el acto de base.

Directiva Marco del Agua (2000/60/CE, DMA). Esta directiva hace referencia a la reutilización del agua como una de las posibles medidas para la consecución de los objetivos ambientales. Entre las medidas básicas se encuentran aquellas para cumplir la normativa comunitaria sobre protección de las aguas.

Plan hidrológico vigente. La planificación hidrológica realizada por España tuvo que ampliar su concepto para recoger, en cuanto a la protección de las aguas y de los ecosistemas a ellas asociados, el enfoque y los contenidos exigidos por la Directiva 2000/60/CE, por la que se establece un marco comunitario de

actuación en el ámbito de la política de aguas (Directiva Marco del Agua o DMA). Las demarcaciones hidrográficas españolas tienen aprobado su plan hidrológico para el segundo ciclo de planificación (2015-2021) establecido por la Directiva Marco del Agua [11].

Cabe destacar que la Dirección General del Agua del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico elabora anualmente un Informe de Seguimiento de los planes hidrológicos de cuenca y de los recursos hídricos en España. Este informe sintetiza los avances producidos en el proceso de planificación y la información que, sobre el seguimiento de los planes, de sus programas de medidas y de la situación general de los recursos hídricos han proporcionado los organismos de cuenca, las administraciones del agua equivalentes en las Comunidades Autónomas y otras fuentes de referencia, tratando de homogeneizar y armonizar la información recibida.



► **Desafíos de la depuración**

Cuando llega la sequía nos damos cuenta del valor del agua.

—Benjamin Franklin—

Desafíos de la depuración

Como se ha comentado anteriormente, para medir la carga contaminante se emplea el concepto de habitante-equivalente, que indica la materia orgánica que tiene un vertido. De forma simplificada, se puede decir que toma como patrón la cantidad de materia orgánica que produce una persona. Como se puede ver, esta definición solo hace referencia la carga orgánica del vertido, sin tener en cuenta otras sustancias potencialmente problemáticas. La depuración actual debe hacer frente a la eliminación de nuevos contaminantes, entre los que destacan la contaminación por purines, la contaminación microbiológica y los contaminantes emergentes.

Purines

La contaminación difusa es aquella cuyo origen se conoce, pero los vertidos no pueden referenciarse geográficamente y, en consecuencia, no pueden ser tratados en estaciones depuradoras. Por este motivo es necesario centrarse en la contaminación por purines, consistentes en una mezcla de orina y estiércol animal que se forma al reunir los desechos de animales domésticos (porcino, vacuno, aviar, etc.). Los purines de cerdos de criadero son los más conocidos y están causando una mayor contaminación debido, entre otras razones, a la alta concentración de granjas porcinas en diversos puntos del territorio. Esta situación llegó a tal punto que se tuvo que aprobar Real Decreto 306/2020 por el que se controla su vertido.

El principal problema medioambiental ocasionado por los purines se debe a la adición de nitrógeno y fósforo al medio. El desarrollo de la biomasa en un ecosistema viene limitado normalmente por la escasez de nitrógeno y fósforo, por lo que un exceso de estos compuestos da lugar a un ecosistema eutrofizado, tal y como se muestra en la Figura 11.

Si bien la eutrofización se produce de forma natural, su impacto es muy diferente según el lugar donde se provoca. En dosis bajas y en zonas relativamente húmedas o en zonas urbanizadas no se considera que tengan consecuencias apreciables, ya que la contaminación de nitrógeno, amoníaco y materia orgánica que contienen puede ser absorbida por el entorno. Por el contrario, la ganadería intensiva y las prácticas de abonado pocos sostenibles pueden llegar a ocasionar verdaderos problemas en el medio ambiente.

La contaminación por eutrofización de las aguas superficiales o acuíferos se produce debido al exceso de nutrientes en el agua y la proliferación de plantas llamadas «mareas verdes» en arroyos, ríos, lagunas y lagos. El riesgo no es solo de tipo medioambiental: beber de estas aguas contaminadas o comercializarlas está prohibido por las administraciones ya que favorece la proliferación de microorganismos tóxicos para los seres humanos y el ganado (cólera, difteria, etc.), que producen esterilidad y cáncer. En el caso de las aguas minerales para comercialización, se realizan análisis periódicos en busca de nitratos o nitritos.



Figura 11. Ejemplo de ambiente eutrofizado [12].

En el apartado de “Soluciones Tecnológicas” se muestra un caso de éxito relacionado con este problema. No obstante, como tendencia general, actualmente se está estudiando el reciclaje y revalorización de los purines de cerdos en la obtención de metano, para abono o en la reutilización de agua [12].

Contaminación microbiológica

Los microorganismos patógenos entéricos (bacterias, helmintos, virus, protozoos) proceden fundamentalmente de desechos fecales, pudiendo transmitir enfermedades como tifus, cólera, disentería, poliomielitis, salmonelosis y hepatitis. Estos microorganismos pueden eliminarse del agua por procedimientos físicos (filtración, exposición a luz ultravioleta, sedimentación), químicos (oxidación, exposición a sustancias biocidas, absorción), o biológicos (antibiosis, predadores como nematodos y protistas, ataque por bacterias líticas y muerte natural [13]). La presencia de antibióticos en el agua complica el problema, ya que este tipo de compuestos tiende a fortalecer a los microorganismos [14].

El indicador más habitual para determinar el nivel de contaminación por patógenos en aguas, es la determinación del grupo de los coliformes. La contaminación fecal puede llevarse a cabo mediante un análisis de estreptococos. La *legionela*, junto con los helmintos, también tiene interés en la depuración de aguas residuales. Los tipos y número de microorganismos más habituales en aguas residuales domésticas, pueden consultarse en la Tabla 2.

Tabla 2. Contaminantes emergentes de interés más representativos [4].

Organismo	Concentración número/mL
Coliformes totales	10^5 - 10^6
Coliformes fecales	10^4 - 10^5
Estreptococos fecales	10^3 - 10^4
Enterococos	10^2 - 10^3
<i>Shigella</i>	Presencia
Salmonela	1 - 10^2
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	10 - 10^2
<i>Clostridium perfringens</i>	10 - 10^3
<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	Presencia
Huevos de helmintos	10^{-2} - 10
Virus entéricos	10 - 10^2

La determinación directa de patógenos en aguas residuales es prácticamente inviable a causa del gran número presente o a la posible variedad de familias, lo que obligaría a realizar amplias baterías de análisis, resultando poco práctico y rentable. En su lugar, se llevan a cabo medidas indirectas mediante los denominados organismos indicadores, de comportamiento similar a los patógenos, pero más rápidos y fáciles de identificar. Los organismos indicadores presentan las mismas cualidades de los patógenos frente a pH, temperatura o procesos de desinfección. Los más comunes son los coliformes totales, coliformes fecales, *Escherichia coli*, estreptococos fecales y esporas de anaerobios sulfito-reductores o *Clostridium sulfito-reductores* [15].

Entrando más en detalle en los tratamientos de reducción de patógenos, los tratamientos primarios y biológicos de las EDAR no suelen ser demasiado efectivos, por lo que se utilizan los siguientes sistemas [16].

La desinfección es el método usado por excelencia, consistente en la eliminación o desactivación de forma selectiva de los microorganismos susceptibles de causar enfermedades [17]. Se requiere en España cuando las aguas residuales ya tratadas se dediquen a la producción de agua potable (R.D. 1541/1994), zonas de baño (R.D. 1341/2007), zonas de crías de moluscos y otros invertebrados marinos vivos (R.D. 345/1993) o se destinen a reutilización (R.D. 1620/2007). Los tratamientos químicos más habituales consisten en la cloración y la ozonización (esta última preferida, pues evita la formación de compuestos organoclorados que pueden ser cancerígenos), mientras que entre los físicos destacan la luz ultravioleta y la filtración. Estos actúan en la membrana citoplasmática de los microorganismos patógenos, en sus enzimas respiratorias y las implicadas en la síntesis de proteínas y sobre los ácidos nucleicos. Los factores más influyentes son el tiempo de contacto desinfectante-agua, temperatura, tipo y concentración del agente desinfectante, número y tipo de organismos patógenos (las esporas por ejemplo son extremadamente resistentes) y la naturaleza del líquido en el que se encuentran. En general se procede a una etapa de filtración previa antes de la desinfección.

En cuanto a humedales o lagunas naturales/artificiales construidos al efecto [18] se han descrito porcentajes de reducción de hasta el 99% (2-3 unidades logarítmicas) para patógenos y coliformes fecales. En el caso de la *salmonela* se han alcanzado valores del 96% [13], mientras que algunos virus y protozoos demostraron ser más resistentes [19]. Los huevos de helmintos (ascárides, anquilostomas, tricocéfalos) se eliminan en su práctica totalidad mediante filtración a través del sustrato y adhesión a las raíces.

Los filtros percoladores suelen ser menos eficaces que los lodos activos convencionales, pero combinados con sedimentación pueden eliminar por encima del 90% de huevos de parásitos, bacterias y virus [20].

Los lodos activados (sedimentación primaria, aireación y sedimentación secundaria) tienen resultados muy variables. La mayoría de la eliminación (40-99%) se debe a sedimentación y adsorción o incorporación en los flóculos biológicos que se forman en el proceso [21].

En cuanto a los biorreactores de membrana, normalmente se limitan a plantas piloto, pero los resultados suelen ser superiores a otros procedimientos.

Los sistemas de tratamiento en suelos (flujo terrestre, infiltración) consiguen alcanzar reducciones de hasta el 99,99%, incluso de virus [22] que son las especies más móviles y problemáticas, si los tiempos de retención son suficientemente largos. En general son sistemas menos propensos a fallos operativos a corto plazo.

El uso de microorganismos beneficiosos, mezclas de bacterias, hongos y levaduras seleccionados [23] puede conducir a buenos resultados para la reducción de patógenos en determinados ámbitos, como aguas residuales de origen lácteo, donde se ha conseguido reducir en torno al 50% de la población de coliformes.

Los tanques sépticos pueden ser eficaces en zonas con profundidad de varios metros para las aguas subterráneas y con baja densidad por hectárea. Sin embargo, se han asociado a numerosos brotes epidemiológicos.

Los tratamientos terciarios (filtración, adición de productos químicos, membranas, estanques) suelen ser muy eficaces en la reducción de helmintos (99%) y entre 95-99% de los protozoos. En el caso de los virus, por su menor tamaño, se requiere habitualmente de ultrafiltración y ósmosis inversa [24].

Como consecuencia de todo esto, las zonas rurales que no tratan sus aguas residuales corren el riesgo de propagar enfermedades. Las enfermedades transmitidas por el agua son causadas por la contaminación de desechos humanos, animales o químicos. La eliminación de la turbidez del agua por filtración, proporciona un significativo descenso en la carga microbiana del agua, pero no es suficiente. Por ello, son necesarios los tratamientos de desinfección para disminuir las incidencias de enfermedades transmitidas por agua.

Debido a esta situación muchos municipios han tenido que adoptar las siguientes medidas preventivas, al carecer de agua de suficiente calidad, que son:

- *Hervir el agua hasta que comience a evaporarse.*
- *Si no se cuenta con agua potable, desinfectar el agua colocando dos gotas de cloro por litro de agua, durante media hora, antes de su consumo.*
- *Lavar las manos después de ir al baño y antes de manipular alimentos.*
- *Lavar bien las frutas y verduras con agua apta para consumo.*
- *No bañarse en aguas que puedan estar contaminadas ni entrar en contacto con aguas estancadas.*
- *No comer nunca crudas las frutas u hortalizas en tierras que se hayan regado o contaminado con aguas servidas.*

Contaminantes emergentes

La definición más común de contaminantes emergentes considera a todos aquellos contaminantes anteriormente desconocidos o no reconocidos como tales que suponen actualmente una preocupación debido a su presencia, aunque estuvieran ya presentes anteriormente en menor cantidad. Incluye a todas las sustancias actualmente no reguladas que, por tanto, no son monitoreadas ambientalmente ni son consideradas al planificar procesos de eliminación de contaminación [25]. Su detección en el medio ambiente ha sido posible gracias al desarrollo de tecnologías analíticas [26].

Hay dos tipos de fuentes de contaminación: 1) puntuales, que se originan en ubicaciones discretas, como efluentes industriales (fábricas, hospitales, plantas de procesamiento de alimentos, etc.), plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, extracción de recursos (minería), vertederos (embalses industriales, lagunas de desechos agrícolas) y fosas sépticas enterradas; y 2) contaminación difusa, en zonas geográficas más amplias, como escorrentías agrícolas, aguas pluviales y escorrentías urbanas, fugas de sistemas de alcantarillado urbano o deposición aérea difusa.

En el caso de los contaminantes emergentes, estos se incorporan al medio ambiente acuático fundamentalmente a través de las aguas residuales, si bien la agricultura (fuente de pesticidas) y la ganadería (antibióticos) también juegan un papel significativo.

En general, se trata de compuestos relativamente refractarios a los tratamientos habituales de las EDAR, cuya eliminación vía mineralización en muchos casos no es completa. Además, en ocasiones los productos formados pueden ser más peligrosos que los contaminantes iniciales asumibles en pequeños municipios. En estos casos, merece la pena considerar tecnologías alternativas como la recarga de acuíferos, balsas de infiltración o uso de hongos en biorreactores, aunque las cinéticas de degradación sean considerablemente más lentas. La Tabla 3 muestra los contaminantes emergentes que más interés han suscitado en los últimos años.

Tabla 3. Contaminantes emergentes de interés más representativos [27].

Grupo de contaminantes	Subgrupo	Compuestos de interés emergente
Pesticidas y sus metabolitos	Organoclorados	Diuron, atrazina
	Organofosforados	Glifosato
Fármacos	Antibióticos	Lincosamidas, macrólidos, sulfamidas, tetraciclinas, quinolonas
	Analgésicos y antiinflamatorios	Paracetamol, ácido acetilsalicílico, ibuprofeno, diclofenaco
	Psiquiátricos	Benzodiazepinas, barbitúricos
	β -bloqueantes	Metoprolol, propranolol, timolol
	Medios de contraste de rayos X	Lopromide, iopamidol, diatrizoato
	Esteroides y hormonas	Estradiol, estrona, estriol, dietilestilbestrol
	Citostáticos	Macrólidos, sulfamidas, tetraciclinas, quinolonas
Productos del cuidado personal	Parabenos	Metilparabeno, etilparabeno, propilparabeno
	Filtros solares	Benzofenonas, cinamato, bencilidenos, derivados del alcanfor
	Perfumes	Fragancias nitro, policíclicas y macrocíclicas
	Repelentes de insectos	DEET
	Bactericidas y antihongos	Triclosan
Tensoactivos	Sulfonatos	α -olefin sulfonato de sodio
	Alcanolamidas	Lauril monoetanolamida
	Alquilfenoles	Nonilfenol, octilfenol
Aditivos y agentes industriales	Benzotriazoles	Benzotriazol, tolitriazol
	Agentes quelantes	EDTA
	Retardantes de llama	PBDE, NBFR, TBBPA
Edulcorantes		Sacarina, sucralosa, aspartamo, ciclamato, stevia, NHDC
Drogas de abuso	Cocaínicos	Cocaína, benzoilecgonina
	Opiáceos	Morfina, codeína
	Opioides	Heroína, metadona

A nivel europeo, el analgésico diclofenaco y las hormonas 17- α -etinilestradiol y 17- α -estradiol están incluidos en la primera lista de vigilancia de la UE, con vistas a su futura inclusión en la lista de sustancias prioritarias en agua. Además de campañas para reducir al mínimo imprescindible el uso de productos químicos (pesticidas, fármacos, etc.), con vistas a la legislación futura es necesario desarrollar y realizar inversiones en tecnologías de tratamiento de agua más eficaces. Existen evidencias probadas de que ciertos tipos de contaminantes emergentes (conocidos como disruptores endocrinos) son capaces de alterar el sistema endocrino, bloqueando o perturbando las funciones hormonales de los organismos, provocando la feminización y hermafroditismo de los mismos, disminución de la fertilidad y de la eficacia del apareamiento, e incluso pueden incrementar la incidencia de diferentes tipos de cáncer.

Aparte de los grupos de compuestos citados en la Tabla 3, en los últimos años está adquiriendo fuerza la presencia de sustancias en forma de partículas. Los dos grandes grupos son: 1) nanomateriales, basados tanto en carbono (nanotubos), como en nanopartículas metálicas (oro, plata, óxidos de zinc y titanio, etc.), detectados en aguas residuales de origen doméstico, y 2) microplásticos, sobradamente conocidos en el medio marino, pero en extensión a los ríos, donde hay estudios que evalúan su impacto potencial en peces fluviales [28].

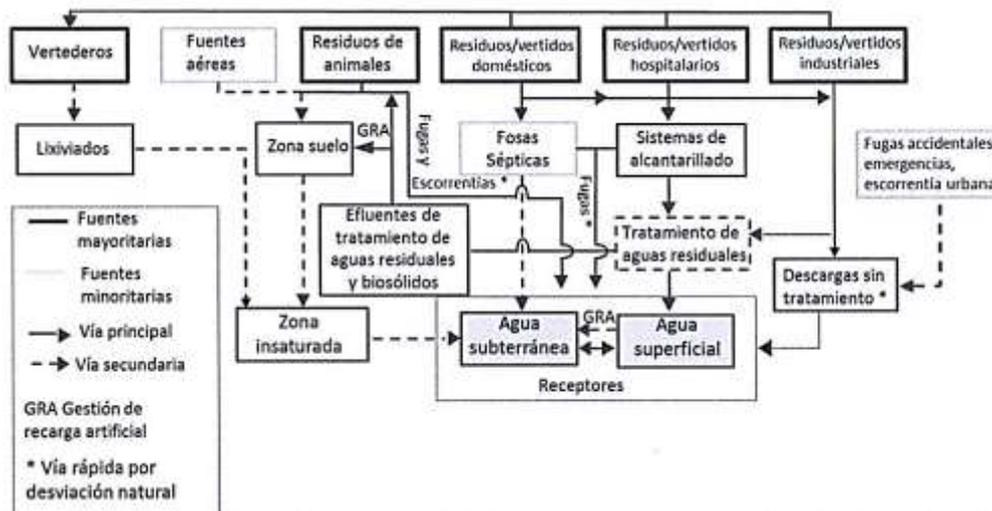


Figura 12. Posibles vías de incorporación de contaminantes emergentes al medio ambiente [29].

Clasificando estos contaminantes emergentes por tipología se tendría:

Pesticidas. Sustancias destinadas a la prevención, destrucción o mitigación de plagas. Existe legislación para su control desde hace años, por lo que hay conocimiento sobre su presencia y destino en el medio acuático. Últimamente se están centrando los estudios en sus metabolitos, sustancias generadas por degradación y que pueden resultar más peligrosos que sus precursores [30]. Para su eliminación de las aguas son frecuentes tratamientos de oxidación agresivos, como la cloración (aunque elimina hasta un 60% de los pesticidas puede dar lugar a la formación de dioxinas), adición de peróxido de hidrógeno [31], fotocátalisis solar [32] o la ozonización, con hasta un 70% de eliminación [33]. La combinación con etapas de floculación combinadas con adsorción en filtros de carbono activo o nanofiltración [34] permiten eliminar entre el 90 y el 100% de los contaminantes.

Fármacos. Entre los contaminantes emergentes, los fármacos son objeto de preocupación especial por su capacidad de alterar las funciones biológicas, pudiendo afectar negativamente a los organismos expuestos a sus efectos. Por lo general, son eliminados fundamentalmente a través de la orina y de las heces, que finalmente alcanzan las aguas residuales. Presentes en concentraciones muy bajas ($\mu\text{g/L}$ – ng/L) además de la adsorción en carbón activo y biorreactores de membrana [35], se suelen eliminar mediante técnicas de oxidación avanzada con radicales hidroxilo ($\text{OH}\cdot$), que producen la oxidación y mineralización de los fármacos. Las principales técnicas aplicables son, entre otras, la fotocátalisis heterogénea [36], ozonización [37], foto-Fenton [38], sonolisis o electrolisis.

Productos del cuidado personal. Los sistemas de tratamiento convencional de las aguas residuales no son efectivos en la eliminación microcontaminantes orgánicos en aguas residuales urbanas procedentes del consumo de productos destinados a la higiene y la salud [39], por lo que se deben considerar sistemas de postratamiento en las EDAR. Para su eliminación se han propuesto tratamientos de lodos con el hongo *Trametes versicolor* [40], así como sistemas combinados, como nanofiltración con procesos de oxidación avanzada [41] o biorreactores de membrana con nanofiltración y ósmosis inversa [42].

Tensoactivos. Los tensoactivos son los principales ingredientes de los detergentes domésticos e industriales y después del uso se pueden encontrar junto con contaminantes en las aguas residuales que se tratan en EDAR, causando problemas de formación de espuma en los procesos de aireación. Su eliminación suele ser a través de procesos microbianos, con ventajas frente a las técnicas no biológicas.

Hay descritos estudios en medios aerobios [43], pero también es posible su degradación por vía anaerobia [44], donde los tensoactivos se usan como fuente de carbono en procesos de desnitrificación, siendo degradados a CO₂ y H₂O, a la vez que se evita la acumulación indeseada de nitratos. En cuanto a procedimientos fisicoquímicos, se ha empleado con éxito Fenton [45] o tecnología de electrocoagulación-flotación [46] con rendimientos de eliminación de tensoactivos entre 25 y el 90%, aunque generando una cantidad elevada de lodos por el alto consumo de ánodo de aluminio, elevando los costes.

Aditivos y agentes industriales. Dentro de este grupo consideraremos tres grupos de sustancias representativas: benzotriazoles, agentes quelantes y retardadores de llama. Los benzotriazoles se emplean en síntesis orgánicas, protección contra la corrosión de metales (a nivel doméstico en detergentes de lavavajillas), anticongelante de automóviles, detergentes y estabilizadores de polímeros. En un estudio [47] se monitorizó la concentración y eliminación de benzotriazoles (eficacias entre 15 y 80%) durante un año comparando la eficacia de una planta con un biorreactor de membrana con otras dos de lechos activados convencionales. En general, su eliminación en EDAR con tratamientos primarios y secundarios es limitada [48].

