

Contaminación del agua

Objetivos del capítulo

El agua, fuente primordial de vida en nuestro planeta, ha sido testigo de una creciente amenaza en los últimos cincuenta años, la contaminación. Este capítulo explora de manera exhaustiva los desafíos a los que se enfrenta el agua, analizando sus características fundamentales y las propiedades que la hacen indispensable para todos los aspectos de la existencia. En este recorrido, nos sumergiremos en el mundo del agua, desde sus propiedades físicas y químicas únicas hasta su vital importancia en la sustentación de la vida.

En estas páginas, se describen las propiedades únicas del agua, que la convierten en el origen mismo de la vida, pero, a su vez, la hacen muy vulnerable a la contaminación y degradación. Desde la contaminación física hasta la presencia de contaminantes químicos y biológicos, examinaremos las amenazas de este recurso que empieza a ser cada vez más escaso y valorado. Por tanto, exploraremos los fenómenos y las consecuencias derivadas de la contaminación del agua, abordando desde la eutrofización hasta la problemática de los microplásticos, analizando detalladamente sus efectos tanto en el entorno ambiental como en el ámbito socioeconómico.

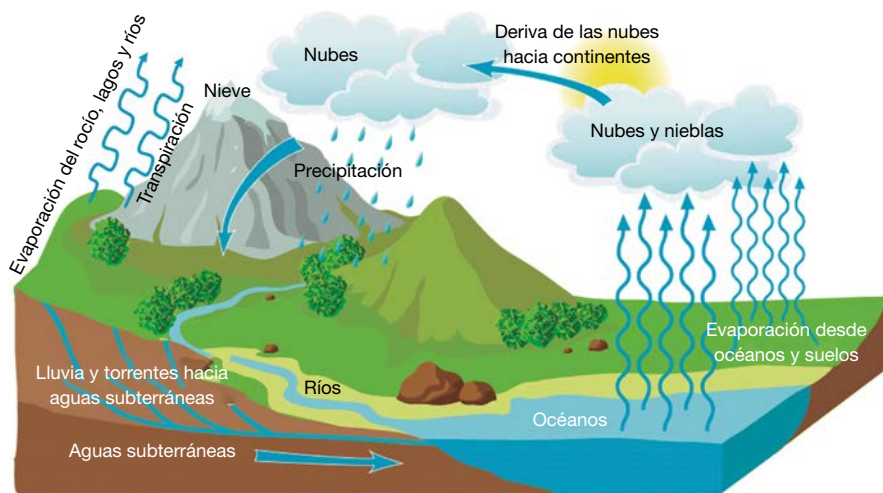
Finalmente, abordaremos los tratamientos de aguas, las tecnologías y los procesos utilizados para purificar el agua tanto para el consumo humano como para su retorno al medioambiente. Desde las estaciones de tratamiento de agua potable hasta las depuradoras de aguas residuales, se detallarán cada una de las fases del proceso para comprender mejor cómo podemos preservar y proteger este recurso esencial.

Nota. Según el Real Decreto 2032/2009, de 30 de diciembre, por el que se establecen las unidades legales de medida, se permite el uso de la letra «L» en mayúscula o «l» en minúscula como símbolos del litro, a fin de evitar la confusión entre la cifra 1 (uno) y la letra l (ele). En este manual usaremos siempre la letra «L» en mayúscula como símbolo del litro. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2010-927>

1. El agua

El *agua* es un elemento esencial para la vida en la Tierra y desempeña un papel fundamental en una variedad de procesos naturales. Comprender sus características y propiedades es fundamental, especialmente en el contexto de la contaminación del agua, un tema crítico que afecta a la salud humana y al medioambiente.

Figura 1. **Ciclo hidrológico del agua**



Fuente: elaboración propia.

El ciclo del agua, también conocido como *ciclo hidrológico*, es un fenómeno natural que involucra la circulación del agua entre la atmósfera, la superficie terrestre y los cuerpos de agua. Este proceso dinámico es esencial para el mantenimiento de la vida en la Tierra y está gobernado por una serie de procesos físicos y químicos.

Los océanos y mares, que ocupan el 70 % de la superficie de la Tierra, reciben gran cantidad de radiación solar que, al ser absorbida por la superficie del mar, desencadena el proceso de evaporación, convirtiendo el agua en vapor. Esta radiación se erige como la fuente primordial de energía que impulsa el ciclo hidrológico, como se ilustra en la figura 1. El vapor de agua también se produce por la evaporación del agua de ríos, lagos y suelos, así como mediante el fenómeno de respiración de plantas y animales.

La siguiente fase del ciclo implica la formación de nubes a partir de la condensación del vapor de agua. Este proceso se desencadena cuando pequeñas partículas de polvo, humo y

sal marina en el aire actúan como núcleos para la condensación. La precipitación, ya sea en forma de lluvia, granizo o nieve, depende de la presencia de estas partículas que favorecen el desarrollo de las nubes. Aunque una considerable cantidad de agua retorna a los mares, una porción del agua evaporada de los océanos se deposita en la tierra como agua dulce.

En la litosfera, esta agua puede reevaporarse, acumularse en lagos, corrientes o ríos, como agua superficial, o filtrarse a través del suelo para convertirse en agua subterránea. Adicionalmente, parte del agua se captura en las capas de nieve de montañas, casquetes polares y glaciares. El ciclo biológico de los seres vivos, incluyendo humanos, animales y plantas, también desempeña un papel vital, ya que el agua se incorpora en procesos como la fotosíntesis y como componente esencial de las células vivas.