En cuanto a los agentes quelantes como el EDTA, útiles para secuestrar cationes metálicos en procesos electrolíticos (cobre, níquel, zinc, etc.) o en industrias papeleras, es preferible su eliminación mediante tratamientos de oxidación avanzada, por ejemplo, con luz ultravioleta [49], puesto que su eliminación por vía biológica es muy limitada [50].

Los agentes retardantes de llama son sustancias que se añaden a materiales combustibles para evitar incendios o disminuir la propagación del fuego, proporcionando un tiempo de escape adicional. En su composición química suelen contener átomos de bromo o fósforo. La eficacia de las EDAR en su eliminación es limitada, con valores máximos del 60% tras tratamiento primario y secundario [51]. Aunque la adición de hipoclorito de sodio puede mejorar la eficacia [52] se han detectado concentraciones incluso mayores a las de la entrada a la EDAR posiblemente por la presencia de los contaminantes en las instalaciones.

Edulcorantes. Los edulcorantes artificiales (sacarina, aspartamo, etc.) son compuestos relativamente degradables mediante procesos biológicos habituales; sin embargo, algunos —como la sucralosa— son bastante refractarios, consiguiéndose tan solo reducciones del 20%. Técnicas de oxidación avanzada como luz ultravioleta con o sin TiO₂ o aplicación de ozono, han conseguido reducciones entre el 60 y el 100% después de algunas horas [53].

Drogas de abuso. Las drogas de abuso y sus metabolitos se consideran también contaminantes emergentes. El desarrollo de nuevas técnicas analíticas ha permitido demostrar su presencia de en las aguas superficiales y residuales como consecuencia de su elevada producción y consumo. Las drogas de abuso se excretan de forma inalterada o metabolitos llegando a las EDAR, que no llegan a eliminarlas por completo y pueden tener efectos negativos sobre los ecosistemas [54]. Las EDAR convencionales consiguen eliminar por encima del 90% de cocaína, anfetamina, metanfetamina y tetrahidrocannabinol, mientras que otras como MDMA o ketamina apenas si se eliminan [55]. El uso de membranas de ósmosis inversa ha sido probado con disminuciones entre 47 y 96% [56] y con ozonización se han hallado reducciones moderadas, entre 3 y 50% [57].

Todos estos contaminantes emergentes requieren de sistemas de depuración adicionales, pero las EDAR hacen frente a una preocupante falta de fondos. Si bien los socios de la Unión Europea destinaron en total 229 000 millones de euros a este capítulo, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) calcula que los países tendrán que invertir 253 000 millones adicionales entre 2020 y 2030, ya que los países no suelen incluir en este monto los costes operativos ni de mantenimiento. Esta falta de planificación lleva a, en ocasiones, dejar las estaciones depuradoras sin operar debido al gasto que supone.

Claves en los retos de depuración en pequeños municipios

Según la normativa europea (Directiva 91/271/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas) los municipios de más de 2000 habitantes están obligados a poseer una EDAR.

En España existen EDAR en pequeños municipios que, si bien en su momento eran eficaces, posteriormente han mostrado que su mantenimiento resultaba inviable. En los casos más extremos estas depuradoras no han llegado a funcionar de manera operativa nunca.

Se necesitan avances significativos en esta materia, por lo que es necesario llevar a cabo una correcta toma de decisiones al evaluar el sistema de depuración más adecuado. Un trabajo de revisión realizado en 2020 concluyó que los tres indicadores más importantes para la toma de decisiones fueron la contaminación, el cambio climático y los costes. Estos indicadores están respectivamente asociados con la salud pública, la sostenibilidad y el desempeño económico [58].

Paralelamente, otro estudio analizó qué problemas surgen habitualmente en el funcionamiento de las estaciones depuradoras en áreas rurales [59]. Los resultados mostraron que el bajo desempeño de las EDAR se debía a la falta de experiencia operativa y recursos financieros para una operación y mantenimiento adecuados.

Esto pone de manifiesto que es necesario realizar estudios preliminares que proporcionen la información necesaria con respecto a la selección, diseño, implementación y operación de tecnología a utilizar. Esto evitará que surjan problemas que desemboquen en el funcionamiento subóptimo de las estaciones depuradoras de aguas residuales en las pequeñas poblaciones.

También se hace necesario contemplar las opciones de tratamiento de aguas residuales en las poblaciones, en las cuales durante el periodo vacacional incrementan notablemente su población, no logrando un tratamiento eficaz de las aguas residuales generadas.



► Soluciones tecnológicas

Soluciones tecnológicas

Tradicionalmente en las pequeñas poblaciones se han implantado las llamadas tecnologías extensivas de bajo coste o tecnologías blandas, que se caracterizan por depurar las aguas a velocidades similares a las de los procesos naturales, por tener una mayor integración con el entorno, un menor coste energético y un menor requerimiento de personal. Las tecnologías blandas se caracterizan principalmente por un bajo coste de mantenimiento y por necesitar una mayor superficie que otras tecnologías convencionales (tecnologías intensivas). Por todo ello, las investigaciones en este campo se enfocan en la búsqueda de tecnologías más eficientes, sin operaciones complicadas, que no requieran de personal especializado, que no supongan la adición de reactivos, y con buenos rendimientos de eliminación de contaminantes.

Métodos de depuración naturales

En este grupo se incluyen aquellos cuya acción principal de depuración se ejerce en el seno del medio acuático, participando en el proceso plantas emergentes (especialmente sus raíces) y la actividad microbiológica asociada. Son sistemas que pueden funcionar estacionalmente o a lo largo de todo el año, dependiendo fundamentalmente del clima y que, con frecuencia, se diseñan para mantener un flujo continuo. Los sistemas más empleados son: lagunajes, humedales y cultivos acuáticos.

El lagunaje se puede aplicar a núcleos de población superiores a los 200 habitantes, siempre que se disponga de una superficie de terreno de al menos 6,5 m²/hab. Consiste en el almacenamiento de las aguas durante un tiempo variable en función de la carga aplicada y de las condiciones climáticas, de forma que la materia orgánica resulte degradada mediante la actividad de los microorganismos presentes en el medio acuático. El proceso de depuración tiene lugar gracias a reacciones biológicas, químicas y físicas, que ocurren en las lagunas y que tienden a estabilizar el agua residual.

Los humedales son terrenos inundados con profundidades de agua normalmente inferiores a 0,6 m con plantas emergentes. En estos sistemas el agua fluye continuamente y la superficie libre permanece al nivel del suelo, manteniéndolo en estado de saturación durante un largo periodo del año. La vegetación presente en estos sistemas proporciona superficies adecuadas para la formación de películas bacterianas, facilita la filtración y la adsorción de los constituyentes del agua residual, permite la transferencia del oxígeno a la columna de agua, y controla el crecimiento de algas al limitar la penetración de la luz solar. Los humedales artificiales procuran idéntica capacidad de tratamiento que los naturales, con la ventaja añadida de que, al formar parte del sistema proyectado, no están sujetos a las limitaciones de vertidos a ecosistemas naturales.

Los cultivos acuáticos o sistemas de plantas acuáticas flotantes son básicamente una variante de los humedales artificiales, en la que se introduce un cultivo de plantas flotantes, como los jacintos de agua o las lentejas de agua, cuya finalidad principal es la eliminación de determinados componentes de las aguas

a través de sus raíces, que constituyen un buen sustrato responsable de una parte importante del tratamiento [60].

Una de las tecnologías alternativas para depurar aguas residuales reduciendo la carga de nutrientes es la **fitorremediación por medio de microalgas**, mediante la utilización de sistemas de lagunaje de alto rendimiento (*High Rate Algae Pond, HRAP*) [61]. Investigaciones relacionadas con la optimización de este tipo de sistemas HRPA muestran una mayor densidad de algas, lo que favorece una menor demanda de espacio y la capacidad de tratar aguas muy cargadas; así como una mayor eficacia en la eliminación de materia orgánica y una gran capacidad para eliminar nitrógeno y la influencia del tiempo de retención y el pH del sistema [62].

En un trabajo reciente, llevado a cabo por Sutherland & Ralph en 2020 [63] acerca del tratamiento de aguas residuales en HRAP, centrado en formas de optimizar el rendimiento, particularmente con respecto a la eliminación de nutrientes y la recuperación de recursos (producción de biomasa de microalgas), se muestra que mejora de manera rentable el tratamiento de aguas residuales con este sistema HRAP, particularmente en núcleos de población pequeños y comunidades rurales, donde el tratamiento de aguas residuales sería inasequible, ayudando a conseguir una “bioeconomía” circular, mediante la reutilización de estos recursos recuperados en productos futuros. Los autores demostraron que pequeñas modificaciones en la forma de operar los sistemas HRAP, como la profundidad del cultivo, los estanques en serie, el reciclaje de biomasa y la adición nocturna de CO₂, mejoran el rendimiento del lagunaje.

Actualmente, se están diseñando **sistemas de tratamiento basados en humedales artificiales de flujo vertical** como tratamiento de aguas residuales para municipios que presentan una importante variación estacional de la población. Esta alternativa se ha mostrado eficiente para la eliminación de concentraciones elevadas en el agua residual, pero con una baja efectividad de remoción para la concentración de fósforo [64]. En otro estudio similar [65], se propone el sistema de humedal artificial de flujo subsuperficial vertical desde el punto de vista económico y si la superficie total de terreno disponible es limitada. En cuanto a complejidad de mantenimiento y explotación, la mejor opción sería implementar el sistema de humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal debido a que no dispone de elementos electromecánicos, además de presentar menores costes de mantenimiento y explotación.

Andreo Martínez y colaboradores [66] evaluaron el rendimiento de un **humedal de flujo subterráneo horizontal** ubicado en el sureste de España, relleno con escorias de alto horno, plantado con *Phragmites australis* y diseñado para tratar aguas residuales domésticas aireadas artificialmente para producir efluentes aptos para la reutilización agrícola. Los datos de todos los parámetros estudiados, excepto la conductividad eléctrica (CE) y el índice de adsorción de sodio (SAR), cumplieron con los estándares españoles para la reutilización de aguas residuales regeneradas debido a la alta evapotranspiración durante el verano. Las mejoras introducidas fueron efectivas para turbidez, sólidos suspendidos totales (SST), nitrógeno total (NT), *Escherichia coli* (E. coli) y, especialmente, para fósforo total (PT); además, se lograron reducciones porcentuales similares o mejores que las informadas utilizando algunos sistemas híbridos.

Tecnologías existentes en el mercado

Pese a la eficacia de las técnicas mencionadas en el apartado anterior, en la actualidad los vertidos producidos por los humanos son de tal importancia que la capacidad de autodepuración de cualquier cauce es insuficiente. Por este motivo, como consecuencia de ciertas diferencias de hábitos de vida y una mayor actividad de los sectores secundario y terciario (incluso de la industrialización del sector primario), es necesario diseñar e implantar distintas EDAR en función del número de habitantes, del grado de desarrollo y del tipo de agua a tratar, diferenciándose entre aguas residuales domésticas (procedentes de cocinas, baños, sanitarios, lavanderías, etc.), aguas residuales industriales (su composición varía de acuerdo con la actividad propia de la industria) y aguas residuales urbanas (que incluyen las domésticas o mezclas de estas con las industriales o las de corriente fluvial).

Los contaminantes presentes en el agua residual pueden eliminarse por medios físicos, químicos y biológicos. Normalmente, los métodos individuales de tratamiento se suelen clasificar en operaciones físicas unitarias, operaciones químicas unitarias y procesos biológicos unitarios, si bien todos ellos se utilizan conjuntamente según diversas combinaciones en los sistemas de tratamiento.

El grado de tratamiento requerido para un agua residual depende, fundamentalmente, de los límites de vertido.

La Tabla 4. Tipos de tratamientos de aguas residuales. Tabla 4 muestra una clasificación convencional de los procesos de tratamiento de aguas residuales, si bien, dependiendo de los autores, dicha clasificación puede cambiar.

Tabla 4. Tipos de tratamientos de aguas residuales.

Tratamiento primario	Tratamiento secundario	Tratamiento terciario
Desbaste o cribado	Lodos activos	Microtamizado
Sedimentación	Aireación prolongada	Filtración (lecho de arenas, diatomeas...
Flotación	Estabilización por contacto	Precipitación y coagulación
Separación de aceites	Modificación del sistema convencional de lodos activos: aireación por fases, mezcla completa, aireación descendente, alta carga, aireación con oxígeno puro	Adsorción (carbón activado)
Homogeneización	Lagunaje con aireación	Intercambio iónico
Neutralización	Estabilización por lagunaje	Ósmosis inversa
	Filtros biológicos	Electrodialisis
	Discos biológicos	Cloración y ozonización
	Tratamientos anaerobios	Procesos de reducción de nutrientes
		Otros

Por su parte, la Figura 13 presenta un esquema típico de una depuradora de aguas residuales, recogiendo tanto el proceso/tratamiento como la principal función del mismo.

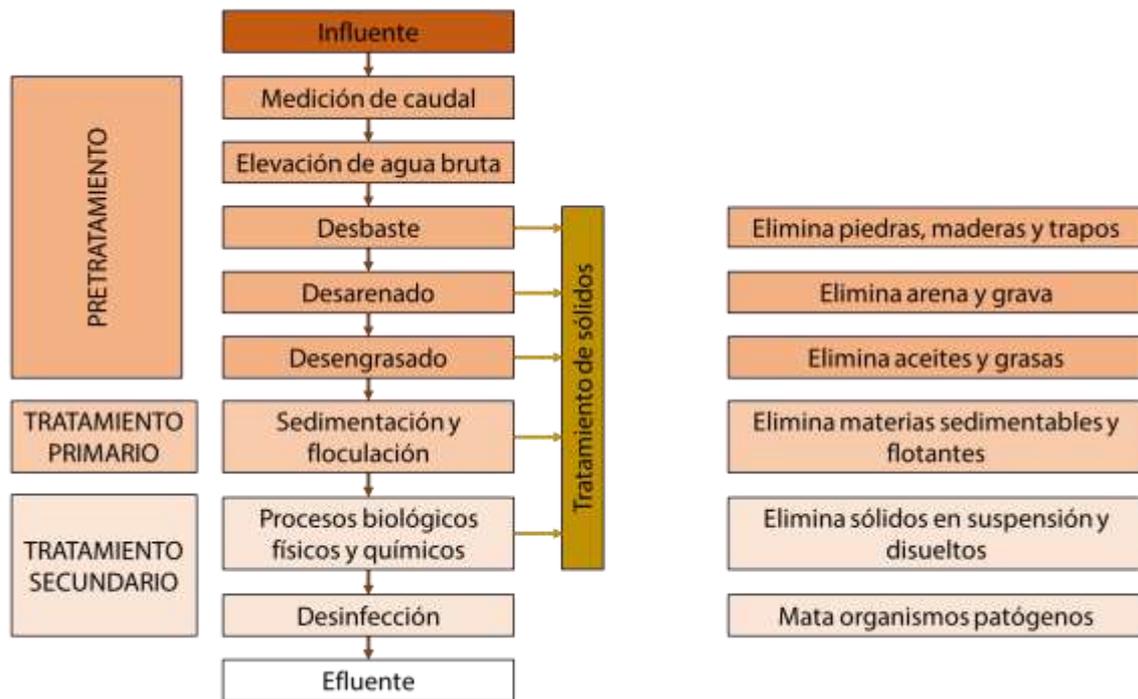


Figura 13. Esquema típico de una depuradora de aguas residuales.

A continuación, se procede a una breve explicación de algunos de tratamientos indicados. Para ello, se seguirá el flujo del agua, pudiendo distinguir los siguientes niveles de tratamiento: pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario, tratamiento secundario avanzado y tratamiento terciario.

Pretratamiento

Comprende una serie de operaciones físicas y mecánicas que tienen por objeto separar del agua residual las aguas pluviales y la mayor cantidad posible de materias groseras, arena, aceites y grasas; elementos que, por su naturaleza o tamaño, crearían problemas en los tratamientos posteriores [67,68].

- **Desbaste o cribado**

El desbaste o cribado es el proceso realizado con tamices (placas perforadas y mallas metálicas, con orificios de tamaño inferior a 15 mm), o enrejados (en este caso, aberturas superiores a 15 mm) que van reduciendo su tamaño, reteniendo los materiales más voluminosos que se llevan a vertederos controlados. La finalidad de esta etapa es la separación del agua residual de sólidos tales como piedras, ramas, plásticos, trapos etc., utilizando para ello rejas o tamices de diferente tamaño de malla [4].

- **Desarenado**

Tiene por objeto eliminar las materias pesadas de granulometría superior a 200 μm , con el fin de evitar que se produzcan sedimentos en los canales y conducciones. Si bien está pensado para eliminar arenas (incluyendo gravas y partículas minerales) también se eliminan otros elementos de origen orgánico, tales como granos de café, semillas, huesos, etc. Existen dos tipos de desarenadores: los que trabajan por gravedad y los denominados aireados [4].

- **Desengrasado**

El objeto de esta operación es eliminar grasas, aceites, espumas y demás materias flotantes más ligeras del agua. Se realiza mediante insuflación de aire, para desemulsionar las grasas y conseguir una mejor flotación, control de olores, floculación de sólidos, mantenimiento de oxígeno en la decantación primaria, etc. [4].

- **Homogeneización**

La tarea de agitación durante el proceso de homogeneización consiste en mezclar las aguas residuales para evitar la sedimentación, la estratificación y la aparición de olores. También puede ser necesario agitar y homogeneizar las aguas residuales procedentes de distintas fuentes. El nivel de agua varía considerablemente en las balsas de homogeneización y puede llegar a ser muy bajo, por lo que los agitadores se enfrentan a demandas muy exigentes [69].

Tratamiento primario

El tratamiento primario se destina fundamentalmente a la eliminación de sólidos en suspensión (SS) que se sedimentan y se separan como lodos primarios, siendo menos efectivo en la eliminación de materia orgánica.

Los procesos físicos (decantadores-digestores, fosas sépticas y decantadores de gravedad) eliminan entre el 30 y el 40% de la DBO₅ y entre el 60 y el 70% de los sólidos en suspensión. Los procesos fisicoquímicos, mediante la adición de reactivos químicos, consiguen eliminar entre el 50 y el 70% DBO₅, y entre el 65 y el 90% de SS, según la cuantía y el tipo de coagulante empleado.

La cantidad de lodos primarios a extraer de la decantación primaria viene dada por la cantidad de sólidos en suspensión eliminados en el proceso [67,68].

- **Decantación primaria o sedimentación**

Con esta tecnología se separan del agua residual la mayor parte de sólidos sedimentables y de material flotante que no puede ser eliminado en etapas anteriores y se reduce el contenido de sólidos en suspensión del agua. Los tanques de sedimentación primaria pueden ser el principal tratamiento del agua residual o se pueden emplear como paso previo a un tratamiento posterior.

Si la velocidad del agua se reduce a menos de 0,3 m/s, la mayor parte de los sólidos más pesados sedimentan y los más ligeros ascienden hasta la superficie. Los tanques de sedimentación primaria, con un correcto dimensionamiento y explotación, alcanzan una eliminación entre el 50 y el 70% de los sólidos en suspensión y entre el 25 y el 40% de la DBO₅ [4].

- **Flotación**

La flotación es un proceso para separar sólidos de baja densidad o partículas líquidas de una fase líquida. La separación se lleva a cabo introduciendo un gas (normalmente aire) en la fase líquida, en forma de burbujas [70,71].

- **Separación de aceites**

Por otro lado, los desengrasadores tienen como objetivo la eliminación de aceites y grasas procedentes de sectores y actividades como restaurantes, garajes, gasolineras, mataderos, etc. La eliminación de las grasas se realiza para evitar fenómenos de flotación indeseable de fangos en procesos posteriores de

decantación de agua, así como para evitar obstrucciones y ensuciamientos que interfieran en la separación de los sólidos. Las grasas se eliminan mediante flotación artificial o forzada [4].

- **Neutralización (coagulación)**

Existen dos tipos de tratamiento químico que se aplican durante la etapa del tratamiento primario y que ayudan a la eliminación de materia contaminante de un agua residual. En una primera fase (coagulación), la adición de productos químicos, como son el sulfato de aluminio o el sulfato de cobre (II), en dosis determinadas en laboratorio (entre 100 y 300 g/m³ de agua residual) persiguen la neutralización de las cargas de determinadas partículas [72].

- **Tratamiento físico-químico (floculación)**

Junto con la coagulación, otra tecnología química que se utiliza habitualmente en el tratamiento primario es la floculación. Esta consiste en la adición de otros productos químicos que propician la agregación de las partículas neutralizadas en flóculos o partículas de mayor tamaño [72].

La floculación puede tener lugar en un floculador separado o bien en el interior de un decantador, pudiéndose utilizar tanto especies de carácter inorgánico (minerales, como, por ejemplo, la sílice activada) o de carácter orgánico (macromoléculas de cadena larga y alto peso molecular, de origen natural o sintético) [73].

- **Fosas sépticas y decantadores-digestores**

Son unos dispositivos muy empleados para realizar un tratamiento primario a las aguas residuales procedentes de pequeñas poblaciones. Fundamentalmente, reducen el contenido de sólidos en suspensión (tanto sedimentables como flotantes) de las aguas residuales [72].