Finalmente, una gran proporción del agua dulce de la litosfera fluye de regreso hacia los mares, completando así el ciclo. Antes de que el agua regrese a los mares, los seres humanos tienen la oportunidad de utilizarla para diversos fines, destacando la importancia de gestionar este recurso vital de manera sostenible.

1.1. Características del agua

Aproximadamente, el 96 % del agua de la superficie terrestre se encuentra en los océanos, el 3 % está en forma de hielo, el 1 % es agua subterránea, el 0,01 % se encuentra en arroyos y lagos y solo el 0,001 % está en la atmósfera.

La molécula de agua es relativamente sencilla (H_2O): presenta un átomo de oxígeno y dos átomos de hidrógeno. La geometría no es lineal (véase figura 2). Los átomos de hidrógeno forman un ángulo de 104,45 grados entre sí y, además, contienen dos pares de electrones. Esto confiere a la molécula un momento dipolar eléctrico, lo que hace que pueda formar enlaces débiles con otras moléculas de agua que la rodean, los *puentes de hidrógeno* (véase figura 3 izqda.).

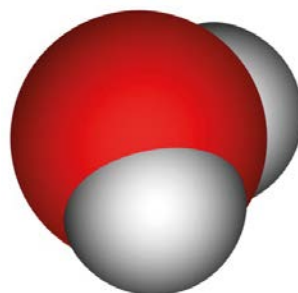
Estos enlaces, aunque débiles en comparación con los enlaces covalentes que unen el hidrógeno con el oxígeno en la molécula, son relativamente fuertes si se los compara con los enlaces que hay entre otras moléculas similares.

Todas estas características de la molécula de agua le confieren sus propiedades físicas, químicas y térmicas.

A) Propiedades físicas

El agua es única en su estructura y comportamiento. Es un líquido transparente, incoloro e inodoro en su forma pura. Por ejemplo, su capacidad

Figura 2. Molécula de agua



Fuente: elaboración propia.

para existir en los estados sólido, líquido y gaseoso a temperaturas comunes en la Tierra es vital para el mantenimiento de la vida, como se indica en la tabla 1.

Tabla 1. **Estados del agua en la Tierra**

Sólido	Hielo en polos y glaciares y sobre la superficie de cuerpos de agua durante el invierno a bajas temperaturas. También como nieve, granizo y escarcha, así como en las nubes compuestas por cristales de hielo.
Líquido	En mares, ríos, lagos y aguas subterráneas. Además, en forma de gotas en las nubes y, sobre superficies, como rocío.
Gaseoso	Vapor de agua, como humedad, en niebla y nubes.

B) Propiedades térmicas

El agua tiene una alta capacidad calorífica, lo que significa que puede absorber y retener grandes cantidades de calor sin experimentar cambios significativos en su temperatura. Esta propiedad es crucial para regular el clima y estabilizar la temperatura de los océanos y otros cuerpos de agua.

Además, el agua tiene un punto de congelación y un punto de ebullición que son relativamente altos en comparación con otras sustancias similares. Esto permite que exista en forma líquida en una amplia gama de temperaturas, lo que es esencial para la vida tal como la conocemos.

C) Propiedades químicas

El agua es conocida como el *disolvente universal* debido a su habilidad para disolver una variedad de sustancias. En la figura 3, se puede apreciar un ejemplo de cómo se disuelve el NaCl, mostrando en el centro la interacción del agua con el ion sodio ($1+$) y en la derecha con el ion cloruro. Esto facilita el transporte de nutrientes y minerales en los sistemas biológicos. Además, actúa como medio donde ocurren muchas reacciones químicas esenciales para la vida.

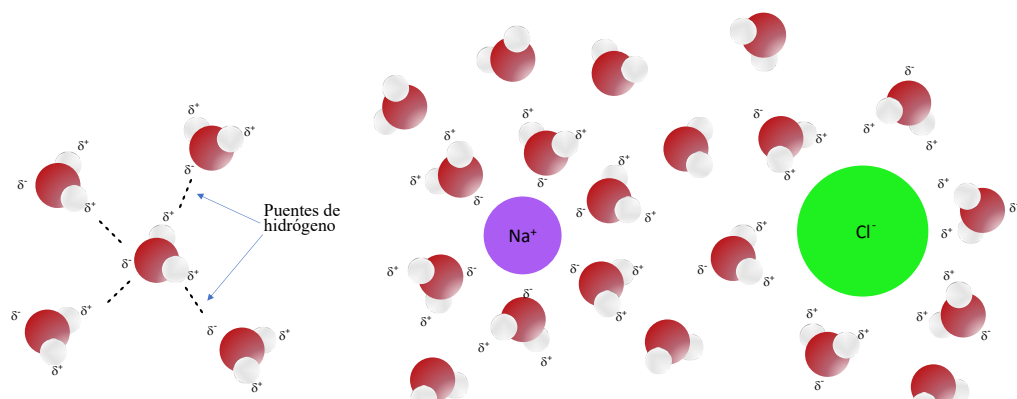
D) Importancia para la vida

El agua es esencial para todos los seres vivos. La mayoría de las funciones biológicas, como la digestión, la regulación de la temperatura y el transporte de nutrientes dependen de la presencia de agua. Además, los ecosistemas acuáticos albergan una biodiversidad única y desempeñan un papel crítico en la regulación del clima global.

E) Vulnerabilidad ante la contaminación

A pesar de su importancia, el agua es vulnerable a la contaminación causada por actividades humanas. Los vertidos industriales, las descargas de aguas residuales no tratadas y el arrastre de productos químicos agrícolas son algunas de las principales fuentes de contaminación. Estos contaminantes pueden tener consecuencias graves para la salud humana y el equilibrio de los ecosistemas acuáticos.