Tratamiento secundario

En el tratamiento secundario o biológico se elimina gran parte de la contaminación orgánica. La mayor parte de los componentes orgánicos de las aguas residuales sirven como alimento (sustrato), que proporciona energía para el crecimiento microbiano. Este es el principio que se utiliza en el tratamiento biológico de los residuos acuosos, en donde ciertos microorganismos, principalmente bacterias (con la ayuda de protozoarios), transforman el sustrato orgánico (materia orgánica disuelta y coloidal) en dióxido de carbono, agua y células nuevas. Los microorganismos pueden ser aerobios (necesitan oxígeno libre), anaerobios (no requieren oxígeno libre) o facultativos (crecen con o sin oxígeno). Los procesos en los cuales los microorganismos utilizan el oxígeno combinado (del nitrato para la desnitrificación, por ejemplo) suelen describirse como anóxicos, no como anaerobios [74].

En el tratamiento secundario o biológico se elimina gran parte de la contaminación orgánica.

Desde principio del presente siglo, se están desarrollando tecnologías para su aplicación en aguas residuales urbanas [68], pudiéndose establecer cuatro procesos tipo:

- a. Fangos activados, en los que se aplican distintas tecnologías: alta carga, media carga (convencional), aireación prolongada, contacto-estabilización, doble etapa, sistemas secuenciales y biorreactores con membranas.
- b. Procesos de película fija, que incluyen lechos bacterianos, biodiscos, biofiltros aireados, lechos aireados sumergidos, sistemas de biomasa fija sobre lecho móvil.

- c. Procesos no convencionales: lagunaje (usando distintos tipos de lagunas: anaerobias, facultativas, aerobias y aireadas), infiltración-percolación, lechos de turba, humedales artificiales, y filtros verdes.
- d. Procesos anaerobios.

Indiscutiblemente, el proceso de **lodos activados** es la técnica más frecuentemente utilizada en el campo del tratamiento biológico de aguas residuales. Aunque hay varias formas en las que se opera este proceso, que van desde sistemas muy básicos (por ejemplo, zanjas de oxidación) a sistemas más avanzados (por ejemplo, los biorreactores de membrana), los principios básicos son los mismos. Una población diversa de microorganismos convierte constituyentes orgánicos biodegradables de las aguas residuales, y ciertas fracciones inorgánicas, en nueva biomasa y subproductos, que posteriormente son eliminados por arrastre gaseoso, sedimentación, o por otros medios físicos [75].

Con los fangos activados (convencionales y de aireación prolongada), se eliminan entre el 85 y el 95% de la materia orgánica disuelta biodegradable (DBO₅) y de la materia orgánica en suspensión (SS). Con los procesos de doble etapa se consiguen rendimientos superiores.

Los **biorreactores** con membranas, tecnología de reciente aplicación, consiguen efluentes con concentraciones de DBO₅ y SS menores de 5 y 2 mg/L, respectivamente, capaces de ser reutilizados en cualquier tipo de uso.

Otros procesos secundarios de gran implantación son los de **biopelícula** (lechos bacterianos, biodiscos, biofiltros aireados, etc.) con los que se consiguen rendimientos entre el 80 y el 95% de DBO₅ y de SS. Hay que señalar que en la actualidad se están desarrollando sistemas de biopelícula novedosos que mejoran su eficiencia y versatilidad, pudiendo destacarse los sistemas de biomasa fija sumergida, los de biomasa fija sobre lecho móvil y los lechos biológicos fluidificados.

Los **sistemas secundarios no convencionales** agrupan a aquellos procesos cuyos parámetros y cinéticas son los que normalmente se dan en la naturaleza; por eso se llaman también procesos “naturales”. Los más utilizados son el lagunaje, la infiltración-percolación, los humedales artificiales y los filtros verdes. Se utilizan para pequeñas poblaciones, siendo su principal ventaja los bajos costes energéticos y la posibilidad de que su mantenimiento pueda ser llevado a cabo por personal no especializado.

Por último, los **tratamientos anaerobios** se utilizan fundamentalmente para la depuración de aguas residuales muy cargadas, procedentes en general de las industrias agroalimentarias.

A continuación, se describen con más detalle los procesos mencionados:

- **Lodos activos**

El proceso de lodos activos ha sido utilizado para el tratamiento de las aguas residuales tanto industriales como urbanas desde hace más de un siglo. Fue desarrollado en Inglaterra en 1914 por Andern y Lockett y llamado así porque suponía la producción de una masa activa de microorganismos capaz de estabilizar un residuo por vía aerobia. Una vigorosa aireación del agua residual produce la formación de flóculos. Fundamentalmente, las partículas del flóculo contienen un gran número de bacterias; pero también hay algunas levaduras y hongos. El efluente, con los flóculos, pasa a un tanque de sedimentación, donde los flóculos sedimentan y forman los llamados lodos; este proceso de separación se denomina clarificación, asentamiento o sedimentación. El sobrenadante constituye el efluente de la planta y, de los lodos una parte se purga y otra se vuelve al tanque aireador para servir como inóculo en la formación de los nuevos flóculos. La materia en suspensión y la coloidal se eliminan rápidamente de las aguas residuales por adsorción y aglomeración con los flóculos bacterianos. Una vez formado, parte de la materia orgánica del flóculo se descompone por el metabolismo microbiano, oxidación y síntesis, conociéndose a este proceso como estabilización de los lodos. Sin duda, es la tecnología con mayor aplicación al tratamiento de aguas residuales por lo que es bien conocida, tanto a nivel teórico como experimental y práctico. Para una visión completa, se recomienda la consulta del libro “Tratamiento de las aguas residuales” [76].

- **Aireación prolongada**

Este proceso, al que se conoce también por oxidación total, es una modificación del proceso de lodos activos. La idea fundamental de la aireación prolongada, al compararla con el proceso convencional de lodos activos, es disminuir la cantidad de lodo residual. Esto se consigue aumentando el tiempo de residencia; de esta forma el volumen de reactor es comparativamente mayor que el requerido en el proceso convencional de lodos activos.

- **Estabilización por contacto**

El proceso de contacto-estabilización es otra modificación del de lodos activos en el que el agua residual afluyente se mezcla con lodo estabilizado y esta mezcla se somete a aireación en el tanque de contacto inicial para el cual el tiempo de retención es solamente de 20 a 40 min. Durante el contacto inicial se separa una fracción apreciable de demanda biológica de oxígeno, en suspensión y disuelta, mediante bioabsorción después de estar en contacto con el lodo activo suficientemente aireado. El efluente mezcla procedente del tanque de contacto inicial fluye al clarificador. Se separa el efluente clarificado y la descarga del clarificador se lleva a un tanque de estabilización en donde es aireada durante un período de 1,5 a 5 h. Durante este período de estabilización los productos orgánicos adsorbidos se rompen mediante degradación aerobia. El lodo estabilizado que abandona el tanque de estabilización lo hace en condiciones de «inanición» y dispuesto por lo tanto a adsorber residuos orgánicos.

- **Modificación del sistema convencional de lodos activos**

Existen otras modificaciones al tratamiento por lodos activos que, si bien conllevan buenos resultados, no son tan habituales.

- **Aireación por fases**

La aireación escalonada es una modificación del proceso convencional de lodos activos en la cual la alimentación fresca se introduce en diversos puntos a lo largo del tanque de aireación.

- **Mezcla completa**

En esta modificación del proceso de lodos activos la alimentación fresca y el lodo de reciclado se combinan y se introducen en diversos puntos del tanque de aireación desde un canal central. El suministro y la demanda de oxígeno son uniformes a lo largo del tanque, mientras que el líquido aireado abandona el reactor por canales de efluente a ambos lados del tanque de aireación.

- **Aireación descendente**

El objetivo de la aireación descendente es armonizar la cantidad de aire suministrado con la demanda de oxígeno a lo largo del tanque de aireación. Ya que a la entrada la demanda de oxígeno es más alta, los aireadores se sitúan más próximos para proporcionar una velocidad más alta de oxigenación. El espacio entre aireadores se aumenta hacia la salida conforme la demanda de oxígeno disminuye.

- **Alta carga**

Esta variación de proceso se utiliza a un valor pequeño de la concentración de MLVSS (sólidos volátiles en suspensión en el licor mezclado). Las velocidades de disminución de sustrato y las velocidades de crecimiento de la biomasa son elevadas, aunque la disminución global de sustrato es baja.

- **Aireación con oxígeno puro**

El proceso mejor conocido ha sido desarrollado por Union Carbide (proceso Unox), en el cual se utiliza oxígeno puro en lugar de aire, aplicándose mediante aireadores de superficie en reactores cubiertos.

- **Lagunaje con aireación**

Las lagunas aireadas son balsas con profundidades de 1 a 4 m en las que la oxigenación de las aguas residuales se realiza mediante unidades de aireación, bien sean superficiales, turbinas o difusores. La diferencia fundamental entre lagunas aireadas y el sistema de lodos activos es que en este se lleva a cabo la recirculación del lodo como forma de controlar la cantidad de lodo biológico en el reactor de aireación. Las lagunas aireadas son sistemas sin reciclado de lodos. La concentración de sólidos en las lagunas es función de las características del agua residual y del tiempo de residencia. Dicha concentración está comprendida entre 80 y 200 mg/L; esto es, mucho menor que la que se utiliza en las unidades de lodos activos convencionales (de 2000 a 3000 mg/L).

- **Lagunas de mezcla completa**

Se caracterizan porque el nivel de turbulencia es suficiente para mantener los sólidos en suspensión y para proporcionar oxígeno disuelto en todo el volumen de líquido.

- **Lagunas facultativas**

El nivel de turbulencia es insuficiente para mantener todos los sólidos en suspensión, contándose exclusivamente con el necesario para suministrar oxígeno disuelto en todo el volumen de líquido. Parte de los sólidos decantan en el fondo de la laguna donde sufren descomposición anaerobia.

- **Balsas anaerobias**

La carga de las balsas anaerobias es tal que prevalecen estas condiciones en toda la masa del líquido. La carga orgánica varía entre 250 y 4000 kg DBO₅/(ha·d). Los rendimientos en la disminución de la DBO varían entre 50 y el 80%. Ya que este grado de la disminución de la DBO no es suficiente para su descarga en los medios receptores, las balsas anaerobias están normalmente seguidas de balsas facultativas y aerobias. La profundidad normal varía entre 2,5 y 4,5 m, e incluso se recomiendan profundidades mayores, para proporcionar la retención de calor máxima, obteniendo además una economía adicional en función del valor del terreno.

- **Estabilización por lagunaje**

En las balsas de estabilización no se utiliza equipo de aireación. El oxígeno necesario en las balsas se obtiene de la superficie natural de aireación y de las algas, que producen oxígeno por fotosíntesis. El oxígeno liberado por las algas por la fotosíntesis se utiliza por las bacterias para la degradación aerobia de la materia orgánica. Los productos de esta degradación (CO₂, amoníaco, fosfatos) son utilizados de nuevo por las algas.

- **Filtros biológicos**

Todos los procesos (reactores) biológicos aerobios descritos anteriormente suponen la presencia de un crecimiento biológico que se mantiene en suspensión dentro del reactor. Por esta razón se denominan reactores de crecimiento biológico en suspensión. Se ha desarrollado otro tipo de reactor en el que se utiliza algún tipo de soporte del crecimiento biológico, que se mantiene fijo en él. Estos reactores se denominan reactores de crecimiento biológico asistido.

Los filtros percoladores pertenecen a este tipo de reactores de crecimiento asistido. Consisten en un relleno cubierto de limo biológico a través del cual se percola (se mueve a través de un medio poroso) el agua residual. Esta normalmente se distribuye en forma de pulverización uniforme sobre el lecho de relleno mediante un distribuidor rotativo del flujo. El agua residual percola en forma descendente a través del relleno y el efluente se recoge en el fondo.

Para rendimientos en la disminución de la DBO de aproximadamente el 60%, se ha encontrado que normalmente los filtros percoladores son más económicos que el proceso de lodos activos, en particular para caudales pequeños de aguas residuales. Para rendimientos superiores en la disminución de la DBO (90% o más) el proceso de lodos activos es más económico debido a que el coste del material del relleno podría resultar demasiado elevado.

- **Discos biológicos**

Los biodiscos son sistemas que fueron desarrollados para obtener el tratamiento biológico aerobio de las aguas residuales. En estos sistemas, la biomasa se presenta simultáneamente en la forma de crecimiento asistido (como en el caso de los filtros percoladores) y de crecimiento en suspensión (como en el caso de las unidades de lodos activos).

Cada etapa está formada por una serie de discos no muy separados, normalmente fabricados de poliestireno o polietileno con diámetros comprendidos entre 3 y 4 m. Estos discos se mantienen paralelos entre sí y unidos a un eje horizontal que pasa a través de sus centros. Los ejes tienen longitudes de 7,5 m aproximadamente, pudiendo alojar de esta forma un gran número de discos.

- **Tratamientos anaerobios**

El tratamiento anaerobio se utiliza tanto para las aguas residuales como para la digestión de los lodos, si bien aquí se hará referencia al tratamiento anaerobio de las aguas residuales. Los productos finales de la degradación anaerobia son gases, principalmente metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y pequeñas cantidades de sulfuro de hidrógeno (H_2S), mercaptanos (compuestos orgánicos que contienen el grupo tiol, $\text{R}-\text{SH}$) e hidrógeno (H_2). El proceso comprende dos etapas: fermentación ácida y fermentación metánica.

En la etapa de fermentación ácida, los compuestos orgánicos complejos del agua residual (proteínas, grasas e hidratos de carbono) se hidrolizan en primer lugar para producir unidades moleculares menores, las cuales a su vez son sometidas a biooxidación, convirtiéndose principalmente en ácidos orgánicos de cadena corta. En la etapa de fermentación ácida no se produce una reducción importante de la DQO, ya que principalmente lo que ocurre es la conversión de las moléculas orgánicas complejas en ácidos orgánicos de cadena corta que ejercen también una demanda de oxígeno.

En la etapa de fermentación metánica, microorganismos metanogénicos, que son estrictamente anaerobios, convierten los ácidos de cadenas más largas a metano, dióxido de carbono y ácidos orgánicos de cadenas más cortas. Las moléculas ácidas se rompen repetidamente dando lugar finalmente a ácido acético, que se convierte en CO_2 y CH_4 .

Tratamiento secundario avanzado

Además, se pueden encontrar tratamientos secundarios más rigurosos o avanzados que son los que reducen, además de la materia orgánica carbonada, los nutrientes (el nitrógeno y/o fósforo), utilizándose cuando el efluente se vierte a zonas sensibles (eutrofizadas o susceptibles de eutrofización) o destinadas a usos en los que debe limitarse el nitrógeno o el fósforo (para agua potable, piscifactorías, inyección en acuíferos, etc.).

La eliminación de nitrógeno se realiza mediante vía biológica, siendo los procesos más usuales los fangos activados y los de biopelícula, alcanzándose rendimientos entre el 70 y el 80%.

La eliminación de fósforo puede realizarse por vía biológica, generalmente unida a la eliminación de nitrógeno (rendimiento: 70-80%) o mediante vía físico-química, mediante adición de sales de hierro en el reactor biológico (rendimiento: 80-90%).

Tratamiento terciario

Los tratamientos terciarios se utilizan para dos tipos de fines: obtener una mejora (o “afino”) del efluente depurado por exigencias del cauce receptor; y mejorar el efluente con vistas a su posterior reutilización, llamándose en este caso “tratamiento de regeneración” [68].

Con este tratamiento se elimina la DBO remanente, sólidos suspendidos, bacterias, compuestos tóxicos o nutrientes específicos para permitir que el efluente final cumpla con un estándar de calidad más estricto.

Con el tratamiento terciario se elimina la DBO remanente, sólidos suspendidos, bacterias, compuestos tóxicos o nutrientes específicos para permitir que el efluente final cumpla con un estándar de calidad más estricto.

Se pueden dividir estos procesos en tres tipologías: 1) los que su fin fundamental es reducir los SS, la turbidez y la DBO₅ (proceso físico-químico, filtración, microfiltración y ultrafiltración), 2) los que su objetivo es la desinfección del efluente (cloro gas, hipoclorito de sodio, dióxido de cloro, ozono y rayos ultravioleta) y 3) los destinados a la reducción de sales (ósmosis inversa, electrodiálisis reversible e intercambio iónico).

- **Eliminación de sólidos en suspensión**

Para eliminar los sólidos en suspensión que no han sido eliminados en los procesos anteriores y que pueden influir en la DBO final existen tres procesos: microtamizado, filtración y coagulación [76]. Se utiliza normalmente la filtración para conseguir rendimientos en la eliminación de sólidos en suspensión de hasta el 99%. Los materiales de relleno de los filtros más empleados son arena, antracita y tierra de diatomeas [77].

- **Microtamizado**

Los microtamices se construyen sobre tambores rotativos. Con el microtamizado se consigue eliminar del 70 al 90% de los sólidos en suspensión [77].

- **Filtración (lecho de arenas, diatomeas, etc.)**

Los materiales de rellenos de filtros más empleados son arena, antracita, y tierra de diatomeas [77].

- **Precipitación y coagulación**

La coagulación se lleva a cabo utilizando sulfato de aluminio, polielectrolitos, óxido de calcio y otros reactivos químicos [77].

- **Membranas**

El uso de membranas de microfiltración (con tamaños inferiores a 0,5 μm) o de ultrafiltración (tamaños en torno a 15 000 Daltons), usadas individualmente o de forma secuencial, permiten la eliminación total de coliformes totales, coliformes fecales y estreptococos fecales, y superior al 99% de eliminación de aerobios totales; también se alcanzan buenos resultados en la reducción de SS (~96%) y de la turbidez (superior al 99%). Sin embargo, los rendimientos de reducción de DQO son bajos (alrededor del 50%) y de la DBO₅ del 70%. La remoción de nutrientes fue media e insignificante la eliminación de metales [78].

- **Adsorción (carbón activo)**

La adsorción en carbón activo se lleva a cabo, bien en forma continua o bien en forma discontinua. En la operación discontinua, el carbón activo en polvo se mezcla con el agua residual y se deja decantar. La operación continua se lleva a cabo en columnas conteniendo carbón granulado (de 40 a 80 mallas). Es más económica que la operación discontinua y ha encontrado mayores aplicaciones. Los porcentajes de eliminación dependen fundamentalmente del tiempo de contacto entre el agua residual y el carbón activo [76].

- **Intercambio iónico**

El intercambio iónico es un proceso en que los iones que se mantienen unidos a grupos funcionales sobre la superficie de un sólido por fuerzas electrostáticas se intercambian por iones de una especie diferente en disolución. Este procedimiento ha llegado a ser notablemente importante en el campo del tratamiento de las aguas residuales. Ya que la desmineralización completa puede alcanzarse mediante intercambio iónico, es posible utilizar procesos de tratamiento de corriente partida, en los que parte del agua residual afluyente se desmineraliza y se combina después con parte del afluyente que ha sido desviado del tratamiento para producir un efluente de calidad específica (por ejemplo, de una determinada dureza) [76].

- **Ósmosis inversa**

En el tratamiento de las aguas residuales mediante ósmosis inversa, el afluyente contaminado se pone en contacto con una membrana a una presión superior a la presión osmótica de la solución. Bajo estas circunstancias, el agua con una cantidad muy pequeña de contaminantes pasa a través de la membrana. Los contaminantes disueltos se concentran en el compartimento del agua residual. Este concentrado, que posiblemente sea una pequeña fracción del volumen total de agua residual a tratar, se descarga. Se obtiene agua purificada en el otro compartimento [76].

La ósmosis inversa es todavía muy cara para una utilización universal en el tratamiento de las aguas residuales. Está también limitada al tratamiento de residuos solubles ya que los sólidos en suspensión taponan las membranas. En consecuencia, se necesita el tratamiento previo de la alimentación cuando haya sólidos en suspensión, aumentando así los costes.

- **Electrodiálisis**

La electrodiálisis se desarrolló para la desalación del agua del mar. Es un método prometedor de eliminación de nutrientes inorgánicos (fósforo y nitrógeno) de las aguas residuales y, por ello, una posible etapa final en los procesos de tratamiento de aguas residuales. El cátodo y el ánodo se colocan en los dos extremos de la celda de forma tal que la membrana más próxima al cátodo sea permeable a los cationes y la más próxima al ánodo sea permeable a los aniones. El agua residual cruda se alimenta continuamente en los compartimentos de concentración y el agua residual tratada se extrae también continuamente de los compartimentos de dilución. Para un funcionamiento adecuado de la celda de electrodiálisis, la materia en suspensión, los iones orgánicos de gran tamaño y la materia coloidal deben separarse antes del proceso. Si esto no se hace, estos materiales pueden provocar el ensuciamiento de la membrana, lo que conduce a un aumento de la resistencia eléctrica total [76].

- **Cloración y ozonización**

La cloración es un proceso muy usado en el tratamiento de aguas residuales industriales y urbanas. Los objetivos de la cloración se resumen como sigue [76]:

1. Desinfección. Fundamentalmente el cloro es un desinfectante debido a su fuerte capacidad de oxidación, por lo que destruye o inhibe el crecimiento de bacterias y algas.
2. Reducción de la DBO. El cloro produce una reducción de la DBO por oxidación de los compuestos orgánicos presentes en las aguas residuales.
3. Eliminación o reducción de colores y olores. Las sustancias que producen olor y color presentes en las aguas residuales se oxidan mediante el cloro. La capacidad oxidante del cloro se emplea para el control del olor y la eliminación del color en muchos tratamientos industriales (azúcar de caña, industrias de conservas, centrales lecheras, pasta y papel, textiles, etc.).
4. Oxidación de los iones metálicos. Los iones metálicos que están presentes en forma reducida se oxidan por el cloro (por ejemplo, ferroso a férrico y manganeso a mangánico).
5. Oxidación de los cianuros a productos inocuos.

La oxidación química con ozono es un método efectivo para tratar las aguas residuales, basándose en los siguientes factores [79]:

1. El ozono reacciona fácilmente con los productos orgánicos no saturados presentes en las aguas residuales.
2. La tendencia a la formación de espuma de las aguas residuales se reduce después del tratamiento con ozono.
3. La ruptura de los anillos y la oxidación parcial de los productos aromáticos deja a las aguas residuales más susceptibles de tratamiento convencional biológico.
4. El ozono presente en el efluente se convierte rápidamente a oxígeno una vez que ha servido a sus fines. Este oxígeno es beneficioso para las corrientes receptoras y ayuda a mantener la vida acuática. Por el contrario, el cloro (que es el agente más ampliamente usado para eliminar las bacterias) permanece en el efluente y se convierte en contaminante.

El ozono puede sustituir al cloro en el tratamiento de las aguas residuales que contienen cianuro.

- **Procesos de reducción de nutrientes**

La eliminación de nutrientes (compuestos de fósforo y nitrógeno) de las aguas residuales es una operación importante, debido a que estos productos juegan un papel crítico en la eutrofización. Se ha acentuado el interés en la eliminación de fósforo últimamente por dos razones: el fósforo es el nutriente más crítico, y los procesos de eliminación de nitrógeno son menos eficaces y más caros [76].

Los procesos para la eliminación de fósforo son, entre otros, la precipitación química, el proceso de lodos activos, las balsas de estabilización, la ósmosis inversa, y la electrodiálisis.

El proceso principal encaminado específicamente a la eliminación del nitrógeno es el de nitrificación-desnitrificación, el cual es una modificación del proceso convencional de lodos activos y tiene lugar en dos fases: nitrificación y desnitrificación. Aunque la presencia de nitritos y nitratos en un efluente es menos cuestionable que la del nitrógeno amoniacal, se hace necesario eliminarlos si se aplican reglamentaciones estrictas para permitir la evacuación del efluente.

Nuevas tecnologías

Tal y como se puede observar, actualmente existe una importante apuesta por las tecnologías extensivas aplicables en las pequeñas poblaciones donde hacer frente a variaciones de población estacionales, con

un bajo impacto medioambiental, un funcionamiento relativamente sencillo y costes de mantenimiento y funcionamiento asequibles.

Por otra parte y siguiendo con la línea de tratamiento del agua, la cada vez más necesaria reutilización de los efluentes depurados no solo en los riegos tradicionales, sino también en el campos de golf, además de usos de tipo industrial o medioambiental ha condicionado la calidad del agua depurada, por lo que ha sido bastante frecuente incorporar al esquema clásico de depuración etapas complementarias de tratamiento físico-químico seguido de una desinfección generalmente mediante rayos ultravioletas.

Otros aspectos que también implican una evolución tecnológica reseñable son el tratamiento y gestión de los fangos y su puesta en valor. no solo desde un punto de vista agronómico sino también energético.

Además, siempre ha preocupado el volumen de fangos generados por lo que se ha estudiado y diseñado sistemas que permitieran un volumen menor de fangos que transportar hasta su disposición final. Así con mayor o menor fortuna se han implantado sistemas de incineración de fangos (Zaragoza, Bilbao, etc.) o de deshidratación térmica con o sin cogeneración eléctrica. El secado térmico ha terminado implantándose en numerosas instalaciones en Barcelona, Madrid, San Sebastián, Coruña, Málaga, Valencia, Oviedo, etc.

- **Tamices de helófitas en flotación.**

En la reutilización agrícola de los efluentes obtenidos de las EDAR de pequeñas poblaciones, la tecnología integra en una misma instalación el tratamiento de depuración, regeneración y acumulación de agua regenerada [80]. Para la consecución de estos objetivos, ha desarrollado un sistema de tratamiento de tamices de helófitas en flotación que permite tanto el tratamiento de depuración del agua residual como un tratamiento complementario para aguas ya depuradas mediante la utilización de aQuarQ Enterprise. Este sistema, denominado aQuarQ, logra eliminar la materia orgánica y los contaminantes que contienen las aguas residuales, utilizando plantas superiores helófitas de tipo emergente que se dan de forma natural en humedales y zonas inundadas.

- **Reactores biológicos de membrana**

La tecnología MBBR (*Moving Bed Biofilm Reactor*) e IFAS (*Integrated Fixed-film Activated Sludge*) son dos de las últimas tecnologías aplicadas a la depuración de aguas residuales, tanto urbanas como industriales. Ambas tecnologías están basadas en el crecimiento de biomasa, en forma de biopelícula, en unos soportes plásticos que están en continuo movimiento en el interior de un reactor. Los soportes se caracterizan por ser de pequeño tamaño y de una elevada superficie específica por unidad de volumen. Los microorganismos responsables de la depuración se adhieren a los soportes plásticos que se mantienen en suspensión en el reactor. Mediante una aireación-agitación, se garantiza una distribución uniforme en todo el reactor y que los microorganismos tengan acceso a los sustratos [81].

Li y colaboradores [82] introdujeron los parámetros del proceso y estudiaron el efecto de funcionamiento del proceso de biopelícula sumergida con deflectores aplicados en el tratamiento de aguas residuales, con el objetivo de mejorar la amplia aplicación del proceso en el tratamiento de aguas residuales en pequeñas ciudades. El efecto de funcionamiento mostró que las aguas residuales tratadas mediante un proceso de biopelícula sumergida con deflectores pueden cumplir con los requisitos de la norma Grand B del estándar primario de descarga de contaminantes para plantas de tratamiento de aguas residuales municipales (GB 18918-2002).

Ortiz y colaboradores [83] presentaron un trabajo consistente en un análisis ambiental global de un tratamiento de aguas residuales (Sistema Convencional de Lodo Activado, CAS) y algunos posibles tratamientos terciarios adicionales que permitían la reutilización del agua a esas aguas purificadas (UF y Reactores Biológicos de Membrana sumergidos y externos, MBR). La evaluación ambiental de estas tecnologías de tratamiento de agua se ha realizado mediante la técnica de *Life Cycle Assessment* (LCA), con el fin de establecer con una perspectiva amplia y de forma rigurosa y objetiva la tecnología que

provoca la menor carga ambiental. Los resultados mostraron que el tratamiento terciario no aumentaba significativamente las cargas ambientales, sino que proporcionaba nuevos usos para esa agua depurada.

La estación depuradora como centro de valorización de residuos

Todas las tecnologías mencionadas anteriormente buscan igualar los niveles de depuración de las zonas urbanas en las zonas rurales, adaptándose para ello a las necesidades concretas de cada municipio. Conseguir esto debe ser el objetivo en el corto y medio plazo, pero en el largo debe perseguirse que las estaciones depuradoras se conviertan en centros productores de recursos.

Tradicionalmente las EDAR han sido consumidoras de energía y generadoras de residuos que se desechaban en los vertederos, en cambio las biofactorías son productoras de energía y recursos. En esta línea, algunas también son capaces de poner en valor y dar un segundo uso productos como las grasas y las arenas. Los objetivos de las biofactorías son: la autosuficiencia energética, el residuo cero y la reutilización del 100% del agua tratada.

Tradicionalmente las EDAR han sido consumidoras de energía y generadoras de residuos que se desechaban en los vertederos, en cambio las biofactorías son productoras de energía y recursos.

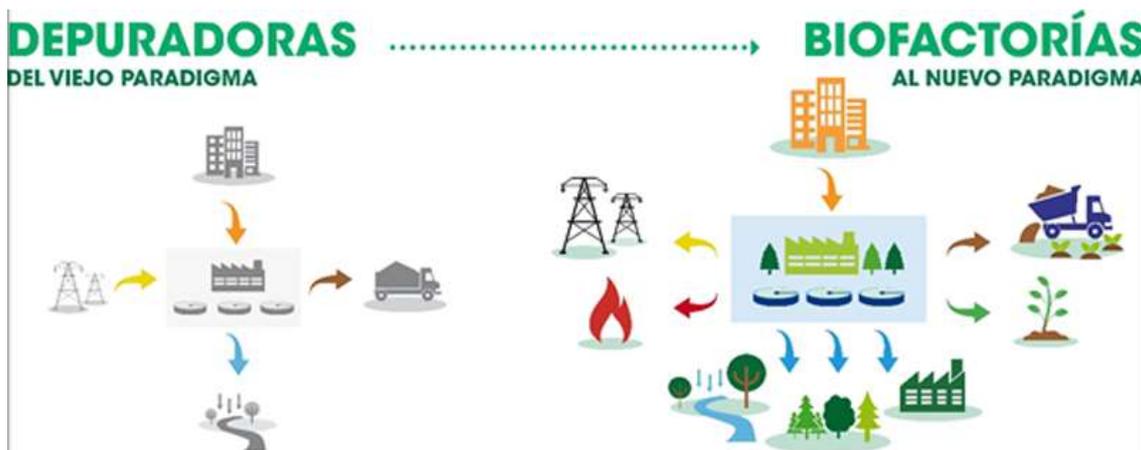


Figura 14. Esquema de una estación depuradora tradicional y de una biofactoría [84].

Si bien, a día de hoy no es viable construir biofactorías en pequeñas zonas rurales, sí que lo es implementar algunos de sus sistemas de valorización de agua, abono o energía.

- **Purificación de agua**

Al tratar la totalidad de las aguas residuales, estas continúan su viaje en los cauces fluviales, teniendo una segunda oportunidad para otros usos en agricultura y regadío.

Al reutilizar estas aguas, es importante llevar a cabo tratamientos para que las aguas depuradas no contengan nitrógeno y fósforo en cantidades elevadas ya que producirían problemas de eutrofización como ya se ha visto. Además, en el caso de los contaminantes emergentes, aún se sabe poco de sus efectos a largo plazo por lo que lo más recomendable es ser prudente en su uso y gestión. Por lo tanto, es necesario implementar nuevas tecnologías más económicas para pequeñas localidades.

Una de las mayores ventajas de la reutilización de agua en zonas agrícolas es que, en tiempos de escasez extrema, las autoridades nacionales suelen optar por derivar el agua de los agricultores hacia las ciudades, dado que el agua tiene mayor valor económico en su uso industrial y urbano. En estas circunstancias, el

uso de agua regenerada en agricultura permite conservar agua dulce y proporcionar a los agricultores un suministro de agua fiable y rico en nutrientes. Este intercambio también acarrea posibles beneficios ambientales, al permitir la asimilación de los nutrientes de las aguas residuales por las plantas y reducir así la contaminación aguas abajo. El reciclaje del agua puede ofrecer un “triple dividendo” para los usuarios urbanos, agricultores y el medio ambiente.

- **Generación de abono**

Los residuos sólidos producidos en la depuración se pueden convertir en fertilizantes para usos agrícolas y materia prima para otras industrias. El abonado es fundamental para garantizar la productividad de la tierra, pero es también una de las prácticas que más desconfianzas genera en los últimos tiempos.

Una de las principales cuestiones a tener en cuenta en el empleo de los lodos de depuradora en terrenos agrarios es que estos puedan contaminar el suelo y afectar a la cadena alimentaria, siendo especialmente relevante su contenido en microorganismos patógenos y contaminantes. Otro de los factores que condicionan el uso de los lodos es la presencia de metales pesados especialmente tóxicos. Este tipo de metales, al contrario que ocurre con los contaminantes orgánicos o los patógenos, no se llegan a destruir, sino que se acumulan en el suelo y pueden terminar pasando a distintos organismos hasta llegar a los humanos.

Por otro lado, al aplicar estos lodos se está minimizando el empleo de fertilizantes de origen químico. Esto supone una reducción paralela en el aporte de nitrógeno mineral más fácilmente disponible y lixiviable, disminuyendo el riesgo de contaminación por nitratos en el perfil del suelo. Esto es posible debido a que el aporte de nitrógeno que se realiza aplicando lodo de depuradora es de origen orgánico, el cual se irá liberando de manera progresiva a medida que se vaya mineralizando [85].

- **Autosuficiencia energética**

Actualmente, es posible que las estaciones depuradoras generen su propia energía llegando en ocasiones a ser 100% autosuficientes. En consecuencia, se logran reducir las emisiones de CO₂ y de otros gases de efecto invernadero.

La digestión anaerobia de fangos ha demostrado ser una práctica altamente rentable debido al aprovechamiento del biogás generado, ya sea para la generación eléctrica a través de motores de cogeneración o la fabricación de biocombustibles. De este modo, no solo se consiguen aprovechar residuos como recursos evitando su depósito en vertedero, sino que se minimizan los tiempos de almacenamiento y se evitan emisiones de gases de efecto invernadero.

Esto supone un ahorro significativo a los municipios, ya que la energía consumida por las EDAR representa aproximadamente el 20%. Además, se prevé que este porcentaje siga incrementándose en los próximos años, debido al aumento de la carga de contaminantes causado por el crecimiento de la población y el incremento estándares de purificación marcados por las nuevas leyes. Debido al aumento de los costos de la energía y la preocupación por el medio ambiente, el potencial de las EDAR energéticamente autosuficientes se ha convertido en un área de creciente investigación e innovación [86,87].

La energía consumida por las EDAR representa aproximadamente el 20% del uso total de energía del municipio.

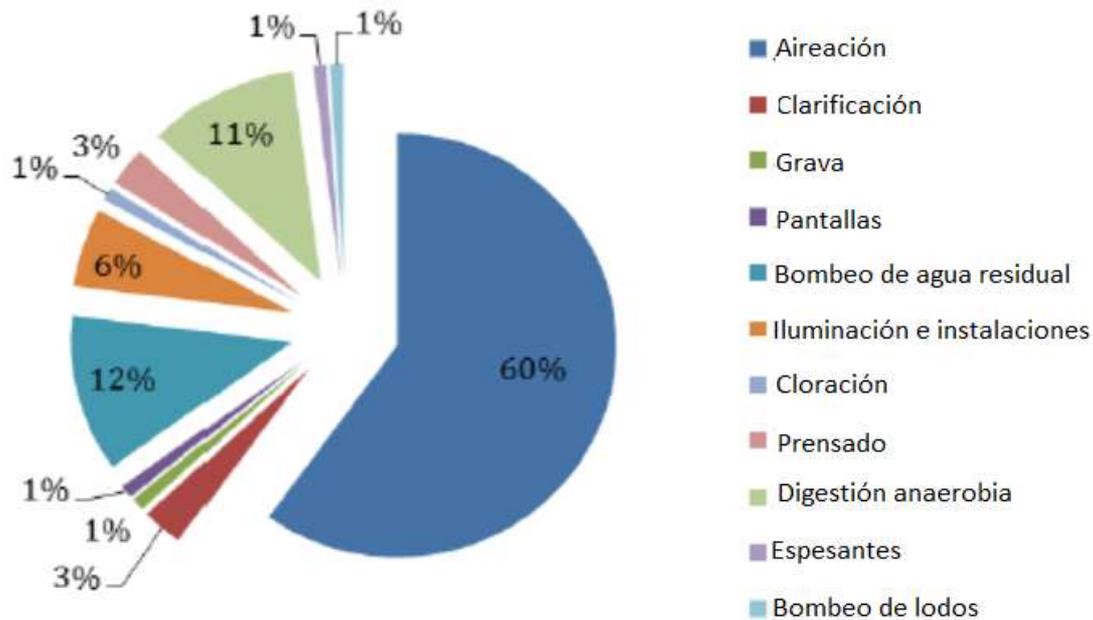


Figura 15. Diagrama circular del consumo energético en una EDAR [86].

Pese a esto, el consumo energético variará enormemente dependiendo de las condiciones del vertido y de la tecnología empleada. De este modo, los tratamientos secundarios requieren mucha más energía que los primarios siendo los tratamientos de lodos activos (en su etapa de aireación) el mayor consumidor de energía. De forma general, el consumo energético de cada etapa de las estaciones depuradoras puede verse en la Figura 15 [86].

Para poder implementar las medidas anteriormente mencionadas, las pequeñas aglomeraciones deben hacer frente a ciertas dificultades. Entre ellas destaca el cumplimiento de la normativa del vertido de forma estricta teniendo en cuenta la escasa capacidad técnica y económica para el mantenimiento y explotación de las instalaciones de las estaciones de tratamiento. También, el hecho de no poder aprovechar las ventajas que supone la economía de escala como consecuencia de su pequeño tamaño, conduce a que los costes de implantación, mantenimiento y explotación por habitante sean elevados.

Por todo esto, a la hora de seleccionar soluciones para el tratamiento de las aguas residuales generadas en los pequeños núcleos de población, debe darse prioridad a aquellas tecnologías que presenten un gasto energético mínimo, evitando, en lo posible, el empleo de dispositivos electromecánicos y recurriendo principalmente al uso de sistemas de oxigenación naturales. También será importante que posea requerimientos de mantenimiento y explotación simples, simplificando la gestión de los lodos generados en los procesos de depuración.

Además de estas consideraciones, estos sistemas de tratamiento deben garantizar un funcionamiento eficaz y estable frente a las grandes oscilaciones de caudal y carga en el vertido a tratar, presentando además un bajo impacto ambiental sonoro y una buena integración en el medio ambiente.



▶ Casos de éxito

Las nuevas legislaciones y el conocimiento del impacto que tiene el agua en nuestro organismo han promovido un cambio radical en las necesidades de depuración.

—Ramiro Cercos—

Casos de éxito

A lo largo de este informe se han visto cuáles son los problemas a los que se enfrenta la depuración en medios rurales. En grandes líneas, podríamos agrupar la necesidad de soluciones en tres grandes sectores: la actividad económica, la depuración municipal y recuperación de recursos para la agricultura.

SOLUCIONES ADAPTADAS A LA ACTIVIDAD ECONÓMICA EN MEDIOS RURALES

Todas las actividades económicas que necesitan tratar sus aguas de vertido deben hacerlo ellas mismas ya que las estaciones depuradoras pueden no ser capaces de absorber la totalidad de la carga contaminante y, en los peores casos, pueden no existir una estación cercana.

El desarrollo de soluciones específicas para cada tipo de vertido, permite obtener sistemas eficaces y competitivos económicamente. Las tecnologías de Fitwater para el sector porcino y Anaergy para el sector industrial son dos ejemplos de éxito en esta área.

NOMBRE de la solución tecnológica.	Fitwater
SECTOR DE APLICACIÓN (si se ha aplicado en un municipio, por favor, su nombre).	Sector porcino
DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA	<p>La intensificación de la actividad ganadera en los últimos años y una pobre gestión de los residuos han provocado la ruptura del equilibrio entre la producción de purines y la disponibilidad de tierras para absorberlo. Como dato significativo, la cabaña ganadera porcina española es de 28 millones de animales (2018) generando un volumen anual de aproximadamente 50 millones de toneladas de purines. El mal uso de los purines conlleva la contaminación de aguas superficiales y subterráneas por nitratos, y perjudica la potabilización del agua urbana de municipios rurales.</p> <p>El proyecto trata de asegurar que una tecnología de depuración de aguas incrementa de manera notable su valor y replicabilidad en explotaciones porcinas, a partir del uso de nuevas tecnologías TIC y capacidad de mitigación de afecciones medioambientales.</p>
RETOS A LOS QUE HACE FRENTE ESTA TECNOLOGÍA	<p>Los principales componentes de este reto son:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reto tecnológico: aumentar el valor de la planta a partir de la introducción de telecontrol y análisis de funcionamiento mediante Desarrollar un sistema tecnológicamente avanzado y avalado por la Comisión Europea (FIWARE) para el telecontrol y análisis de funcionamiento de una planta avanzada de depuración de aguas. • Reto económico: Realizar una valorización de la planta demostrando la total depuración de los purines generando outputs de alto nivel de aprovechamiento, mostrando la rentabilidad económica del proyecto. • Reto ambiental: reducir los problemas existentes a nivel nacional en cuestiones de depuración de aguas y más en concreto en el sector de los purines.
DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS ESPERADOS	<p>Este proyecto implementa una tecnología de depuración de aguas en explotaciones porcinas y tiene los siguientes objetivos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Desarrollar un sistema de monitorización, visualización y control de la Planta. Validar el aprovechamiento de <i>outputs</i> de la planta de depuración, principalmente agua depurada, lodos y lignina. • Comparar, en términos energéticos, el escenario de gestión actual con la gestión de gobernanza mejorada y el aprovechamiento de biogás aplicadas a explotaciones porcinas mediante la realización de auditorías energéticas, análisis de las mejoras y estudio de la viabilidad. • Difundir los resultados del proyecto y en su caso las ventajas ambientales y económicas demostradas al sector objetivo (porcino), permitiendo un acceso más efectivo al mercado.
DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS (si es posible cuantifique los resultados)	<p>Las granjas de cerdos tienen una gestión muy similar entre ellas. Detectar puntos de mejora y definir una gestión energética de menor impacto tiene un potencial de replicabilidad muy alto tanto a nivel regional como nacional. Asimismo, demostrar que el biogás generado en la planta de purines aporta beneficios energéticos a la gestión de la granja es un hito en el proceso de desarrollo de la planta que potencia su comercialización.</p> <p>Al impacto general del proyecto se añade la inclusión de tecnología para una mejor gobernanza y rentabilidad de la planta. Los datos obtenidos de la planta son almacenados y analizados en la nube, donde también se analizan posibles respuestas ante eventos surgidos.</p>

<p>INFORMACIÓN ECONÓMICA DE LA SOLUCIÓN (ahorro de agua y de energía, coste €/m³ agua tratada)</p>	<p>El tratamiento tradicional de purines suele estar compuesto por instalaciones compactas con fases independientes y modulares, formadas por etapa físico-química y etapa biológica. Los costes medios por metro cúbico de purín en este tipo de instalaciones son:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gastos de explotación: 2,75 €/m³ • Gastos de inversión: 6,85 €/m³ • Ingresos por generación de biogás: 5,74 €/m³ <p>Esta tecnología basada en un digestor anaerobio y probada en diversos lugares, muestra los siguientes costes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gastos de explotación: 0,57 €/ m³ • Gastos de inversión: 0,72 €/ m³ • Ingresos por generación de biogás: 9,44 €/m³ <p>En síntesis, la tecnología propuesta logra un 70% de reducción de costes de explotación de un sistema tradicional frente a la nueva tecnología.</p>
<p>REQUERIMIENTOS PARA SU INSTALACIÓN (personales, instrumentales, económicos, etc.)</p>	<p>No requiere personal especializado para su manejo.</p>
<p>MATERIAL GRÁFICO (Fotografías, gráficos de apoyo, etc.)</p>	 <p>Figura 16. Fotografía de la instalación.</p>
<p>DATOS DE CONTACTO PARA MÁS INFORMACIÓN (Dirección postal, web, correo electrónico, etc.)</p>	<p>Web: https://zinnae.org/project/fitwater/</p> <p>Teléfono: +34 649107506</p> <p>Correo: info@zinnae.org</p>

NOMBRE de la solución tecnológica	Planta biológica de tratamiento de agua contaminada, ANAERGY.
SECTOR DE APLICACIÓN (si se ha aplicado en un municipio, por favor, su nombre)	Sector Industrial y urbano. Ha sido implantado en Fruta del Norte (Ecuador) y en una Industria Cervecera (Borines).
DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA	<p>ANAERGY es un estema modular 100% personalizado de tratamiento de agua en contenedor. Es una solución <i>Plug & Play</i>, totalmente automatizada que minimiza la obra civil, los tiempos de ejecución y la puesta en marcha, y que permite reducir los costes de inversión de la solución en su conjunto.</p> <p>Este sistema se encuentra equipado con tecnologías propias innovadoras diseñadas para ser las soluciones más eficientes, rentables y sostenibles del mercado.</p> <p>En función del caudal a tratar y de las concentraciones de contaminantes es posible escalar la solución e integrar diferentes tecnologías propias para tratar matrices de contaminantes combinadas.</p> <p>Asimismo, para mayores caudales se instalan módulos complementarios que operan en paralelo.</p>
RETOS A LOS QUE HACE FRENTE ESTA TECNOLOGÍA	<p>Esta tecnología biológica modular propone un enfoque disruptivo frente a las soluciones clásicas, con el objetivo de resolver las limitaciones típicas de altos costes de ejecución, necesidad de mucha superficie y encarecimiento del coste operativo en pequeños caudales.</p> <p>Es una solución muy rápida y totalmente automatizada, supervisada por personal altamente cualificado especializado en tratamientos de agua.</p>
DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS ESPERADOS	<p>Esta tecnología elimina carga orgánica (DQO y DBO) con parámetros de cumplimiento a cauce público, así como nutrientes del tipo nitrógeno (en sus diversas formas) y fósforo.</p> <p>Se esperan resultados con cumplimiento a cauce público o colector, dependiendo de la instalación.</p>
DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS (si es posible cuantifique los resultados)	<p>ENTRADAS</p> <ul style="list-style-type: none"> • DQO desde 400 a 3200 mg/L • Nitrato desde 40 a 390 mg/L • Nitrógeno amoniacal desde 20 a 90 mg/L <p>SALIDAS</p> <p>Siempre con parámetros de cumplimiento a cauce público.</p>
INFORMACIÓN ECONÓMICA DE LA SOLUCIÓN (ahorro de agua y de energía, coste €/m ³ agua tratada)	Ahorros en OPEX por encima del 50% frente a soluciones tradicionales. Costes para agua urbana por debajo de 0,6 €/m ³ .
REQUERIMIENTOS PARA SU INSTALACIÓN (personales, instrumentales, económicos, etc.)	Requiere de personal técnico especializado.