Figura 3. Interacciones en el agua



Nota. Interacciones con otras moléculas de agua (figura izqda.). Interacciones con el ion sodio (figura central). Interacciones con el ion cloruro (figura dcha.).

Fuente: elaboración propia.

2. Propiedades del agua

Como hemos visto, la molécula de agua es polar, lo que hace que pueda crear enlaces de hidrógeno. Estos enlaces son fundamentales para mantener en solución algunas moléculas de soluto o iones.

La formación de enlaces de hidrógeno ocurre cuando las moléculas de agua interactúan con átomos de hidrógeno, nitrógeno u oxígeno, presentes en la molécula del soluto.

En la tabla 2 se muestran algunas de las propiedades del agua.

Tabla 2. **Propiedades del agua**

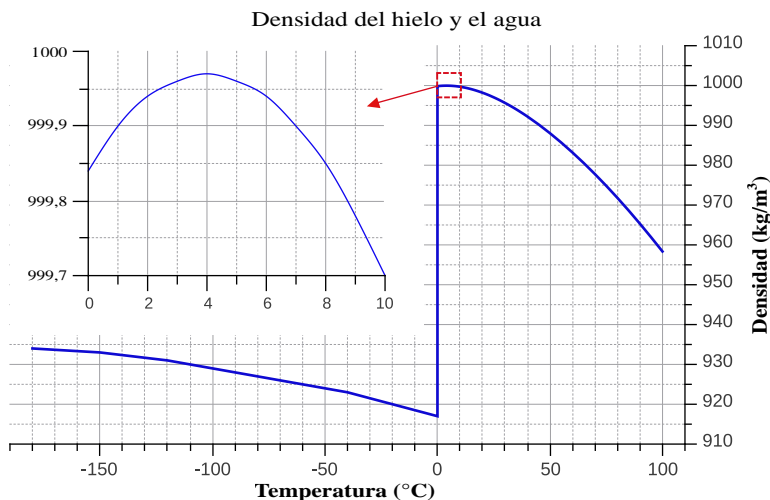
Propiedad	Valor
Peso molecular, g/mol	18,015
Densidad, kg/m ³ (a 1 atm y 25 °C)	997,047
Densidad, kg/m ³ (a 1 atm y 3,983 °C)	999,975
Viscosidad dinámica, mPa.s (a 20 °C)	0,89
Punto de fusión, °C	0
Punto de ebullición, °C	99,98
Calor de fusión, J/g °C	333,75
Calor de vaporización, J/g °C	2260
Calor específico, J/g °C (a 15 °C)	4,19
Tensión superficial, mN/m (a 20 °C)	72,75
Constante dieléctrica (a 1 atm y 25 °C)	79,99
Conductividad eléctrica específica, mS/cm (a 25 °C)	0,05

2.1. Densidad

La formación de enlaces de hidrógeno también explica un fenómeno inusual en otros líquidos, como es que el sólido tenga menor densidad que el líquido, y es por lo que el hielo flota en el agua. En el agua líquida, a medida que se enfrían las moléculas, se aproximan entre sí, disminuyendo el volumen del líquido. Este hecho ocurre hasta una temperatura de alrededor de 4 °C. A partir de esa temperatura, si se sigue enfriando hasta los 0 °C, aumenta el volumen. Cuando se forma el hielo sólido, se crea una estructura cristalina. Las moléculas de agua forman una red con una estructura hexagonal en la que cada molécula de agua está unida a otras cuatro creando una red tridimensional de enlaces de hidrógeno que define la estructura del hielo. Esta red tridimensional, dispuesta de manera relativamente ordenada, se expande en volumen, ocupando más espacio que cuando está en estado líquido, resultando en una densidad inferior a la del agua líquida. En la figura 4 se muestra la densidad del agua frente a la temperatura.

Este comportamiento del agua posee una gran relevancia para la vida en el planeta. Si el hielo fuese más denso que el agua, se hundiría en el fondo de lagos, ríos y mares, con el riesgo de congelar estas masas de agua y eliminar las especies acuáticas.

Figura 4. Densidad del agua frente a la temperatura



Nota. El agua líquida, a presión de 1 atm, presenta una densidad máxima de $999,975 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a $3,983 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Fuente: elaboración propia.

2.2. pH

Otra propiedad importante derivada de su estructura es la acidez o alcalinidad. Recordemos que el pH del agua está determinado por la concentración de protones (H^+), en el equilibrio¹:



Para el agua pura, la concentración de protones (H^+) tiene que ser igual a la de iones hidroxilo (OH^-) y, como la constante del agua es $K_w = 10^{-14}$, podemos escribir:

$$K_w = [\text{H}^+][\text{OH}^-] = 10^{-14}$$

$$[\text{H}^+]^2 = 10^{-14}$$

$$[\text{H}^+] = \sqrt{10^{-14}} = 10^{-7}$$

¹ Se ha elegido la reacción $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + \text{OH}^-$ por sencillez, pero sería más correcto hacerlo con la reacción $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^-$.

Usando la definición de pH, podemos ver que el agua pura tendrá:

$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+] = -\log 10^{-7} = 7$$

Recordemos que el pH se mide en una escala que va de 0 a 14, donde 7 es neutro. Cuando el pH es inferior a 7, el agua se considera ácida, y cuando es superior a 7, se considera alcalina o básica.