MATERIAL GRÁFICO (fotografías, gráficos de apoyo, etc.)



Figura 17. Imagen exterior del sistema de depuración transportable.



Figura 18. Imagen interior del sistema de depuración transportable.

DATOS DE CONTACTO PARA MÁS INFORMACIÓN (dirección postal, web, correo electrónico, etc.)

Web: <http://ingeobras.com/>

Teléfono: +34 976 483 532

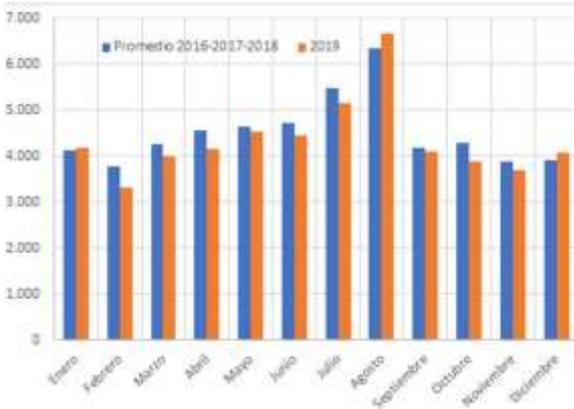
Correo: info@ingeobras.com

SOLUCIONES ADAPTADAS A LA DEPURACIÓN DE LOS MUNICIPIOS

Los sistemas de depuración en los pequeños municipios suelen adolecer de falta de personal cualificado que los opere. Las soluciones basadas en el telecontrol permiten operar de forma centralizada estaciones depuradoras dispersas geográficamente, como ocurre en el Telecontrol en depuradoras de Teruel.

Además, los sistemas de tengan un bajo coste de mantenimiento y que sean capaces de adaptarse a la estacionalidad del vertido son ideales para estas zonas. En este apartado destacan las soluciones basadas en naturaleza como AQUAMUNDAM.

NOMBRE de la solución tecnológica	Telecontrol en depuradoras de Teruel.
SECTOR DE APLICACIÓN (si se ha aplicado en un municipio, por favor, su nombre)	<p>Depuración en pequeños municipios. Esta tecnología se ha aplicado en 13 depuradoras que forman parte del contrato “Depurplan 11” en la provincia de Teruel.</p> <p>Dichas depuradoras están distribuidas en dos zonas geográficas: zona Mora de Rubielos y zona Alba del Campo (donde se encuentra ubicada la oficina central).</p>
DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA	<p>Uso de sistema de telecontrol avanzado mediante sondas de oxígeno y sondas redox para mejorar y optimizar el proceso de control. Al ser instalaciones separadas geográficamente con distancias elevadas, y que, además, no cuentan con personal permanente, el hecho de mejorar el control telemático de dichas instalaciones es una mejora necesaria, que ha aportado mejoras en diferentes aspectos, tanto económicos (optimización del gasto energético y del desplazamiento del personal), como técnicos (control en tiempo real de las instalaciones, así como acceso a gran cantidad de información muy necesaria para mejorar aún más los procesos de depuración y la gestión del mantenimiento de los diferentes equipos).</p> <p>La mejora planteada se basa en la implementación del funcionamiento de las instalaciones con sondas redox, además de las sondas de oxígeno existentes, y mejorando los lazos de comunicación entre ambas mediante la actualización de los diferentes SCADA (<i>Supervisory Control And Data Acquisition</i>). De este modo las opciones de funcionamiento de las plantas son muy diversas, en base a las necesidades estacionales y de proceso. Es posible, por tanto, trabajar con sondas de oxígeno, con sondas redox, con ambas a la vez y por tiempos de funcionamiento de soplantes. Esto, unido a la capacidad de control en remoto y al acceso en tiempo real a los datos y a la información de cada planta vía tableta o vía móvil, ha sido un gran avance para optimizar perfectamente el funcionamiento de cada una de estas instalaciones.</p> <p>Asimismo, el poder acceder en remoto a la situación real de cada planta permite conocer la planta en qué situación se encuentra la planta. Pudiendo tener información en todo momento del proceso y del funcionamiento de los equipos, algo esencial para poder llevar un correcto mantenimiento de la instalación.</p>
RETOS A LOS QUE HACE FRENTE ESTA TECNOLOGÍA	<p>El principal reto de esta tecnología es conseguir que las conexiones de datos sean regulares y rápidas. Dada la particular situación orográfica (disperso y con instalaciones muy separadas entre sí) y la falta de inversiones en tecnologías de comunicación adecuadas por toda la provincia.</p> <p>El objetivo de invertir en esta tecnología es cubrir las carencias ocasionadas por las distancias entre instalaciones y que no hay personal operándolo las 24 horas del día. Al existir un retén permanente, el contar con esta información en tiempo real de los posibles problemas existentes en las instalaciones optimiza coste, tiempo y recursos, puesto que permite valorar inmediatamente la necesidad o no de que el personal de reten se tenga que desplazar a la instalación problemática.</p>
DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS ESPERADOS	<p>Se han optimizado los costes por ahorro en energía eléctrica, combustible y horas en personal. La optimización de los procesos de gestión, operación y mantenimiento de las trece plantas han cumplido con las expectativas planteadas. Se han conseguido mejoras a la hora de optimizar los recursos, así como en términos económicos vinculados a la energía eléctrica, el consumo de combustible y los trabajos realizados fuera de la jornada ordinaria. En la Figura 19 se puede observar el ahorro en el consumo energético obtenido en la EDAR de Gea de Albarracín.</p>

<p>DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS (si es posible cuantifique los resultados)</p>	<p>Esta mejora del sistema de telecontrol se ha ido aplicando de manera progresiva en las 13 instalaciones de los municipios de Albarracín, Gea de Albarracín, Celadas, Villarquemado, Alba del Campo- Santa Eulalia (comparten depuradora), Bronchales, Orihuela del Tremedal, Villel, Alfambra, Cedrillas, Alcala de la Selva, Manzanera y Mora de Rubielos.</p>
<p>INFORMACIÓN ECONÓMICA DE LA SOLUCIÓN (ahorro de agua y de energía, coste €/m3 agua tratada)</p>	 <p>Figura 19. Disminución del consumo energético (kW/h) de la EDAR Gea de Albarracín</p>
<p>REQUERIMIENTOS PARA SU INSTALACIÓN (personales, instrumentales, económicos, etc.)</p>	<p>Al ser una concesión de un periodo de duración elevado, el periodo de amortización de esta inversión entra claramente dentro de los años de explotación que aún restan.</p>

MATERIAL GRÁFICO (Fotografías, gráficos de apoyo, etc.)

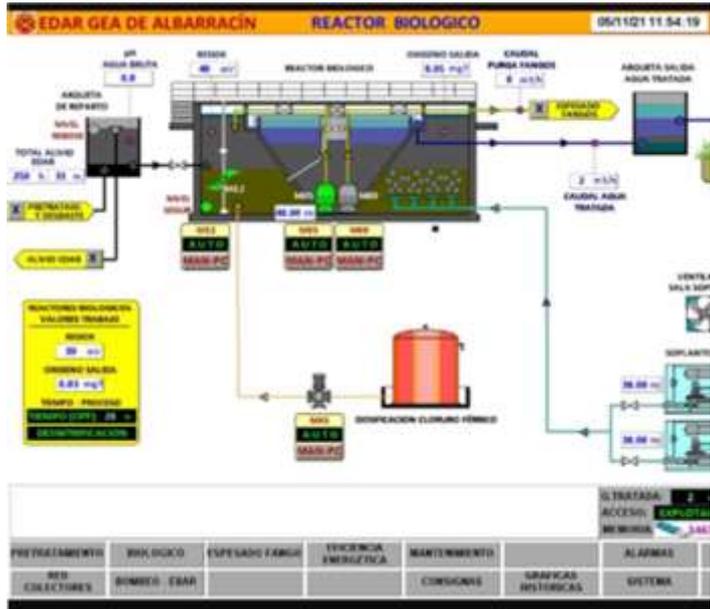


Figura 20. Captura de una de las pantallas del sistema de control.



Figura 21. Captura del sistema de control de las distintas redes de colectores.

DATOS DE CONTACTO PARA MÁS INFORMACIÓN (Dirección postal, web, correo electrónico, etc.)

Contacto: Antonio López Gómez. Jefe de Servicio Depurplan Zona 11 (FCC Aqualia)

Dirección: EDAR Alba del Campo-Santa Eulalia Ctra. Torrelacárcel-Alba del Campo, km 2, 44395, Alba del Campo (Teruel).

Teléfono: 629446501

Correo: antonioluis.lopez@fcc.es

NOMBRE de la solución tecnológica	AQUAMUNDAM
SECTOR DE APLICACIÓN (si se ha aplicado en un municipio, por favor, su nombre)	Saneamiento.
DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA	<p>AQUAMUNDAM se ha diseñado como un conjunto de herramientas para la gestión y explotación y una solución de depuración blanda. Se persigue así la digitalización del ciclo de aguas y la mejora de su sostenibilidad pequeños y medianos municipios.</p> <p>Las dos herramientas construidas son “diagnóstico” y “plataforma web”. La primera, evalúa el funcionamiento del servicio mediante indicadores, mientras que la segunda es una solución informática para analizar componentes de la infraestructura, datos monitorizados, tareas de mantenimiento, incidencias, etc. En mayor detalle:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Diagnóstico: conjunto de indicadores que, en base a parámetros de operación del servicio como volúmenes de agua tratada, kilómetros de tubería o consumo energético; permiten obtener una valoración del tipo “bueno”, “mediano”, “malo” junto al valor del cálculo. Su aplicación se fija en el rango temporal del año, por lo que registran la evolución, lo que sirve para fijar objetivos medibles y verificar su cumplimiento. • Plataforma web GIS e IoT: sistema informático basado en una aplicación web accesible desde un navegador con conexión a internet. Su componente GIS se centra en la representación de la infraestructura y sus elementos de mantenimiento e incidencias sobre un mapa, facilitando su análisis e interpretación. Por su parte, su módulo IoT extrae los datos de sensores de distintos fabricantes o fuentes externas. Finalmente, la plataforma contiene otras funcionalidades para el análisis visual de datos monitorizados e indicadores de funcionamiento a través de cuadros de mando y gráficos; alarmas, que disminuyen el tiempo de reacción ante imprevistos y modelado matemático para simular el funcionamiento de redes de saneamiento. <p>De manera complementaria a estas dos herramientas más centradas en la gestión, AQUAMUNDAM plantea soluciones para la propia infraestructura de tratamiento de aguas residuales en municipios pequeños y medianos. En concreto, se ha construido y estudiado un humedal artificial de flujo subsuperficial. Con una extensión aproximada de 100 m², está dividido en diez celdas con dos líneas en las que se plantan diferentes especies vegetales. Proporciona un tratamiento de tipo secundario que elimina la materia orgánica del agua residual al tiempo que mejora la biodiversidad en su área de implantación y contribuye a restaurar la masa de agua receptora.</p>

<p>RETOS A LOS QUE HACE FRENTE ESTA TECNOLOGÍA</p>	<p>Las herramientas y solución de depuración de AQUAMUNDAM dan respuesta a los siguientes retos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Diagnóstico: carencia de herramientas sencillas para evaluar de forma periódica el desempeño del servicio, su estado de conservación o su rendimiento económico-financiero sin recurrir a informes o estudios técnicos. • Plataforma web GIS e IoT: información sobre la infraestructura desagregada en distintos soportes de difícil actualización y consulta. Datos monitorizados cautivos de la tecnología del fabricante de los equipos, lo que dificulta su mantenimiento a largo plazo e interoperabilidad. <p>Por su parte, el humedal artificial busca facilitar la depuración en pequeños municipios con reducidos medios técnicos y económicos. Además, el uso de especies vegetales favorece la mejora de la biodiversidad en su zona de implantación y contribuye a la mejora del estado de la masa de agua receptora.</p>
<p>DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS ESPERADOS</p>	<p>AQUAMUNDAM formula los siguientes resultados esperados.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Diagnóstico: métricas para comparar el desempeño de la gestión con unos valores de referencia (benchmarking). Evaluar la mejora continua de aspectos hídrico-ambientales, infraestructuras, calidad de servicio, económico-financiero. • Plataforma web GIS e IoT: un único punto de información para el saneamiento, la depuración y también el abastecimiento. Gestión patrimonial de la infraestructura; explotación, mantenimiento y costes; modelado matemático con SWMM, monitorización IoT. <p>Por su parte, el humedal aspira, por un lado, a proporcionar tratamiento secundario a las aguas residuales de origen doméstico para una pequeña población (500 habitantes equivalentes). Por otro, ha de eliminar la materia orgánica del agua residual de origen doméstico. Finalmente, se diseña con dos líneas en paralelo de cinco celdas cada una, en una con la misma especie vegetal, mientras que, en la otra, con cuatro especies diferentes.</p>
<p>DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS (si es posible cuantifique los resultados)</p>	<p>La implantación y validación de las herramientas y la solución de depuración han servido para comprobar su adecuación en municipios y escenarios diversos. A nivel concreto:</p> <ul style="list-style-type: none"> • La herramienta de diagnóstico para el análisis comparativo está compuesta por 20 indicadores dedicados al saneamiento y la depuración que se ha aplicado en 12 municipios de España y Portugal de distinto tamaño (desde 307 hasta más de 140 000 habitantes). • La Plataforma web GIS e IoT ha sido implantada con éxito en cuatro municipios de España y Portugal con más de 1000 km de red de saneamiento y 59 000 pozos digitalizados. <p>El humedal artificial proporciona un tratamiento secundario adecuado con porcentajes de eliminación de materia orgánica entre 50-68% sin consumo energético y con un mantenimiento muy reducido (vigilancia y limpieza).</p>

<p>INFORMACIÓN ECONÓMICA DE LA SOLUCIÓN (ahorro de agua y de energía, coste €/m³ agua tratada)</p>	<p>La monitorización aplicada al ciclo del agua puede suponer ahorros comprendidos entre el 12 y el 30%, en función del nivel de partida y las inversiones de mejora asociadas. Además, en función del nivel de partida, el retorno de inversión se sitúa entre 9 y 18 meses.</p> <p>Tarifas de la plataforma web: consultar con el fabricante de la solución en agua@itg.es</p>
<p>REQUERIMIENTOS PARA SU INSTALACIÓN (personales, instrumentales, económicos, etc.)</p>	<p>Para la implantación de las dos herramientas descritas, se estiman necesarios los siguientes medios:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Herramienta de diagnóstico: personal técnico para procesar la información y registros sobre las características de la infraestructura y su funcionamiento (analíticas, averías, volúmenes tratados, consumos energéticos, etc.) • Plataforma web GIS e IoT: es necesario contar con PC con conexión a internet. Su implantación depende de la información existente y los medios tecnológicos del servicio (SCADA, dataloggers, etc.) <p>Por su parte, la construcción del humedal necesita un proyecto de obra civil que evalúe los requerimientos y lo dimensione según el caudal y la carga contaminante a tratar. Una vez ejecutado, su operación requiere la vigilancia y limpieza de la instalación para prevenir y solucionar posibles atascos. No es necesario personal especializado ni dedicado en exclusiva a estas labores.</p>

MATERIAL GRÁFICO (Fotografías, gráficos de apoyo, etc.)



Figura 22. Instantánea de AQUAMUNDAM.

DATOS DE CONTACTO PARA MÁS INFORMACIÓN (Dirección postal, web, correo electrónico, etc.)

Contacto: INSTITUTO TECNOLÓGICO DE GALICIA
Dirección: Cantón Grande, 9, PL315003, A Coruña
Teléfono: 981 173 206
Correo: agua@itg.es www.itg.es

SOLUCIONES ORIENTADAS A LA RECUPERACIÓN DE RECURSOS PARA LA AGRICULTURA

Al revalorizar las aguas de residuo se consigue un doble beneficio. Por un lado, se evita verter al medio sustancias potencialmente perniciosas y, por otro, permite obtener recursos valiosos que de otra forma se perderían.

Este beneficio económico y medioambiental se centra habitualmente en la recuperación de nitrógeno y fósforo, debido a su potencial como abono en agricultura y a que su vertido sin control causa eutrofización. De esta forma estos elementos se pueden usar como abono en las tierras de cultivo cercanas en estado sólido como hace CIRCRURAL 4.0 o en estado líquido (fertirrigación) como ocurre en RICHWATER.

NOMBRE de la solución tecnológica	CIRCRURAL4.0
SECTOR DE APLICACIÓN (si se ha aplicado en un municipio, por favor, su nombre)	Saneamiento
DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA	<p>La plataforma CircRural4.0 es una herramienta de análisis de datos alojada en la nube para plantas depuradoras de entornos rurales. Bajo el paradigma de economía circular, promueve la recuperación de recursos como el fósforo y el nitrógeno y contribuye a mejorar la eficiencia energética de estas infraestructuras y prolongar su vida útil.</p> <p>Para alcanzar estos objetivos, la herramienta permite:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Virtualizar la planta de depuración: catalogando sus componentes por etapa de tratamiento y proporcionando un soporte para registrar sus características, incidencias y tareas de mantenimiento. • Adquirir información operativa de la planta desde el SCADA y otras fuentes de datos (bases de datos SQL, FTP, API externas, etc.). Su diseño agiliza su obtención y se adapta a las tecnologías existentes. • Facilitar el análisis en tiempo real e histórico de la información operativa disponible. De manera visual, los cuadros de mando, sinópticos o gráficos son configurables a medida y se actualizan de forma automática al llegar nuevos datos. Adicionalmente, se incluyen dos módulos que registran la generación de subproductos (fangos, residuos sólidos, etc.) y la compra de fungibles para fomentar la valorización de residuos y el uso más eficiente de productos químicos en la depuración. • Dar soporte a la gestión del mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo de las plantas de depuración, al tiempo que compara el comportamiento y rendimiento de los procesos y plantas pertenecientes al sistema. <p>Con el fin de servir como herramienta unificada para todas las partes interesadas, la plataforma CircRural4.0:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cuenta con diferentes roles de usuario (administrador, medio, operario...) adecuados a los perfiles que participan en la administración y explotación de estas instalaciones. • Se ha diseñado como aplicación web, accesible desde el navegador y cuenta también con una app móvil para Android y iOS que lleva a campo de –manera optimizada– funciones como la consulta de datos monitorizados, el reporte de incidencias o la gestión de tareas de mantenimiento. <p>Este proyecto ha sido cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) en el marco del programa Interreg- V Sudoe (2014-2020).</p>
RETOS A LOS QUE HACE FRENTE ESTA TECNOLOGÍA	<p>La plataforma CircRural4.0 simplifica el análisis de datos de los procesos de depuración y para ello da respuesta a desafíos como:</p> <p>Interoperabilidad: integrando la información de distintos orígenes como SCADA, FTP y bases de datos, adaptándose a las tecnologías instaladas.</p> <p>Dificultad de acceso a la información: poniendo de manera cómoda a disposición de todo el personal implicado, desde operarios hasta directivos, la información recopilada de los equipos instalados y generada a través de la herramienta.</p> <p>Toma de decisiones guiada por los datos: para una explotación más eficiente y contribuir a reducir y reaprovechar los subproductos generados.</p>

<p>DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS ESPERADOS</p>	<p>La plataforma CircRural4.0 se ha fijado como principal objetivo la conversión de datos brutos procedente de diferentes orígenes en información visual para una interpretación más sencilla que apoya a la toma de decisiones en la gestión de EDAR rurales.</p> <p>De manera más concreta esta meta se ha planteado a dos niveles: tecnológico, dotando de conectividad multiprotocolo e interoperable al sistema para hacer disponibles los datos existentes; y, ergonómico, implicando en la toma de requisitos a profesionales del sector y adaptando las interfaces web y móvil para reducir su tiempo de aprendizaje.</p>
<p>DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS (si es posible cuantifique los resultados)</p>	<p>La plataforma CircRural4.0 se ha implantado con éxito en dos EDAR que dan servicio a más de 5000 y 10 000 habitantes.</p> <p>En la primera, se monitorizan 107 variables con una granularidad de 30 minutos relativas a caudales de entrada, recirculación, cuenta horas, consumos energéticos, parámetros de calidad, etc.</p> <p>Por su parte, en la segunda, se monitorizan 23 variables con granularidad de 1 minuto relacionadas con el tratamiento biológico, los caudales de entrada y salida o la deshidratación de los fangos.</p>
<p>INFORMACIÓN ECONÓMICA DE LA SOLUCIÓN (ahorro de agua y de energía, coste €/m³ agua tratada)</p>	<p>La monitorización aplicada al ciclo del agua puede suponer ahorros comprendidos entre el 12 y el 30%, en función del nivel de partida y las inversiones de mejora asociadas. Además, en función del nivel de partida, el Retorno de Inversión se sitúa entre 9 y 18 meses.</p> <p>Tarifas de la plataforma web: consultar con el fabricante de la solución en agua@itg.es</p>
<p>REQUERIMIENTOS PARA SU INSTALACIÓN (personales, instrumentales, económicos, etc.)</p>	<p>Para la implantación de CircRural4.0 es necesario establecer el modo de transferencia de información desde los sistemas de control y adquisición de datos de la EDAR hacia la plataforma.</p> <p>Su uso solo requiere un PC con conexión a internet.</p>
<p>MATERIAL GRÁFICO (fotografías, gráficos de apoyo, etc.)</p>	<div data-bbox="619 1155 1361 1469" data-label="Figure"> <p>ANALÍTICAS</p> <p>Figure 23 displays a grid of 18 line charts under the heading 'ANALÍTICAS'. The charts are arranged in three rows and six columns. The first row includes: pH entrada, pH salida, Conductividad entrada, Conductividad salida, Amoníaco entrada, and Nitrito salida. The second row includes: COD entrada, COD salida, Fósforo total entrada, Fósforo total salida, Nitrogeno total entrada, and Nitrogeno total salida. The third row includes: SS entrada, SS salida, Hierro entrada, and Turbidez salida. Each chart shows data points over time with a trend line.</p> </div> <p>Figure 23. Analíticas de distintos parámetros del vertido a la entrada y salida.</p> <div data-bbox="659 1563 1310 1977" data-label="Image"> <p>Figure 24 shows a mobile application interface. On the left is a navigation menu with options like 'Home', 'Dashboard', 'Monitoring', 'Operational & Performance', 'Alerts', 'Events', 'Incidents', 'Locations', 'Monitoring', 'Dashboards', 'Assets', and 'Chart engine'. The main content area is titled 'Dashboard' and features several widgets: 'Credit meter' showing 26.70 units, 'Credit meter that should be' showing 12.56 units, and a 'Eficacia sensoral credit' chart. On the right, a 'WWTP' overview card shows an aerial view of a wastewater treatment plant and a list of metrics: 'Triggered alerts: 0', 'Pending incidents: 13', 'Scheduled tasks: 47', and 'Installed components: 19'.</p> </div> <p>Figure 24. Interfaz de la aplicación.</p>

DATOS DE CONTACTO PARA MÁS
INFORMACIÓN (Dirección postal,
web, correo electrónico, etc.)

Contacto: INSTITUTO TECNOLÓGICO DE GALICIA

Dirección: Cantón Grande, 9, PL315003, A Coruña

Teléfono: 981 173 206

Correo: agua@itg.es www.itg.es

Nombre de la solución tecnológica	RichWater, tecnología de tratamiento y reutilización de aguas residuales para riego agrícola.
Sector de aplicación (si se ha aplicado en un municipio, por favor, su nombre)	Sector agrícola (agricultura periurbana). Solución tecnológica aplicada en el municipio de Algarrobo (Málaga)
DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA	<p>La tecnología innovadora RichWater combina el tratamiento y regeneración eficiente del agua residual mediante un Biorreactor de Membrana (MBR), con una estación de mezcla para obtener la combinación óptima de agua y nutrientes, y un sistema de control y monitorización con diferentes sensores en la línea de agua, planta y suelo.</p> <p>Este sistema integrado permite ofrecer una fuente fiable de agua libre de patógenos de acuerdo con los requerimientos del Real Decreto 1620/2007 y responder a la demanda de riego y fertilización de cada tipo de planta y suelo. El Biorreactor de Membrana (MBR) empleado en RichWater es un sistema de bajo consumo energético diseñado para el módulo de tratamiento de aguas residuales de manera que se optimiza la cantidad de nutrientes en el efluente (nitrógeno, fósforo y potasio principalmente), mientras que los patógenos son eliminados. La estación de mezcla proporciona la combinación adecuada de agua y agua tratada proveniente del MBR, el cual es se transfiere al módulo de fertirriego (riego por goteo). El nivel adecuado de mezcla es determinado a través de la monitorización del contenido a través de sensores. La unidad de control ajusta la mezcla nutritiva dosificando la cantidad justa de fertilizantes que demandan los cultivos.</p>
RETOS A LOS QUE HACE FRENTE ESTA TECNOLOGÍA	<p>El enfoque de RichWater permite optimizar el uso de agua y fertilizantes en la agricultura, presentándose como una solución clave de adaptación frente al cambio climático y la escasez de agua.</p> <p>Así, el uso del agua regenerada contribuye a la soberanía hídrica de agricultores en zonas afectadas por la escasez de agua y sequías frecuentes ya que supone un aporte constante de agua. La combinación del uso de aguas regeneradas con recursos hídricos convencionales puede evitar cortes de suministro y las consecuentes pérdidas de producción. Implica por tanto una reducción en la demanda y presión hídrica sobre otras fuentes de agua potable que podrán destinarse a otros usos prioritarios, como el turismo o la industria.</p> <p>El sistema RichWater permite la recuperación de nutrientes, disminuyendo el riesgo de sufrir problemas medioambientales (p.ej. eutrofización) por exceso de nutrientes en los cuerpos de agua que reciban las aguas residuales. Estos nutrientes pueden ser directamente asimilables por las plantas, lo que conlleva un ahorro de fertilizantes químicos y un consecuente ahorro económico para agricultores y comunidades de regantes. Esto supone, además, una menor huella de carbono ya que se evitan emisiones de CO₂ por la producción, embalaje y transporte de fertilizantes.</p> <p>De esta manera, RichWater contribuye a alcanzar el Objetivo de Desarrollo Sostenible 13: Acción por el clima, ya que el uso de agua regenerada fortalece la resiliencia y capacidad de adaptación del sector agrícola a los riesgos asociados al cambio climático (p.ej. escasez de agua, degradación de suelos, etc.). El uso de esta tecnología va ligado también al ODS 6: Agua limpia y saneamiento, ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles, ODS 12: Producción y consumo responsables y ODS 17: Alianzas para lograr los objetivos.</p>
DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS ESPERADOS	Obtener un sistema capaz de reutilizar el agua en el fertirriego, eliminando patógenos y optimizando la cantidad de nutrientes en el efluente.

<p>DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS (si es posible cuantifique los resultados)</p>	<p>El agua residual tratada en RichWater proviene de la EDAR de Algarrobo, que recoge las aguas de la ciudad. La tasa de recuperación del agua residual para uso agrícola es de casi 100% (los lodos generados no se han recuperado en este proyecto). Por tanto, este sistema es capaz de producir 150 m³/día de agua regenerada libre de patógenos (tasa de eliminación de E. Coli del 99%) y se obtienen tasas de recuperación muy altas para ciertos nutrientes (69% nitrógeno, 80% fósforo y 94% potasio) que son directamente asimilables por la planta mediante fertirriego.</p> <p>El sistema fue verificado dentro del programa de verificación medioambiental de la Comisión Europea, ETV (<i>Environmental Technology Verification</i>) y la norma ISO 14034:2016, por su carácter innovador y contribución a la economía verde. La marca comercial ha sido registrada en la Oficina de Propiedad Intelectual de la UE "EUIPO" (código de registro: 017894896).</p> <p>RichWater también ha sido seleccionado como uno de los 105 "Living Labs" orientados al agua y la investigación, cumpliendo con el criterio de evaluación de <i>Water Europe Living Labs</i> y fue incluido en el "Atlas of the European Water Oriented Living Labs".</p> <p>Asimismo, a raíz de las actividades llevadas a cabo en el proyecto RichWater, se ha creado un grupo de trabajo con agentes locales clave en la comarca de La Axarquía, dependientes de la Diputación de Málaga, que han mostrado un alto interés en la continuidad y replicabilidad del proyecto. Este compromiso se plasmó en la firma de un acuerdo de colaboración y la creación en 2018 del Grupo Operativo "Axarquía Sostenible", avalado por la Asociación Europea de Innovación (AEI) en materia de productividad y sostenibilidad agrícolas (en inglés, EIP-AGRI).</p>
<p>INFORMACIÓN ECONÓMICA DE LA SOLUCIÓN (ahorro de agua y de energía, coste €/m³ agua tratada)</p>	<p>RichWater se ha comparado económicamente con otras alternativas disponibles en el mercado (p. ej., desalación por ósmosis inversa, transporte de agua en camión y una EDAR convencional como SBR + desinfección). Así, este sistema proporciona un precio muy competitivo por m³ de agua producida (0,31 €/m³), incluso más bajo que otras tecnologías debido a los beneficios involucrados (por ejemplo, fertilizantes y ahorro de agua). En este sentido, el uso de esta agua regenerada supone un ahorro en fertilizantes de 0,12 €/m³.</p>
<p>REQUERIMIENTOS PARA SU INSTALACIÓN (personales, instrumentales, económicos, etc.)</p>	<p>El sistema RichWater ocupa una superficie de 130 m² para una planta de tratamiento de 150 m³/día. Utiliza unas membranas de ultrafiltración de tamaño de poro de 0,04 µm con una presión trans-membrana de 0,10 bar. RichWater requiere de personal cualificado para su operación, pero su alto grado de automatización hace que el operario no necesite dedicación exclusiva y la operación puede subcontratarse al proveedor de la tecnología. El sistema de RichWater es modular, por tanto, sus diversos componentes pueden adquirirse de forma separada a un coste aproximado de: MBR (100 000 €), Estación de mezcla (12 000 €), sistema adaptado de riego (7500 €).</p>

MATERIAL GRÁFICO (fotografías, gráficos de apoyo, etc.)



Figura 25. Planta de RichWater compuesta por un sistema combinado de tratamiento y reutilización de aguas residuales (Algarrobo, Málaga).

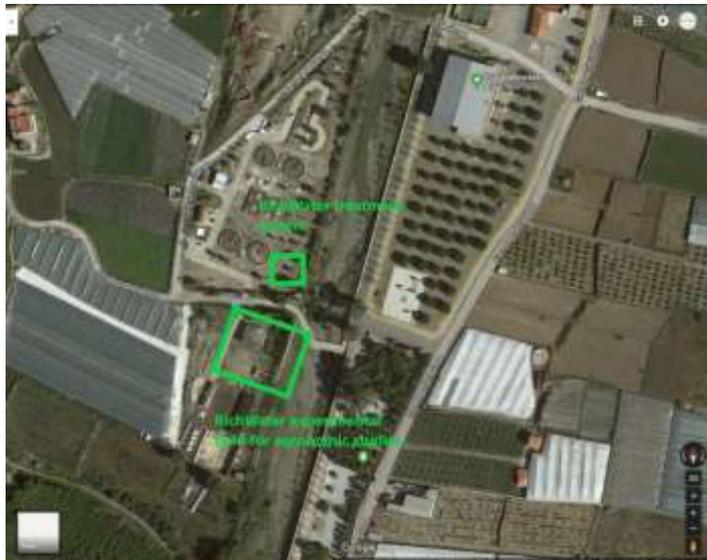


Figura 26. Vista de satélite del área experimental seleccionado para el sistema RichWater y para los estudios agronómicos situados en el municipio de Algarrobo (Málaga).



Figura 27. Cultivos de aguacate y mango regados con agua regenerada procedente de la planta de RichWater (Algarrobo, Málaga).

DATOS DE CONTACTO PARA MÁS
INFORMACIÓN (dirección postal,
web, correo electrónico, etc.)

Contacto: Antonia Lorenzo López. Socia fundadora, CEO y Responsable de I+D e Innovación

Correo: alorenzo@bioazul.com

Teléfono: +34 951 047 290

Dirección: Avda. Manuel Agustín Heredia nº18 1º4, 29001 Málaga (España)

Página web: <https://richwater.eu/> y <https://www.bioazul.com/>



Recomendaciones para los pequeños municipios

Piensa en grande, actúa en pequeño.

—Jason Jennings—

Recomendaciones para los pequeños municipios

La participación pública se ha revelado como un mecanismo imprescindible en la construcción de las políticas más eficaces relacionadas con la planificación hidrológica. Gracias a ella se disminuye la vulnerabilidad, hay menos conflictividad y se consiguen mejores resultados. La colaboración y el diálogo son fundamentales, eliminando las barreras entre lo urbano y lo rural.

Con el agua hay mucho trabajo pendiente por hacer, ya que el servicio de abastecimiento y saneamiento del agua es el gran desconocido en la ciudad. Un mejor conocimiento de esta situación ayudaría a que se aceptase la necesaria adecuación de tarifas. Uno de los objetivos de este informe es conseguir esta concienciación social.

Un mejor conocimiento de la situación de la depuración ayudaría a que se acepte la necesaria adecuación de las tarifas. Uno de los objetivos de este informe es conseguir esta concienciación social.

Además de la mejora de las infraestructuras es importante disminuir la carga contaminante de los vertidos. En esta línea hay que sensibilizar a los habitantes acerca del papel central que tienen en este tema y que puede llegar a suponer un auténtico alivio para la EDAR local.

Uno de los focos donde se produce mayor carga contaminante en las casas es la cocina. Además de los nombrados vertidos de aceite, el uso de detergentes en dosis demasiado elevadas favorece la eutrofización Figura 11 al contener fósforo y afecta a la vida acuática por distintas vías. Por este motivo, ya que su utilización es inevitable, se recomienda utilizar detergentes de menor agresividad medioambiental, sin fosfatos y biodegradables con mayor rapidez.

Otros de los grandes contaminantes que se producen en la cocina son las grasas utilizadas para el cocinado y los desperdicios que, a veces, son tirados al desagüe. En el caso de residuos sólidos, deben tirarse al contenedor orgánico, ya que pueden producir obstrucciones en el sistema de tuberías tanto del hogar como del municipio. Por otro lado, los aceites y grasas son productos muy contaminantes para el medio ambiente (1 litro de aceite contamina 40 000 litros de agua) por lo que no deben ser tirados por el desagüe. En su lugar, deben guardarse en recipientes para posteriormente llevarlos a los puntos de recogida facilitados en cada municipio. La presencia de grasas en las aguas residuales provoca problemas en los sistemas de saneamiento donde producen incrustaciones en las tuberías y en las depuradoras donde pueden ocasionar ineficiencias en el tratamiento.

Una información más detallada puede encontrarse en la guía elaborada por La Red Española de Ciudades por el Clima en su sección de la Federación Española de Municipios y Provincias. En esta guía se clasifican

las medidas en función del tamaño y actividad del municipio, dando de esta manera medidas personalizadas para la reutilización de agua. Entre estas recomendaciones destacan la recogida de aguas pluviales para la reutilización y el riego con agua de lluvia o agua reciclada [88].

Reutilización de agua en los municipios

Como se ha ido viendo a lo largo de este informe, la depuración de las aguas en las zonas rurales se enfrenta a la falta de personal especializado y a la escasez de fondos. Aunque a día de hoy existen tecnologías que responden a estas necesidades, estas deben complementarse con acciones que minimicen las necesidades de depuración como las comentadas al inicio de la sección.

En la Figura 7 se ha mostrado que algunas de las zonas más despobladas de España coinciden con las zonas más áridas. Es por esto que son especialmente útiles las estrategias de reutilización, requiriendo para ello un tratamiento terciario. La implantación de estas tecnologías no siempre es posible, por lo que debe complementarse con las medidas que se indican a continuación. Estas medidas consiguen disminuir el caudal de agua que llega a la depuradora y reducir el uso de sustancias como los detergentes que necesitan de una depuración.

Sistemas de recogida de aguas de lluvia

La recuperación de aguas pluviales consiste en utilizar las cubiertas de los edificios como captadores de agua de lluvia. Posteriormente, el agua recogida se transmite a través de canalones a un depósito de almacenamiento, que puede ser subterráneo o no [89]. Es importante destacar que los materiales empleados deben garantizar la salubridad del agua de lluvia que se está recogiendo.

En la entrada de dicho depósito se debe colocar un filtro que garantice que las partículas no deseadas no entren al depósito de almacenamiento. Dicho depósito debe dimensionarse y adaptarse al uso que se vaya a hacer de esa agua, el espacio disponible y la pluviometría de la zona. El agua almacenada se impulsa y se distribuye a través de un circuito hidráulico independiente de la red de agua potable, para garantizar que aguas de distintas calidades no se mezclen.

Este tipo de aguas se pueden utilizar para aquellos usos que no requieren cumplir los requisitos de calidad del agua de uso humano: lavadora, cisterna del inodoro, lavado de suelos, riego de plantas (que no utilicen sistemas de aspersión), etc. Además del ahorro de agua que suponen este tipo de sistemas, al tratarse de un agua con menos concentración de carbonatos (más blanda), permite el ahorro de hasta un 50% del detergente utilizado en la lavadora.

Sistemas de reutilización de aguas grises

Las aguas grises se generan en el entorno doméstico en lavadoras, lavado de platos, lavabos o ducha, suponiendo entre el 50-80% de las aguas residuales residenciales [90]. Se diferencian de las aguas negras, en que éstas no contienen materia orgánica de origen humano.

Si se utiliza un sistema separativo de recolección de aguas residuales en el hogar, las aguas grises domésticas pueden ser tratadas y reutilizadas en el propio domicilio. De esta manera, se puede disminuir el uso del agua potable del 16% al 40%, dependiendo del diseño del sistema, utilizando esta agua proveniente de lavabos, ducha y cocina, para otros usos de agua en el hogar que no requieran alcanzar los niveles de calidad aptos para el uso humano. De esta forma, las aguas grises se podrían utilizar para

lavar la ropa, la cisterna del inodoro o riego del jardín (si no se utiliza riesgo por aspersión o si dicho riego se realiza por la noche sin acceso de personas).

En cuanto al tratamiento requerido para la reutilización de las aguas grises generadas en el hogar, existen diferentes posibilidades: físicos, físico-químicos y biológicos, pudiéndose incluso reutilizar de manera directa, sin tratamiento previo y con ausencia o mínimo almacenaje, ya que el almacenaje máximo recomendado de estas aguas grises es de 24 horas. La selección del tratamiento depende de las características del agua gris utilizada y del uso posterior que se vaya a hacer de estas aguas [91].

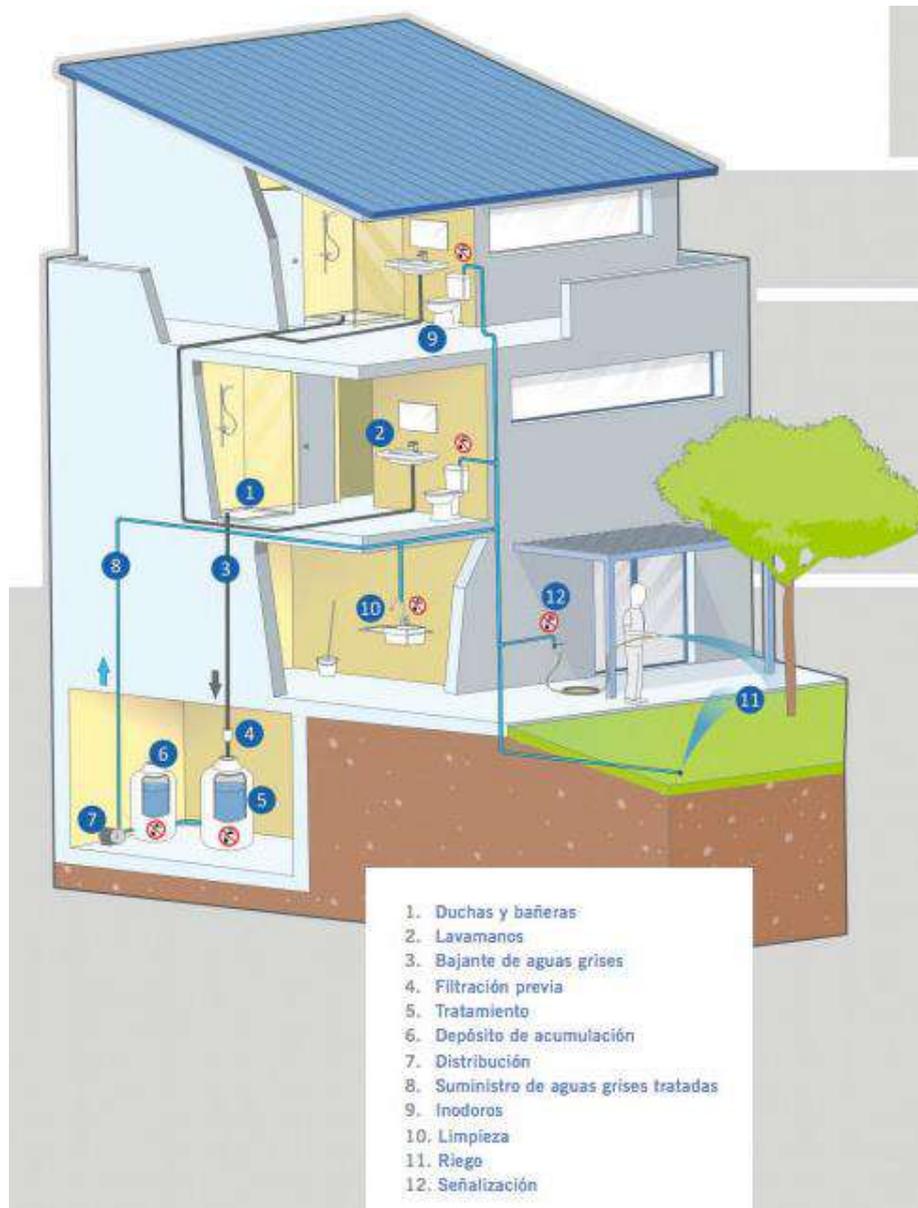


Figura 28. Sistema reutilización aguas grises [92].