El control del pH es crucial en numerosos procesos químicos y biológicos, ya que afecta a la solubilidad de compuestos, a la actividad de enzimas y a la disponibilidad de nutrientes, entre otros aspectos.

2.3. Solubilidad de gases en el agua

De especial importancia son los gases disueltos en el agua, ya que resultan indispensables para la vida de las especies que habitan en ella. Los dos gases más importantes son el oxígeno y el dióxido de carbono.

No debemos confundir la solubilidad con la concentración. La *solubilidad* nos indica la máxima concentración que es capaz de disolver. La *concentración* que tenga un tipo de agua dependerá de muchos factores. Aunque la solubilidad pueda ser alta, la concentración puede disminuir por diversos factores que hagan que se consuma el oxígeno disuelto.

Debemos recordar que la solubilidad de los gases disminuye de forma contraria a los sólidos. Es decir, los sólidos suelen aumentar la solubilidad con la temperatura, mientras que los gases, al aumentar la temperatura, disminuyen su solubilidad.

2.3.1. Oxígeno

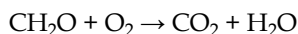
La solubilidad del oxígeno en agua dulce varía entre 14,6 mg/L a 0 °C, 9,1 mg/L a 20 °C y, aproximadamente, 7 mg/L a 35 °C. Cuando hay sales disueltas, la solubilidad es menor; por ejemplo, en agua de mar, la solubilidad a 20 °C es de 7 mg/L (frente a los 9,1 mg/L del agua dulce). Para la respiración de los peces es necesaria una concentración mínima de aproximadamente 5 mg/L de oxígeno disuelto.

Con la respiración de los seres vivos que habitan en el agua, el oxígeno se va agotando, pero se puede aportar mediante varios procesos. Las plantas acuáticas desempeñan un papel crucial al generar oxígeno durante la fotosíntesis. Además, este gas también puede incorporarse a través de la difusión desde la atmósfera o mediante la aireación, un proceso que tiene lugar cuando el agua se mezcla con el aire. Este fenómeno se manifiesta en áreas donde el agua forma olas o cascadas y en zonas de corrientes rápidas y aguas turbulentas.

La presencia de organismos acuáticos también influye en la cantidad de oxígeno disuelto. Al igual que la fotosíntesis de las plantas terrestres contribuye a generar oxígeno en el aire,

las plantas acuáticas llevan a cabo fotosíntesis, aportando oxígeno al agua. En algunos casos, el agua puede llegar a estar sobresaturada, lo que indica niveles de oxígeno disuelto superiores a la solubilidad normal. En esta situación, el oxígeno adicional puede liberarse de nuevo al aire o eliminarse a través de procesos de respiración. La complejidad de estos procesos subraya la interconexión dinámica entre la vida acuática, los procesos biogeoquímicos y la calidad del agua.

Por otro lado, puede ocurrir el proceso contrario. Cuando hay un exceso de materia orgánica en el agua, puede producirse la descomposición de esta por la acción bacteriana. La descomposición aeróbica de la materia orgánica, llevada a cabo en presencia de oxígeno, persistirá siempre que haya un suministro suficiente de este último. Suponiendo un compuesto orgánico sencillo como el metanal (CH_2O), la reacción química asociada puede expresarse de forma genérica como:



Podemos hacer unos pequeños cálculos para determinar qué cantidad de este compuesto orgánico, el CH_2O , es necesaria para agotar la cantidad máxima de oxígeno que se puede disolver a 20°C por cada litro de agua. Usando los pesos atómicos, obtenemos que, para consumir los 9,1 mg de O_2 , se requieren tan solo 8,5 mg de CH_2O .

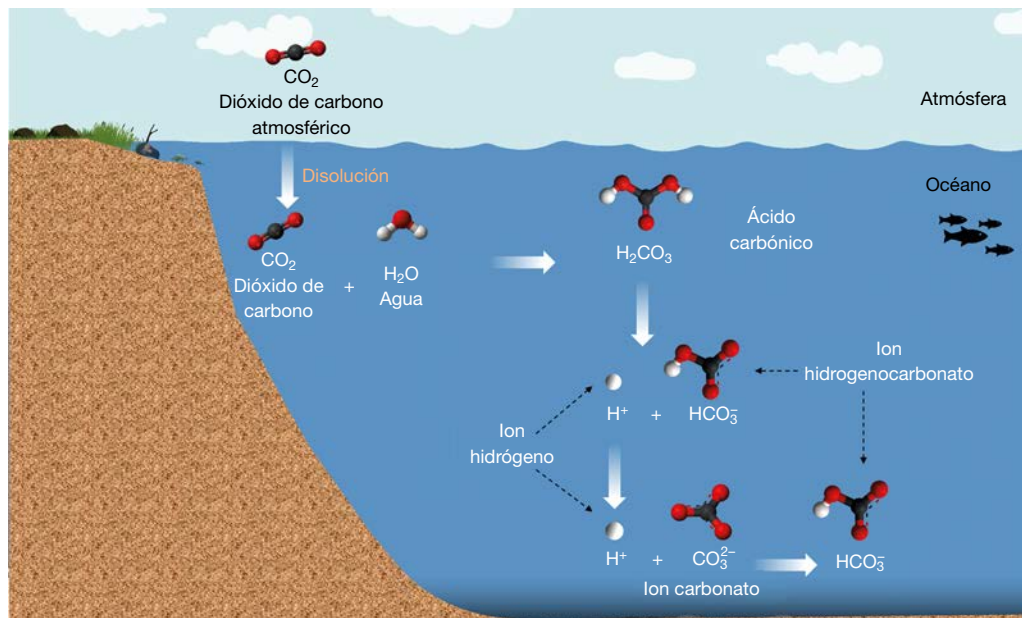
Para poder mantener la vida acuática es necesario que el oxígeno sea renovado continuamente desde la atmósfera o mediante fotosíntesis. A veces, cuando el nivel de contaminación con sustancias orgánicas llega a ser elevado, la tasa de consumo de oxígeno supera la velocidad de reposición, lo que puede conducir al descenso del oxígeno disuelto y provocar la mortalidad de peces y otros organismos acuáticos.