Gestión holística y circular para ahorrar agua y energía

La gestión del agua debe tener una visión holística de modo que las plantas de tratamientos de agua revaloricen los residuos a la vez que devuelven el agua al medio. Además, de este modo se cerraría también el ciclo del fósforo y del nitrógeno empleándose como abono, por no hablar del resto de usos que se han descrito en el apartado de las EDAR.

Desarrollar medidas específicas para hacer frente a los contaminantes emergentes

Si se busca reutilizar el agua residual es necesario tener en cuenta la problemática causada por los contaminantes emergentes que se han visto anteriormente. Debido a su impacto en el medio y a su capacidad de ocasionar alteraciones endocrinas, es necesario desarrollar nuevos métodos y tecnologías de degradación.

Digitalización para el uso eficiente del agua y la energía

La digitalización es un pilar básico para lograr una transparencia total acerca de la calidad y volumen del agua. Su implantación permite seguimiento estricto del cumplimiento normativo, una penalización más rápida en caso de incumplimiento y una optimización del uso de la infraestructura para maximizar la resiliencia. Por ejemplo, un gran demandante de agua como es la agricultura podría avisar a las EDAR para que les proporcionara información de la cantidad de nitrógeno y fósforo en el agua empleada en fertirriego [91].

Hay que tener en cuenta que ninguna EDAR funciona correctamente si no está diseñada, construida y explotada adecuadamente. De nada vale hacer una nueva EDAR si no se garantiza su mantenimiento y correcta operación [93]. Por ello, es necesario:

1. **Realizar estudios previos rigurosos.** Durante los estudios previos a la construcción de la EDAR o de la instalación de la tecnología de depuración, es necesario asegurar un correcto diseño de las instalaciones de tratamiento. Para ello, es necesario conocer cuál es la composición de las aguas residuales, el volumen de caudal actual, el crecimiento de este volumen que ocurrirá durante la vida útil de la planta de tratamiento, la disponibilidad de tener a personal operándolo y los costes de mantenimiento.
2. **Separar las tuberías fecales de las tuberías pluviales.** Al separar ambos conductos, se produce un alivio en las estaciones depuradoras en época de lluvias. Además, el agua de lluvias puede reconducirse para usarse en la recarga de acuíferos.
3. **Personalizar la solución de depuración.** En depuración no se puede optar por soluciones estandarizadas, debiendo estudiar las necesidades específicas de cada zona y adaptarse a sus características. De esta forma se evitarán problemas de crecimientos estacionales de la población no prevista, vertidos industriales a la red de alcantarillado no detectados previamente, proximidad a zonas habitadas, etc. Como regla general, las EDAR se deben dimensionar con vistas a los años siguientes 20-25 años.
4. **Realizar muestreos en continuo.** A la hora de muestrear los vertidos en zonas rurales es necesario tener en cuenta que un muestreo puntual no es representativo del caudal. Las tecnologías que se apliquen en este rango poblacional deben ser capaces de absorber las fluctuaciones.
5. **Asegurar el buen estado de la red de saneamiento.** De nada sirve implantar una tecnología de tratamiento si las aguas residuales que debe tratar se pierden por el camino por el deficiente estado de la red de saneamiento.
6. **Controlar los parámetros de la EDAR en continuo.** Para el control de las estaciones de tratamiento la medición de caudales en continuo es imprescindible. A este respecto, la orden ARM/1312/2009, de 20 de mayo, por la que se regulan los sistemas de medición y control de los vertidos al dominio público hidráulico, obliga a instalar a la salida de las estaciones depuradoras un sistema de medida de los caudales de las aguas tratadas.
7. **Asegurar el correcto mantenimiento de la EDAR.** Las EDAR de pequeño tamaño deben diseñarse, construirse y explotarse con el mismo rigor que las de mayor tamaño. Ante la menor disponibilidad de fondos, muchos municipios descuidan el mantenimiento de sus estaciones depuradoras.
8. **Diseñar de forma rigurosa la EDAR.** El diseño y la construcción deben ser muy rigurosos, aunque su explotación y mantenimiento sean simples. Si tomamos como ejemplo el caso de los humedales artificiales, sus labores de mantenimiento se limitan prácticamente a la poda anual de la biomasa seca. Esta simplicidad de manejo no es sinónimo de diseños y construcciones al alcance de cualquiera. Un humedal artificial es un ecosistema complejo, en el que se desarrollan procesos

físicos, químicos y biológicos entrelazados entre sí. Por esto, requieren de un diseño riguroso si se quieren alcanzar los objetivos de depuración previstos.

9. **Reservar una partida monetaria para el mantenimiento y explotación.** Todas las instalaciones tienen necesidades de operación y mantenimiento. Aunque es posible disminuir sus necesidades y tener a personal operándolo en remoto, siempre será necesario tenerlos en cuenta.
10. **Gestionar de forma adecuada los residuos.** En los tratamientos basados en lechos bacterianos es necesario gestionar los lodos, ya que una incorrecta gestión de estos subproductos, condena al fracaso a las instalaciones de tratamiento.



▶ Entrevistas

Entrevistas

A lo largo de este informe se ha visto el estado de la depuración en los medios rurales, dedicando una sección entera a las posibles soluciones tecnológicas que proponen algunas empresas punteras en esta área. Con el objetivo de conseguir una visión holística, se ha decidido incluir la opinión de centros tecnológicos y de las administraciones públicas.

Como representante de un centro tecnológico se ha entrevistado a Juan José Salas, Director de Servicios Tecnológicos de la Fundación Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua (CENTA). La Fundación ocupa, en la actualidad, un papel destacado en el sector agua, promoviendo una mejor gestión de los recursos. CENTA forma parte del amplio listado de Agentes del Conocimiento de la Sociedad Andaluza, al ser Centro de Investigación, plataforma de transferencia de tecnologías y agente dinamizador de la sociedad.

Por el lado de las administraciones públicas, se ha elegido entrevistar a Dolores Fornals, Directora del Instituto Aragonés del Agua (IAA). El IAA es una entidad de derecho público que tiene la función de ejercer las competencias de la Comunidad Autónoma de Aragón en materia de aguas. Algunas de sus áreas de actividad más importantes son: 1) La construcción de infraestructuras de abastecimiento; 2) La ejecución de obras de saneamiento y depuración; 3) La explotación de estaciones depuradoras de aguas residuales; 4) La gestión del Impuesto sobre la Contaminación de las Aguas (ICA); 5) La ejecución de proyectos de Interés General, mediante encomienda del Estado a la Comunidad Autónoma; 6) El funcionamiento de la Comisión del Agua de Aragón y, 7) La divulgación, sensibilización y promoción del uso eficiente del agua.

JUAN JOSÉ SALAS. FUNDACIÓN CENTRO DE LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS DEL AGUA

José Salas es doctor en Química por la Universidad de Sevilla y con formación en ingeniería industrial, gestión medioambiental y tratamiento de grasas. Durante sus 32 años de experiencia en el tratamiento de aguas residuales, se ha especializado en la depuración de los vertidos generados en pequeñas aglomeraciones urbanas, habiendo publicado varios manuales sobre esta materia.

En la actualidad trabaja como Coordinador del Área de Tecnologías del Agua, de la Fundación Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua (CENTA) y participa como investigador principal en varios proyectos. Además, es docente en los Cursos organizados por el CEDEX sobre Tratamiento de Aguas Residuales y Explotación de Estaciones Depuradoras, en el máster en Gestión Integral del Agua de la Universidad de Cádiz, en el máster universitario de Hidrología y Gestión de Recursos Hídricos de las Universidades de

Alcalá de Henares, en el curso de Postgrado en Gestión del Ciclo Integral del Agua de la Universidad de Extremadura y en el Programa de Formación Iberoamericano en Materia de Aguas.

Entrevista

¿Cuál es el principal reto de la depuración en los pequeños municipios en España?

Cuando hablamos del tratamiento de las aguas residuales a pequeña escala, es preciso recalcar dos conceptos, en consonancia con la Directiva 91/271/CEE, y que a veces no se tienen en consideración:

- No hablamos de poblaciones, sino de aglomeraciones urbanas, entendiendo por aglomeración urbana: “la zona cuya población y/o actividades económicas presenten concentración suficiente para la recogida y conducción de las aguas residuales urbanas a una instalación de tratamiento de dichas aguas, o a un punto de vertido final”.
- No se contabiliza la población a tratar en función del número de sus habitantes, sino de sus habitantes equivalentes, lo que permite considerar la carga industrial biodegradable que entra en la estación de tratamiento.

Sentadas estas premisas, se había consensuado considerar como pequeñas aglomeraciones urbanas a las que cuentan con menos de 2000 habitantes equivalentes, para las que la mencionada directiva exige que se aplique a sus aguas residuales un “tratamiento adecuado”. Pero en el reciente Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia se ha incrementado este límite hasta los 5000 habitantes equivalentes.

El principal reto de la depuración de las aguas residuales generadas en estas pequeñas aglomeraciones urbanas radica en su gran número y su elevado grado de dispersión. A este respecto dos ejemplos ilustrativos:

- El Plan de Saneamiento de Galicia recoge la existencia de 1388 aglomeraciones urbanas, de las que el 92% son menores de 2000 habitantes.
- En un entorno totalmente diferente, en la isla de Tenerife el 84% de sus 401 aglomeraciones urbanas cuenta con menos de 2000 habitantes equivalentes.

En el “Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones (CEDEX, CENTA, 2010)”, se estimó en más de 6000 las pequeñas aglomeraciones urbanas que en esa fecha que no trataban sus aguas residuales. Hoy en día, pienso que probablemente nos quedamos cortos con esa cifra.

Podemos pues concluir, que la depuración en las pequeñas aglomeraciones urbanas de nuestro país continúa siendo una ASIGNATURA PENDIENTE.

¿Cómo se debería invertir este dinero para resolver los retos de la depuración en estos municipios?

Siendo muy cuidadosos para evitar los múltiples errores del pasado, que se han traducido en un gran número de depuradoras que no operan correctamente en este segmento poblacional. La mayoría de estos errores tienen su origen en no abordar la depuración a pequeña escala con el mismo rigor que se emplea en el caso de las aglomeraciones de mayor tamaño.

¿Qué ocurre con los municipios de menos de 2000 habitantes? ¿Qué soluciones se pueden aplicar? ¿Hay que reclamar fondos para una segunda fase?

El tratamiento de las aguas residuales que se generan en las pequeñas aglomeraciones urbanas presenta una serie de condicionantes, tanto de carácter técnico (fuertes oscilaciones diarias y estacionales de los caudales y cargas a tratar), como económico (al no beneficiarse de las ventajas de la economía de escala), que hacen necesaria la implementación de soluciones de tratamiento específicas que se adapten a estos condicionantes.

En la actualidad disponemos de un amplio abanico de tecnologías de depuración para afrontar de forma específica el tratamiento de las aguas residuales que se generan en las pequeñas aglomeraciones urbanas.

En este abanico se cuenta tanto con tecnologías de carácter intensivo (aireaciones prolongadas, reactores MBBR y SBR, filtros percoladores, contactores biológicos rotativos), como extensivo (especialmente humedales artificiales), comenzándose a trabajar en la hibridación de ambos tipos de tecnologías, a la búsqueda de sinergias, lo que ha dado lugar al nuevo concepto de las tecnologías INTEXT.

Dado el gran número de actuaciones de depuración pendientes en este segmento poblacional, estimo que será necesario el aporte de más fondos, en una segunda fase del Plan.

Las EDAR pueden convertirse en biofactorías. ¿Qué medidas deben impulsarse para fomentar la creación de estas biofactorías?

El concepto de biofactoría aplicado a las pequeñas depuradoras se traduce, fundamentalmente, en la reutilización en el entorno de estas EDAR de las aguas tratadas y de los lodos generados, cumpliendo, por supuesto, con las normativas existentes al respecto, y en la recuperación de los nutrientes presentes en las aguas residuales.

¿Cómo afectan los nuevos contaminantes a los pequeños municipios?

Dado que estos contaminantes, conocidos en la actualidad como contaminantes de preocupación emergente, provienen principalmente del uso de productos de cuidado y de higiene personal y del consumo de fármacos, se hallan también presentes en las aguas residuales que se generan en las pequeñas aglomeraciones urbanas.

¿Qué papel juega la digitalización en los sistemas de saneamiento? ¿Tiene cabida para los sistemas utilizados en pequeños municipios?

Por supuesto que sí, especialmente en lo que hace referencia al telecontrol de los sistemas de tratamiento de estos municipios, lo que redundará en un importante ahorro de los costes de operación (especialmente costes de personal y de desplazamiento), dada la dispersión de estos sistemas.

¿Puede señalar ejemplos y buenas prácticas en sistemas de tratamientos de aguas residuales que se hayan aplicado en los municipios pequeños en España?

A este respecto destacaré tres ejemplos:

- La labor que durante más de 30 años viene realizando la Planta Experimental de Carrión de los Céspedes (Sevilla), gestionada por la Fundación Pública Andaluza CENTA, enfocada a la investigación y desarrollo de tratamientos específicos para la depuración de las aguas residuales

de las pequeñas aglomeraciones. Entre ellos el nuevo concepto de las tecnologías INTEXT. <https://www.youtube.com/watch?v=SqDTQ3vcAlc>

- La Plataforma Tecnológica que se va a inaugurar en breve en la EDAR de Talavera de la Reina (Toledo), construida al amparo del proyecto LIFE INTEXT, y en la que se desarrollarán tecnologías híbridas para la depuración de las aguas y la recuperación de nutrientes en pequeñas aglomeraciones urbanas. <https://life-intext.eu/>
- El Plan DEPURACIÓN, que ha puesto en marcha la Diputación de Badajoz, para el tratamiento de las aguas de 74 aglomeraciones menores de 1000 habitantes equivalentes.

¿Qué recomendaría a los responsables políticos y administrativos para acelerar la aplicación de soluciones al tratamiento de aguas residuales en pequeños municipios?

Una buena definición de sus aglomeraciones urbanas, dado que ello es una herramienta básica a la hora de la planificación del saneamiento y depuración, y no todas las Comunidades Autónomas cuentan en la actualidad con esta definición; un buen estudio de alternativas, que contemple todas las posibles tecnologías de tratamiento, que se han comentado con anterioridad; trabajar con empresas expertas en estas tecnologías, y: MUCHA RIGUROSIDAD.

DOLORES FORNALS. INSTITUTO ARAGONÉS DEL AGUA

Dolores Fornals es licenciada en Derecho y funcionaria de la administración autonómica donde ha desempeñado diversos cargos, dirigiendo actualmente el Instituto Aragonés del Agua. Dolores ha sido jefa de la Gerencia de Infraestructuras y Equipamiento del Departamento de Educación, Universidad, Cultura y Deporte. También ha sido vocal de la Junta Consultiva de Contratación Administrativa desde 2006. Entre 2007 y 2011, fue jefa de Servicio de Personal, Régimen Económico y de Contratación del Departamento de Presidencia. Anteriormente ocupó el mismo cargo en el área de Obras Públicas, Urbanismo y Transportes.

Entrevista

¿Cuál es el principal reto de la depuración en los pequeños municipios en España?

El Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia va a destinar 150 millones de € al plan de saneamiento y depuración para pequeñas aglomeraciones urbanas. La primera fase (100 M€) tiene por objetivo llevar a cabo inversiones en saneamiento y depuración en aglomeraciones urbanas comprendidas entre los 2000 y 5000 habitantes equivalentes, que no cumplan con los requisitos establecidos en la Directiva 91/271/CEE sobre tratamiento de aguas residuales urbanas, y por tanto que se encuentren en procedimientos de infracción o no conformes con la Directiva, y que no estén declaradas de interés general del Estado.

En el contexto de la dispersión demográfica del territorio aragonés, de 2000 a 5000 habitantes equivalentes ya son infraestructuras de relevante tamaño. El reto principal está en que hacer en esta materia por debajo de los 1000 habitantes equivalentes. En Aragón ya están en funcionamiento la inmensa mayoría de las depuradoras por encima de 2.000 habitantes equivalentes, e incluso por encima de 1000.

Nosotros somos partidarios de que se defina normativamente el concepto de tratamiento adecuado para estos núcleos, dado que el hecho de que no esté establecido en la normativa general genera una gran inseguridad jurídica e incluso cierta discrecionalidad técnica en las autorizaciones de vertido. En Aragón tenemos 1357 entidades de población con menos de 500 habitantes, de las cuales 972 tienen menos de 100 habitantes.

El gran reto está en construir las infraestructuras necesarias, en su adecuada dimensión, que las haga sostenibles tanto medioambiental, como financieramente en su explotación posterior.

En cuanto al proceso, desde el IAA nos ocupamos de gestionar la construcción de depuradoras 1000 habitantes equivalentes y, por debajo, tenemos un programa de convocatorias a los municipios.

De este modo, multiplicamos la capacidad de gestión.

En cuanto a la explotación, una gran parte de los municipios nos encomiendan la gestión de sus EDAR habida cuenta de la dificultad técnica y económica que supone dicha gestión en pequeños núcleos. En este momento gestionamos 234 EDAR en Aragón.

¿Cómo se debería invertir este dinero para resolver los retos de la depuración en estos municipios

Nos parece correcto el método de territorializar los Fondos MRR en la CCAA y priorización que se ha seguido, si bien la cuantía es muy escasa. En Aragón se han recibido únicamente 2,9 M€, cuando la inversión únicamente en el Pirineo se cuantifica en 100 M€.

Con la primera fase de los fondos del PRTR se van a llevar a cabo las depuradoras de Hecho-Siresa y de Canfranc Estación, ambas actualmente en construcción.

¿Qué ocurre con los municipios de menos de 2000 habitantes? ¿Qué soluciones se pueden aplicar? ¿Hay que reclamar fondos para una segunda fase?

Como ya se ha avanzado en el punto 1, el principal problema con los municipios de menos de 2000 habitantes equivalentes es la indefinición normativa del nivel de tratamiento exigible, que la directiva europea establece como “tratamiento adecuado” pero no da especificaciones técnicas concretas, como hace para el tratamiento secundario o para el tratamiento más riguroso. La normativa española debería cubrir esta laguna y completar la regulación definiendo los requisitos de calidad de vertido exigibles en estos casos.

Ante esta indefinición legal, la tendencia de los servicios técnicos de los organismos de cuenca —tanto en las oficinas de planificación al preparar los planes hidrológicos como en los servicios de control de vertidos a la hora de autorizar las depuradoras— es a exigir niveles de tratamiento secundario o más riguroso desde tamaños tan pequeños como 150 habitantes equivalentes, sin que esta exigencia se derive claramente de ningún requisito legal, sino de una mera discrecionalidad técnica.

Para las administraciones responsables de la depuración, esto produce una inseguridad que lleva a sobredimensionar las soluciones, a dificultar o imposibilitar los tratamientos extensivos o sencillos, a alargar los plazos por no autorizarse y tener que rediseñar proyectos razonablemente dimensionados y, siempre, a incrementar los costes.

Por otro lado, sería estupendo poder contar con más fondos para depuración.

Las EDAR pueden convertirse en biofactorías. ¿Qué medidas deben impulsarse para fomentar la creación de estas biofactorías?

La reutilización de los lodos de la depuración en el sector agrícola es de momento el único producto aprovechable que se obtiene en las depuradoras, a condición de que el aprovechamiento sea gratuito.

La obtención de otros productos a partir de los procesos biológicos de la depuración solamente puede considerarse en depuradoras de gran tamaño para que sea económicamente razonable y sostenible, por lo que esta consideración de las biofactorías estaría totalmente fuera del ámbito de las pequeñas depuradoras.

Para las pequeñas depuradoras, debe perseguirse la simplificación y la economía del tratamiento, no las complicaciones adicionales a lo estrictamente necesario.

¿Cómo afectan los nuevos contaminantes a los pequeños municipios?

La afección que puedan producir estos nuevos contaminantes en los pequeños municipios en general puede considerarse irrelevante en cuanto a sus efectos en el medio ambiente.

Hay que insistir en que en las pequeñas depuradoras debe perseguirse la simplificación y la economía del tratamiento, ajustándose a lo estrictamente necesario.

¿Qué papel juega la digitalización en los sistemas de saneamiento? ¿Tiene cabida para los sistemas utilizados en pequeños municipios?

La digitalización en los sistemas de saneamiento es una práctica habitual en las instalaciones de depuración de tamaño medio y grande, implantada hace tiempo para la automatización y el control del funcionamiento de los equipos.