2.3.2. Dióxido de carbono

En el capítulo anterior abordamos el problema del aumento del dióxido de carbono en la atmósfera y cómo este afectaba al calentamiento global. Pero este CO_2 procedente de la quema de combustibles también puede acabar en los océanos. De hecho, según algunos estudios, aproximadamente el 31 % de las emisiones de CO_2 antropogénico ha sido capturado por los océanos. De este modo, los mares y los océanos estarían actuando como sumidero, disminuyendo la cantidad de gas atmosférico. Este hecho cada vez irá teniendo un menor efecto, hasta que se alcance la saturación.

Esto, que *a priori* parece una ventaja, ya que se consigue disminuir la cantidad que hay en la atmósfera y reduce el efecto invernadero, puede provocar otros problemas.

Veamos en la figura 5 cómo puede afectar un aumento de la disolución de CO_2 en los océanos.

Figura 5. Reacciones del CO₂ en el agua

Nota. Proceso de disolución del dióxido de carbono (CO₂) en agua, que conduce a la formación de ácido carbónico (H₂CO₃) y a su posterior disociación en iones hidrogenocarbonato (HCO₃⁻) y carbonato (CO₃²⁻) dentro del océano.

Fuente: elaboración propia.

Cuando el dióxido de carbono se disuelve en el agua, se produce la formación de ácido carbónico:

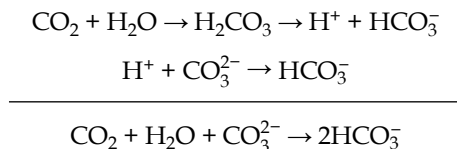


Además, hay que tener en cuenta las reacciones de disociación del ácido carbónico:



Cuando se incrementa la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera, lógicamente también aumenta la cantidad disuelta en el agua, y, según la reacción (1), produce un aumento de protones y se acidifica el medio, disminuyendo el pH. Al producirse más protones, para

mantener el equilibrio es necesario que reaccionen con cationes carbonato (CO_3^{2-}). Podemos resumirlo con las siguientes reacciones:



Debido a que las dos reacciones se desarrollan simultáneamente, tanto el pH como la disponibilidad de carbonato se reducen a medida que aumenta la concentración atmosférica de dióxido de carbono.

Por tanto, cuando el dióxido de carbono se mezcla con agua de mar, tiene el efecto de reducir la disponibilidad de iones carbonato, que muchos organismos marinos (corales, plancton marino y mariscos, entre ellos) necesitan para construir sus caparazones. Este problema ya se ha empezado a detectar en la gran barrera de coral y algunos investigadores, como Uthicke, han evaluado el impacto negativo que está causando.

Actualmente, aproximadamente la mitad del dióxido de carbono antropogénico que hay en el océano se encuentra en los 400 m superiores de la columna de agua, mientras que la otra mitad ha penetrado hacia la zona inferior. La circulación impulsada por la densidad y el viento ayuda a mezclar las aguas superficiales y profundas en algunas regiones costeras, pero no es así en gran parte del océano abierto. Se estima que los cambios de pH en zonas profundas se retrasen unos siglos con respecto a los cambios que se están produciendo superficialmente.

2.4. Salinidad

La *salinidad del agua* se refiere a la concentración de sales disueltas en ella y es un factor crucial en la caracterización de los cuerpos de agua. El agua salada, como la de los océanos y mares, tiene una salinidad más alta en comparación con el agua dulce de ríos y lagos. La salinidad se expresa comúnmente en porcentaje o en partes por mil (‰ o ppt). El agua de mar, en promedio, tiene una salinidad de aproximadamente 3,5 ‰, lo que significa que, por cada 100 g de agua, hay 3,5 g de sales disueltas.

La salinidad del agua desempeña un papel fundamental en la vida marina, ya que muchos organismos acuáticos han evolucionado para adaptarse a ambientes con diferentes niveles de salinidad. Algunos organismos, como las algas marinas y ciertos tipos de peces, prosperan en aguas con una alta salinidad, mientras que otros, como los organismos de agua dulce, prefieren entornos con menor concentración de sales. La salinidad del agua no es constante y puede variar en diferentes partes del mundo y en distintos momentos. Factores como la evaporación, la precipitación, el deshielo y la mezcla de aguas con diferentes niveles de salinidad contribuyen a estas variaciones. El control de la salinidad del agua es esencial.

En masas de agua como lagos y ríos, la salinidad es pequeña. Son las llamadas *aguas dulces*. Los iones predominantes son el ion calcio (Ca^{2+}), el ion magnesio (Mg^{2+}) y el ion sodio

(Na^+), como iones positivos; como iones negativos, el hidrogenocarbonato (HCO_3^-) y el ion sulfato (SO_4^{2-}). En el agua del mar, la mayoría de los constituyentes disueltos son iones y se observan solo pequeñas variaciones en sus cantidades relativas. Los principales iones positivos son el sodio (Na^+), el magnesio (Mg^{2+}), el calcio (Ca^{2+}), el potasio (K^+) y el estroncio (Sr^{2+}). En cuanto a los iones negativos, destacan el cloruro (Cl^-), el sulfato (SO_4^{2-}), el hidrogenocarbonato (HCO_3^-), el bromuro (Br^-), el fluoruro (F^-) y el yoduro (I^-). Es importante señalar que hay muchos otros elementos presentes en concentraciones muy bajas.

Algunos de los principales constituyentes del agua de mar se extraen con propósitos comerciales, como es el caso del cloruro sódico (NaCl), el bromo y el magnesio. Estas extracciones no solo son relevantes para la industria, sino que también reflejan la importancia económica de ciertos componentes marinos. En particular, el cloruro sódico, es decir, la sal común, es uno de los recursos más esenciales extraídos del agua de mar y su uso abarca desde aplicaciones culinarias hasta procesos industriales.

2.4.1. Residuo seco y sólidos totales disueltos

Existen distintas formas de medir la cantidad de sólidos en agua (disueltos y suspendidos). Se puede medir de dos formas:

- El residuo seco en el agua, medido como sólidos totales (ST) (*total solids* [TS]), es el peso de materiales disueltos y suspendidos después de evaporar un volumen de agua y secar el residuo a 105°C ; por tanto, tendría en cuenta el contenido total de sales.
- Si se filtra previamente para eliminar las sustancias suspendidas, el residuo seco es conocido como sólidos disueltos totales (SDT) (*total dissolved solids* [TDS]).

Se expresan generalmente en miligramos por litro (mg/L) o partes por millón (ppm).

La determinación del residuo seco y los sólidos disueltos totales son indicadores de la calidad del agua y pueden incluir una variedad de componentes, como sales minerales, metales, iones, materia orgánica disuelta y partículas suspendidas. La concentración de estos elementos en el agua puede variar significativamente dependiendo de la fuente del agua y de las actividades humanas en la zona (véase tabla 3).

Tabla 3. Sólidos totales y sólidos disueltos totales en distintos tipos de aguas

Tipos de agua	ST (mg/L)	SDT (mg/L)
Aguas dulces	0-2000 (a veces hasta 3000)	< 1000
Aguas salobres	5000 (a veces hasta 10000)	1000-15000



Tipos de agua	ST (mg/L)	SDT (mg/L)
◀		
Aguas saladas	40 000 (a veces hasta 100 000)	35 000
Salmueras	Hasta saturación	

2.4.2. Conductividad

La *conductividad eléctrica* del agua está relacionada con la presencia de sales y otros electrolitos disueltos en ella. La conductividad es una propiedad eléctrica que mide la capacidad de un material para conducir corriente eléctrica. Cuando se disuelven sales en el agua, los iones resultantes permiten que la corriente eléctrica fluya más fácilmente. Por lo tanto, la medición de la conductividad puede proporcionar una indicación indirecta de la cantidad de sales presentes en el agua. En el caso del agua, la presencia de iones disueltos, como los iones Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , etc., contribuye a su conductividad. Es importante destacar que, aunque la conductividad puede indicar la presencia de sales, no proporciona información detallada sobre el tipo específico de sales presentes en el agua. Además, la temperatura del agua puede influir en la conductividad, ya que las soluciones iónicas tienden a tener una mayor conductividad a temperaturas más altas.

En la práctica, la medición de la conductividad se utiliza comúnmente como una herramienta para evaluar la calidad del agua y la concentración general de iones disueltos, lo que incluye las sales. Esta medición se expresa generalmente en microsiemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$). La conductividad se puede medir con instrumentos como conductímetros, que proporcionan lecturas rápidas y precisas (véase tabla 4).

Tabla 4. **Conductividad en distintos tipos de aguas**

Tipos de agua	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Agua pura	0,052
Agua destilada	0,5-2,0
Agua de montaña	> 1,0
Agua de uso doméstico (1)	100-800
Agua de mar	52 000

(1) Según el Real Decreto 3/2023, se debe mantener por debajo de $2500 \mu\text{S}/\text{cm}$ a 20°C . El valor de no aptitud es de $4000 \mu\text{S}/\text{cm}$ a 20°C .

2.5. Dureza del agua

La *dureza del agua* es un concepto químico que se refiere a la concentración de ciertos iones metálicos disueltos en el agua, principalmente iones de calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}). Estos iones se incorporan al agua a medida que esta fluye a través de depósitos de minerales como la calcita, la dolomita y el yeso, que son compuestos ricos en calcio y magnesio.

Desde un punto de vista químico, existen dos tipos de dureza:

- Dureza temporal. Es causada por la presencia de hidrogenocarbonatos de calcio y magnesio, que pueden ser eliminados mediante la ebullición del agua. Al hervir, estos bicarbonatos se descomponen en carbonatos insolubles, que precipitan, y en dióxido de carbono, que se escapa al aire.
- Dureza permanente. Se debe a la presencia de sulfatos y cloruros de calcio y magnesio, que no se pueden eliminar por ebullición.

La presencia de iones de calcio y magnesio en el agua afecta a varios procesos y productos. Por ejemplo, en el sector industrial, el agua dura puede causar la formación de incrustaciones en tuberías y calderas, lo que reduce la eficiencia y aumenta el costo de mantenimiento. En el hogar, puede reducir la eficacia de jabones y detergentes, ya que estos iones reaccionan con los ácidos grasos presentes en estos productos para formar sales insolubles, lo que disminuye su capacidad de formar espuma y limpiar efectivamente, así como la necesidad de utilizar mayor cantidad de jabón para conseguir la limpieza deseada.