Estos sistemas han avanzado extraordinariamente y pueden tener utilidad incluso en los pequeños municipios, aunque sea a nivel básico para el seguimiento de caudales y las alarmas de funcionamiento.

No hay que olvidar, sin embargo, que siempre será necesaria una intervención humana permanente para garantizar el mantenimiento.

¿Puede señalar ejemplos y buenas prácticas en sistemas de tratamientos de aguas residuales que se hayan aplicado en los municipios pequeños en España?

En Aragón, sin ir más lejos, las actuaciones desarrolladas en el marco del Plan Especial de Depuración han permitido dotar de depuradoras a municipios de pequeño tamaño, habiéndose puesto en funcionamiento por este sistema 139 depuradoras.

En la actualidad se ha abandonado el modelo concesional y desde 2017 contamos con una línea de subvenciones a ayuntamientos que permite contar con un buen número de depuradoras en pequeños municipios. De este modo se han construido 40 pequeñas depuradoras y 8 colectores, que han supuesto una gran mejora en los parámetros de depuración. A esto hay que añadir que desde 2019 tenemos 60 depuradoras en el Pirineo en distintas fases de construcción.

También es un buen ejemplo, el consorcio de saneamiento de La Rioja, que agrupa en unas pocas zonas la gestión de todas las depuradoras de la región, uniendo las pequeñas y las grandes, evitando así la carencia de recursos técnicos y humanos para el mantenimiento de las pequeñas instalaciones.

¿Qué recomendaría a los responsables políticos y administrativos para acelerar la aplicación de soluciones al tratamiento de aguas residuales en pequeños municipios?

Definir normativamente el nivel de tratamiento, simplificarlo en lo posible y agrupar la gestión.

Bibliografía

1. Canales sectoriales, 2020, [En línea] <https://www.interempresas.net/Agua/Articulos/355289-El-sector-de-depuracion-de-aguas-facturo-1300-millones-de-euros-en-2020.html>
2. GNDiario, 2020 [En línea] <https://www.gndiario.com/aguas-residuales-ods-agua-limpia>
3. ABC, 2021, [En línea] https://www.abc.es/sociedad/abci-cuando-se-decreto-estado-de-alarma-confinamiento-marzo-espana-nsv-202103101633_noticia.html
4. Metcalf & Eddy, 2002. Ingeniería de las aguas residuales, 3a Edición. Ed. S.A. McGraw Hill/Interamericana de España. ISBN 9788448115500.
5. García, J., Corzo, A, 2008, Depuración con Humedales Construidos. Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial
6. Municipios pequeños en España, 2019, <http://www.revistaindice.com/numero74/p28.pdf>
7. EOM, 2021, [En línea] <https://elordenmundial.com/wp-content/webp-express/webp-images/doc-root/wp-content/uploads/2021/06/mapa-densidad-poblacion-espana.png.webp>
8. ICREW, 2006, [En línea] <https://www.cienciacanaria.es/files/Guia-sobre-tratamientos-de-aguas-residuales-urbanas-para-pequenos-nucleos-de-poblacion.pdf>
9. El país, 2020, [En línea] https://cincodias.elpais.com/cincodias/2020/10/01/companias/1601563317_357421.html
10. Hispagua, 2012 [En línea] https://hispagua.cedex.es/sites/default/files/hispagua_articulo/Ingcivil/P-009-020.pdf
11. MITECO, 2021, [En línea], <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/planificacion-hidrologica/planes-cuenca/default.aspx>
12. Cyclucid, 2020, [En línea,] <https://www.cyclucid.com/referencias/agroalimentaria/purines-de-cerdo-y-vacuno/>

13. Gersberg, R., Gearhart, R., Ives, M., 1989. Pathogen removal in constructed wetlands, en: Constructed Wetlands for Wastewater Treatment, D.A. Hammer, ed., Lewis Publishers, Michigan, EEUU, 431-446.
14. Zapater, C., Varó, I., 2021. Arbeláez Salazar, P. A., 2015. Contaminantes emergentes, los grandes desconocidos en acuicultura. Aquae fundación. <https://www.fundacionaquae.org/contaminantes-emergentes/>
15. Andreo Martínez, P., 2014. Evaluación y diseño de un humedal construido para la depuración de aguas residuales domésticas. Tesis Doctoral, Universidad de Murcia.
16. Gerba, C.P., 2017. Eliminación de patógenos, en Tratamiento biológico de aguas residuales. Principios, modelación y diseño. IWA Publishing, Londres, Reino Unido, 247-272.
17. Salas, J.J., 2020. Nociones básicas sobre la desinfección de las aguas residuales en tiempos convulsos. <https://www.iagua.es/blogs/juan-jose-salas/nociones-basicas-desinfeccion-aguas-residuales-tiempos-convulsos-0>
18. Kouki, S., M'hiri, F., Saidi, N., Belaïd, S., Hassen, A., 2009. Performances of constructed wetland treating domestic wastewaters during a macrophytes life cycle. Desalination, 246, 452–467
19. EPA (U.S. Environmental Protection Agency), (1999). Free water surface wetlands for wastewater treatment: A technology assessment. EPA 832/R-99/002. Office of Water, Washington, EEUU.
20. Stott R., 2003. Fate and behavior of parasites in wastewater treatment systems, en The Handbook of Water and Wastewater Microbiology. Academic Press, San Diego, 491-521.
21. Britton T., 2005. Epidemic Models Inference.
22. Yates M.V. and Gerba, C.P., 1998. Microbial considerations in wastewater reclamation and reuse, en Wastewater Reclamation and Reuse. Technomic Publishing, Lancaster, EEUU, 437-488.
23. 1Corpas, E.J., Herrera, O.F., 2012, Reducción de coliformes y Escherichia coli en un sistema residual lácteo mediante microorganismos benéficos. Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial, 10, 67-76.
24. Rose J.B., Dickson L.J., Farrah S.R., Carnahan R.P., 1996. Removal of pathogenic and indicator microorganisms by a full-scale water reclamation facility. Water Research, 30, 2785-2797.
25. Pinos Vélez, V., 2019. Cápsula: ¿Contaminantes Emergentes en el agua? <https://www.ucuenca.edu.ec/component/content/article/233-espanol/investigacion/blog-de-ciencia/1134-contaminantes-emergentes-en-el-agua?Itemid=437>
26. Barceló, D., Postigo, C., 2014. Los contaminantes emergentes, descripción y tratamientos. iagua magazine, 32-33. Ed. iagua conocimiento S.L., Madrid. <https://www.iagua.es/magazine/4>
27. Arbeláez Salazar, P. A., 2015. Contaminantes emergentes en aguas residuales y de río y fangos de depuradora. Tesis (Doctoral), Facultad de Química (Universidad Rovira i Virgili). <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/334397/Tesi%20Paula.pdf;jsessionid=26EB64EA615283D57311D71A5811C512?sequence=1>
28. McGoran, A.R., Clarck, P.F., Simth, B.D. Morritt, D., 2020. High prevalence of plastic ingestion by Eriocheir sinensis and Carcinus maenas (Crustacea: Decapoda: Brachyura) in the Thames Estuary. Environmental Pollution 265, 114972.
29. Stuart, M., Lapworth, D., Crane, E., Hart, A., 2012. Review of risk from potential emerging contaminants in UK groundwater. Science of the Total Environment, 416, 1-21. https://core.ac.uk/reader/384302?utm_source=linkout
30. Menger, F., Boström, G., Jonsson, O., Ahrens, L., Wiberg, K., Kreuger, J., Gago-Ferrero, P., 2021. Identification of Pesticide Transformation Products in Surface Water Using Suspect Screening

Combined with National Monitoring Data. *Environmental Science and Technology*, 55, 10303-10353.

31. Rivera Arias, A., Moreira Villar, M.T., Feijoo Costa, G., 2002, Eliminación de pesticidas en aguas residuales. *Ingeniería Analítica*, 386, 129-134.
32. Arriaga Barrios, T., 2012. Tratamiento de pesticidas mediante un sistema acoplado de fotocatalisis solar y humedal subsuperficial. Trabajo de grado, Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia.
33. Ormad, M.P., Miguel, N.; Claver, A., Matesanz, J.M., Ovelleiro, J.L., 2008. Pesticides removal in the process of drinking water production. *Chemosphere*, 71, 97-106.
34. Lenntech, 2021. Tratamiento de pesticidas. <https://www.lenntech.es/procesos/-pesticide-treatment.htm>
35. Rosselló Garrigós, M., 2013. Eliminación de fármacos presentes en aguas residuales urbanas a través de la combinación de biorreactor de membrana y absorción de carbón activo. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Politécnica de Valencia.
36. Manassero, A., 2017. La eliminación de fármacos presentes en agua mediante luz artificial. <https://santafe.conicet.gov.ar/la-eliminacion-de-farmacos-presentes-en-agua-mediante-luz-artificial/>
37. Quiroga Alonso, J.M., Quero Pastor, M.J., Acevedo Merino, A., 2015. Tratamientos avanzados para la eliminación de fármacos en aguas superficiales. XIII congreso español de salud ambiental. *Revista de Salud Ambiental*, 15, 18-21.
38. Manzano Miguel, E.M., 2008. Eliminación de fármacos presentes en aguas residuales urbanas mediante procesos tipo fenton heterogéneos. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Rey Juan Carlos, Madrid.
39. Wolfson, S.J., Porter, A.W., Villani, T.S., Simon, J.E., Young, L.I., 2019. Pharmaceuticals and personal care products can be transformed by anaerobic microbiomes in the environment and in waste treatment processes. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 38, 1585-1593.
40. Molins Delgado, D., 2017. Productos de cuidado personal en el medio ambiente: presencia, destino y efectos. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña.
41. Miralles Cuevas, S., 2015, Eliminación de micro-contaminantes mediante combinación de sistemas de membrana (nanofiltración) y procesos avanzados de oxidación. Tesis Doctoral, Universidad de Almería.
42. Bernal-Romero M.A., Moya Llamas, M.J., López-Ortiz C.M., Vásquez-Rodríguez, E.D., Trapote, A. Boluda Botella, N., Sentana I., Varó, P., Cases, V., Prats, D., 2016. Eliminación de fármacos, hormonas y productos de higiene y cuidado personal mediante el uso de membranas (BRM, BRM+NF, BRM+OI). XII Reunión META, Madrid.
43. Sewerbac, 2019. ¿Cómo combatir los surfactantes en las corrientes de aguas residuales con Hipo SS5600 de Bac-asili? <https://www.aguasresiduales.info/revista/noticias/como-combatir-los-surfactantes-en-las-corrientes-de-aguas-residuales-con-hipo-ss5600--zimhD>
44. Silveira Duarte, I.C., França, P., Okada, D.Y., Ferreira do Prado, P., Amancio Varesche, M.B., 2015. Degradación anaeróbica de tensioactivos aniónicos en microorganismos autóctonos de los sedimentos de un río tropical contaminado en Brasil. *Revista de Biología Tropical*, 63, 295-302.
45. Morillo Semanate, L.D., Naranjo Tovar, D.A., Pérez, J., Villacis, W., 2019. Remoción de tensoactivos y coliformes en aguas residuales domésticas mediante procesos Fenton. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental* 35, 931-943.
46. Huerga Pérez, E., 2006. Desarrollo de alternativas de tratamiento de aguas residuales industriales mediante el uso de tecnologías limpias dirigidas al reciclaje y/o valoración de contaminantes. Tesis Doctoral, Universidad de Valencia.

47. (Herzog, B.; Lemmer, H., Helmreich, B., Horn, H., Müller, E., 2014. Monitoring benzotriazoles: a 1-year study on concentrations and removal efficiencies in three different wastewater treatment plants. *Water Science Technology*, 69, 710-717.
48. Voutsas, D., Hartmann, P., Schaffner, C., Giger, W., 2006, Benzotriazoles, Alkylphenols and Bisphenol A in Municipal Wastewaters and in the Glatt River, Switzerland. *Environmental Science Pollution Resources*, 13, 333-341.
49. Sörensen, M., Weckenmann, J., 2003. Modern Treatment Methods of Strong Chelates in Surface Technology. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, 81, B79-B82.
50. Oviedo, C., Rodríguez, J., 2003. EDTA: the chelating agent under environmental scrutiny. *Chimica Nova*, 26, 901-905.
51. Kim, U.J., Oh, J.K., Kannan, K., 2017. Occurrence, Removal, and Environmental Emission of Organophosphate Flame Retardants/Plasticizers in a Wastewater Treatment Plant in New York State. *Environmental Science and Technology*, 51, 7872-7880.
52. Lin, J.C., 2004. Determining the removal effectiveness of flame retardants from drinking water treatment processes. Tesis Doctoral, Instituto Tecnológico de Massachusetts, EEUU.
53. Jiménez Moreno, A., 2014, Estudio de la degradación de edulcorantes en agua mediante tratamiento con radiación ultravioleta. Trabajo Fin de Grado, Universidad de Jaén.
54. Postigo C., López de Alda M.J., Barceló D., 2010. Drugs of abuse and their metabolites in the Ebro River basin: occurrence in sewage and surface water, sewage treatment plants removal efficiency, and collective drug usage estimation. *Environment International*, 36, 75-84.
55. Andrés Costa, M.J., Rubio López, N., Suárez Varela, M.M. Pico, Y., 2014. Occurrence and removal of drugs of abuse in Wastewater Treatment Plants of Valencia (Spain). *Environmental Pollution*, 194, 152-162.
56. Boleda, M.R., Majamaa, K., Aerts, P., Gómez, V, Galcerán, M.T., Ventura, F., 2010. Removal of drugs of abuse from municipal wastewater using reverse osmosis membranes. *Desalination and Water Treatment*, 21, 122-130.
57. Rodayán, A., Segura, P.A., Yargeau, V., 2014. Ozonation of wastewater: Removal and transformation products of drugs of abuse. *Science of the Total Environment*, 487, 763-770.
58. Mills, F., Willetts, J., Evans, B., Carrard, N. Kohlitz, J., 2020. Costs, Climate and Contamination: Three Drivers for Citywide Sanitation Investment Decisions. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 130.
59. Cossio C., McConville J., Rauch S., Wilén B.-M., Dalahmeh S., Mercado A., Romero A.M., 2018. Wastewater management in small towns—understanding the failure of small treatment plants in Bolivia. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 39, 1393-1403.
60. Moreno-Merino, L., Fernández-Jurado, M.A., Rubio-Campos, J.C., Calaforra-Chordi, J.M., López-Geta, J.A., Beas-Torroba, J., Alcaín-Martínez, G., Murillo-Díaz, J.M., Gómez-López, J.A., 2003. La depuración de aguas residuales urbanas de pequeñas poblaciones mediante infiltración directa en el terreno fundamentos y casos prácticos. Editor: Luis Moreno Merino. http://aguas.igme.es/igme/publica/depuracion_aresidual/indice.htm
61. Domínguez-Gómez, M., 2018. Optimización de un reactor HRAP para la depuración de aguas residuales urbanas. Trabajo Fin de Master – perfil investigador. Universidad de Cádiz | Master en gestión integral del agua.
62. González, J.M., Bécares, E., Luis, E., 2001. Limnología de sistemas experimentales de lagunaje para el tratamiento de aguas residuales. *Limnetica* 20, 267-277.
63. Sutherland, D.L., Ralph, P.J., 2020. 15 years of research on wastewater treatment high rate algal ponds in New Zealand: discoveries and future directions. *New Zealand Journal of Botany*, 58, 334-357.

64. Oviedo-Rivera, J.A., 2020. Estudio y evaluación de alternativas para mejorar el proceso de tratamiento biológico por medio de humedales artificiales en la Estación Depuradora de Aguas Residuales Urbanas de Alcublas (Valencia). Trabajo Fin de Máster. Máster en Ingeniería Hidráulica y Medioambiente, Universidad Politécnica de Valencia. <http://hdl.handle.net/10251/151976>
65. Ramírez-Moreno, J., 2020. Diseño y dimensionamiento de un sistema de tratamiento de aguas residuales urbanas para un núcleo urbano pequeño mediante tecnologías extensivas. (Trabajo Fin de Grado Inédito). Universidad de Sevilla, Sevilla. <https://hdl.handle.net/11441/100896>
66. Andreo-Martínez, P., García-Martínez, N., Quesada-Medina, J., Almela, L., 2017. Domestic wastewaters reuse reclaimed by an improved horizontal subsurface-flow constructed wetland: A case study in the southeast of Spain. *Bioresource Technology*, 23, 236-246.2
67. Gray, N.F., 2009. An Introduction for Environmental Scientists and Engineers. Water Technology; Department of Civil, Structural and Environmental Engineering, Trinity College, University of Dublin. Arnold, 1999. ISBN 0 340 67645 0; ISBN 0470 23632 9 (Wiley).
68. Ortega de Miguel, E., 2009. XXVII Curso sobre tratamiento de aguas residuales y explotación de estaciones depuradoras (CEDEX). Tema 2: Esquema de una EDAR. Pretratamientos. Tomo I. ISBN: 978-84-7790-504-2.
69. Sulzer, 2021. Equalization. Disponible en línea: <https://www.sulzer.com/en/shared/applications/equalization>
70. Sánchez Arriola, M., 2019. Estudio de alternativas innovadoras para la relocalización de una estación de depuración de aguas residuales (EDAR).
71. Bes Piá, M., Mendoza Roca, J.A., 2013. Diseño de los procesos de concentración en la línea de fangos de una EDAR
72. Academia Ingnova, 2015. Diseño de EDAR en pequeñas poblaciones: Tema 5. Tratamiento primario. Disponible en línea: https://academia.ingnova.es/recursos/apuntes_demo/EDAR.pdf
73. Wikibooks, 2021. Ingeniería de aguas residuales/Tratamiento físico-químico - Wikilibros. Disponible en línea: https://es.wikibooks.org/wiki/Ingeniería_de_aguas_residuales/Tratamiento_físico-químico
74. Glynn, J., Heinke, H., Heinke, G.W., 1999. Ingeniería Ambiental, Segunda Edición. PRENTICE HALL, México. ISBN: 970-17-0266-2
75. Rob, M.R., Jan F.M., Ilse Y.M., 2009. Assessment of activated sludge stability in lab-scale experiments. *Journal of Biotechnology* 141, 147–154.
76. Ramalho, R.S. 1990. Tratamiento de las aguas residuales. Quebec, Canadá: Reverté. ISBN 9788429179750.
77. Hidalgo Alvarado, V.R., 2014). Estudio y determinación de un tratamiento para la eliminación del color y olor de un sedimentador secundario de una industria cafetera. Recuperado a partir de <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/7840>.
78. Soriano Bartolo, A., 2001. Investigación sobre el empleo de membranas en tratamientos terciarios de desinfección. Tesis (Doctoral), E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM).
79. (Eckenfelder y Ford, 1970): Eckenfelder, W.W Jr. y Ford, D.L., 1970, Water Pollution Control. Pemberton Press. Austin y New York.
80. Carbonell-Espín, J., 2016. Depuración extensiva y regeneración de aguas: una solución ideal para las pequeñas poblaciones. *TECNOAQUA*, nº 21, 130-133. <http://www.tecnoaqua.es/media/uploads/noticias/documentos/reportaje-ogesa-quarg-depuracion-extensiva-regeneracion-aguas-solucion-pequenyas-poblaciones-tecnoaqua-es.pdf>

81. Chamorro, J. Ingeniero especialista en tratamiento y depuración de aguas y en desalación. Consultado el 1 noviembre de 2021. <https://www.iagua.es/blogs/jorge-chamorro/tecnologia-mbbr-e-ifas-algo-mas-que-cuestion-plastico>
82. Li Y., Zhang X., Wang X., 2012. Application of baffled-submerged bio-film process in the treatment of sewage wastewater in a small town. *Advanced Materials Research*, 356-360, pp. 1401-1405.
83. Ortiz, M., Raluy, R.G., Serra, L., Uche, J., 2007. Life cycle assessment of water treatment technologies: wastewater and water-reuse in a small town. *Desalination*, 204, 121-131.
84. Torre-Marín, J.M., Vico, J.A., Martínez, M.A. 2019. De EDAR a biofactoría: de la economía lineal a la economía circular, autosuficiencia energética [En línea] <https://www.smartgridsinfo.es/comunicaciones/comunicacion-edar-biofactoria-economia-lineal-economia-circular-autosuficiencia-energetica>
85. Canales sectoriales, 2019, [En línea] <https://www.interempresas.net/Grandescultivos/Articulos/255436-La-UE-selecciona-la-tecnologia-de-tratamiento-de-purines-de-Fertinagro-Biotech.html>
86. Valderrama, C.A. 2018. Análisis técnico-económico de implementación de mejoras tecnológicas en una EDAR para la consecución de la autosuficiencia energética”, Escola Tècnica Superior d’Enginyeria Industrial de Barcelona.
87. Liu, F., Ouedraogo, A., Manghee, S., Danilenko, A. 2012. A primer on energy efficiency for municipal water and wastewater utilities. [En línea] https://www.esmap.org/sites/default/files/esmap-files/FINAL_EECI-WWU_TR001-12_Resize.pdf
88. Medidas para la mitigación y la adaptación al cambio climático en el planeamiento urbano, Miteco, 2015.
89. EcoHabitar, 2011. [En línea] <http://www.ecohabitar.org/aprovechamiento-de-agua-de-lluvia/>
90. SolClima, 2019, <https://www.solclima.es/aguas-grises>
91. “For a Green, Circular & Smart Urban Wastewater Treatment Directive”, Water EuropeNTechnology & Innovation, 2020
92. Martín, H. 2017. Reutilización de aguas grises: Una práctica al alcance de todos. [En línea]. <https://www.iagua.es/blogs/humilde-martin-lucas/reutilizacion-aguas-grises-practica-viable-todos>
93. El país, 2020, [En línea] <https://www.iagua.es/blogs/juan-jose-salas/decalogo-depuracion-aguas-residuales-pequenas-poblaciones>