Para tratar la dureza del agua, se utilizan métodos de ablandamiento con intercambio iónico, donde los iones de calcio y magnesio son reemplazados por iones de sodio o potasio, o mediante la utilización de sistemas de osmosis inversa, que filtran estos iones. Estos métodos son importantes no solo para mejorar la calidad del agua para uso doméstico e industrial, sino también para proteger los equipos y asegurar procesos eficientes en diversas aplicaciones.

Químicamente, la dureza del agua se mide generalmente en términos de concentración de carbonato de calcio (CaCO_3) en miligramos por litro (mg/L). Aunque esta expresión realmente se calcula midiendo la concentración de Ca^{2+} y Mg^{2+} , y sabiendo los pesos atómicos, resulta la expresión:

$$\text{Dureza} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{ de } \text{CaCO}_3 \right) = 2,50 [\text{Ca}^{2+}] + 4,116 [\text{Mg}^{2+}]$$

Un agua se considera *blanda* cuando tiene una concentración baja de estos iones y *dura*, cuando la concentración es alta. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), el grado de dureza del agua se clasifica en cuatro intervalos de 0-60 mg/L (véase tabla 5).

Tabla 5. Clasificación del agua en función de la dureza

Clasificación	Dureza
Blanda	0-60
Moderadamente dura	61-120 mg/L
Dura	121-180 mg/L
Muy dura	> 180 mg/L

2.6. Demanda química de oxígeno (DQO) y demanda biológica de oxígeno (DBO)

Existe bastante confusión entre dos parámetros químicos importantes usados en el análisis de aguas contaminadas debido a la similitud de sus nombres. Aunque representan conceptos muy distintos, ambos son indicadores de la contaminación. La DQO (*chemical oxygen demand* [COD]) se refiere a la cantidad de oxígeno requerida para descomponer químicamente la materia orgánica. Por otro lado, la DBO (*biological oxygen demand* [BOD]) mide el oxígeno necesario para descomponer biológicamente la materia orgánica mediante microorganismos.

2.6.1. Demanda biológica de oxígeno (DBO) o demanda bioquímica de oxígeno

La DBO es una medida utilizada para cuantificar la cantidad de oxígeno disuelto en el agua que es consumido por microorganismos presentes en el agua para descomponer materia orgánica. En otras palabras, la DBO es una medida de la cantidad de materia orgánica biodegradable presente en una muestra de agua.

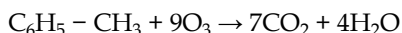
La DBO se determina generalmente mediante un ensayo de laboratorio que implica tomar una muestra de agua y exponerla a microorganismos en condiciones controladas, como temperatura y agitación, durante un periodo de tiempo específico, normalmente de 5 días, y a una temperatura de 20 °C. Durante este periodo, los microorganismos presentes en la muestra de agua utilizan el oxígeno disuelto para descomponer la materia orgánica presente. La cantidad de oxígeno consumido durante este proceso se mide al principio y al final del periodo de incubación.

La diferencia entre la concentración inicial de oxígeno disuelto y la concentración final después del periodo de incubación es la DBO. Se expresa generalmente en miligramos de oxígeno diatómico por litro de agua (mg O₂/L) y se expresa como DBO₅, DBO₅ o DBO_{5,20} (el 5 indica los días de duración del ensayo y el 20, la temperatura en °C). Cuanto mayor sea la DBO, más materia orgánica biodegradable hay presente en el agua, que necesita oxígeno para

degradarse. lo que implica menos oxígeno para la vida acuática. Puede usarse para evaluar la carga orgánica en los recursos hídricos o la eficiencia de sistemas de tratamiento de aguas residuales. La parte negativa de este ensayo es su lentitud, ya que necesita 5 días.

2.6.2. Demanda química de oxígeno (DQO)

La DQO mide la cantidad de oxígeno disuelto requerida para oxidar la materia orgánica mediante un agente químico, como el dicromato de potasio. Es esencial para determinar la cantidad total de residuos orgánicos en el agua. La DQO es crucial en plantas de tratamiento de agua y efluentes, destacándose por la rapidez en obtener resultados, en comparación con la DBO. El cálculo teórico de la DQO se puede realizar conociendo la concentración de las sustancias orgánicas y suponiendo que se transforman completamente en CO_2 y H_2O . Si, por ejemplo, nos dieran una concentración de 0,27 mg/L de tolueno en el agua, podemos plantear la reacción de oxidación completa, que sería:



Si usamos los factores de conversión, podríamos llegar a la conclusión de que la DQO es:

$$\text{DQO} = \frac{\left[\text{tolueno} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) \right] \cdot (\text{moles de O}_2) \cdot \text{PM}_{\text{O}_2}}{\text{PM}_{\text{tolueno}}} = \frac{0,27 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \cdot 9 \cdot 32}{92,1} = 0,84 \frac{\text{mg de O}_2}{\text{L}}$$

El valor de DQO siempre es mayor que el de DBO, ya que el primero nos da información de toda la cantidad de materia orgánica que se puede oxidar y el segundo, de la que se puede oxidar por vía biológica. Por tanto, es importante conocer la relación entre ambos parámetros para saber qué tipo de tratamiento es el más adecuado para cada tipo de agua residual, como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Relaciones de DQO/DBO5 y tratamientos recomendados en aguas residuales

DQO/DBO5	Observaciones
< 2,5	Fracción biodegradable elevada. Tratamiento biológico recomendado.
2,5-4,0	Fracción biodegradable media. Realizar pruebas antes del uso del tratamiento biológico.
> 4,0	Fracción biodegradable baja. Tratamiento biológico no recomendado.

3. Contaminación del agua

La contaminación del agua es un problema complejo y de alcance global que afecta tanto a países desarrollados como en desarrollo. La presencia de una variedad de fuentes de contaminación, incluyendo las industriales, las agrícolas, las urbanas y las mineras, ha llevado a una situación en la que la contaminación del agua es generalizada. En los últimos años, ha surgido una creciente preocupación por los contaminantes emergentes, como los microplásticos y los productos farmacéuticos, cuyos impactos a largo plazo en los ecosistemas acuáticos y en la salud humana todavía están bajo investigación. Otro problema significativo es la eutrofización, causada por el exceso de nutrientes en las masas de agua, que provoca floraciones de algas nocivas y la creación de zonas muertas donde la vida acuática no puede sobrevivir.

La evolución de la contaminación del agua ha sido influenciada por varios factores. Se ha producido un aumento en la conciencia pública y en la regulación por parte de los Gobiernos, lo que ha llevado a mejoras en el tratamiento de aguas residuales y a la reducción de algunos tipos de contaminantes. Además, el desarrollo de tecnologías avanzadas ha mejorado la capacidad de tratar y monitorizar la contaminación del agua. Sin embargo, desafíos como el crecimiento de la población, el desarrollo industrial y el cambio climático continúan presentando nuevas fuentes de contaminación y acrecientan los problemas existentes.

La calidad del agua potable, a lo largo de la historia, ha sido un elemento crucial para la salud y el bienestar humanos. Algunos contaminantes presentes en el agua potable han provocado epidemias devastadoras, diezmado poblaciones enteras. En la actualidad, aunque se han controlado en gran medida las infecciones virales y bacterianas transmitidas por el agua potable, como el cólera, este control es desafortunadamente predominante solo en países industrializados. En estas regiones, la preocupación se centra en los contaminantes químicos tóxicos presentes en el agua.

Las causas de la contaminación del agua en las sociedades industrializadas son variadas. Principalmente, se deben a vertidos de hidrocarburos, desechos industriales y agrícolas. Los océanos actúan como depósitos finales de estos desechos, con ríos contaminados desembocando en ellos y comunidades costeras liberando aguas residuales no tratadas. Además, el transporte marítimo contribuye significativamente a esta problemática, vertiendo desechos en los mares. A pesar de la gran capacidad de dilución del océano, se encuentran frecuentemente niveles alarmantes de toxinas como el mercurio en peces y moluscos, lo que representa un peligro para la cadena alimenticia. En nuestras costas tenemos varios ejemplos, como el desastre del Prestige, tras el que fueron derramadas unas 70 000 toneladas de petróleo frente a las costas de Galicia por el hundimiento del petrolero en 2002 y que afectó a 2000 km de la costa española, francesa y portuguesa. Otro más reciente, aunque con menor repercusión, fue el vertido de 26 toneladas de *pellets* de plástico ocurrido en diciembre de 2023 frente a las costas gallegas por la caída de un contenedor marítimo.

Mirando hacia el futuro, se reconoce la necesidad de un enfoque integrado para la gestión del agua. Esto incluye la implementación de políticas efectivas, el uso de tecnologías avanzadas de tratamiento, la adopción de prácticas sostenibles de uso del agua y el fomento de una mayor conciencia pública. La sostenibilidad en la gestión de los recursos hídricos es

fundamental para abordar la contaminación del agua, implicando no solo el tratamiento de las aguas contaminadas, sino también la prevención de la contaminación mediante prácticas más limpias en la agricultura y la industria. Además, dado que la contaminación del agua es un problema que trasciende fronteras, se requiere una cooperación internacional y un enfoque global para encontrar soluciones efectivas y sostenibles.

Los contaminantes del agua se pueden clasificar en diferentes categorías según su naturaleza y origen. Algunos de los principales tipos de contaminantes del agua son:

- Contaminantes físicos. Afectan a las características físicas del agua, como el color, la turbidez y la temperatura. Algunos ejemplos incluyen sedimentos provenientes de la erosión del suelo, partículas suspendidas y residuos sólidos. También se incluyen en esta categoría los contaminantes térmicos, que provocan un aumento o disminución de la temperatura del agua, normalmente por la descarga de agua utilizada para refrigeración de procesos industriales o plantas de energía. La alteración térmica puede afectar a la vida acuática y a los ecosistemas, ya que influye en la solubilidad de los gases.
- Contaminantes químicos. Son sustancias químicas que se disuelven o mezclan con el agua, alterando su calidad. Pueden ser orgánicos –como jabones y detergentes, purines, petróleo, pesticidas, herbicidas y solventes industriales– o inorgánicos –como metales pesados (cadmio, plomo, mercurio, arsénico), nitratos y fosfatos provenientes de fertilizantes y desechos industriales y mineros–.
- Contaminantes biológicos. También conocidos como *patógenos*, incluyen microorganismos como bacterias, virus, protozoos y parásitos. Suelen provenir de aguas residuales sin tratar, de desechos de animales y de la contaminación por aguas de escorrentía.
- Contaminantes radiactivos. Proviene de la producción de energía nuclear, de la minería y del procesamiento de minerales radiactivos, así como del uso médico e industrial de materiales radiactivos. Incluyen sustancias como el uranio, el torio y el radio.

3.1. Contaminantes físicos

Estos contaminantes juegan un papel crucial, afectando no solo a la apariencia y a la usabilidad del agua, sino también a su calidad general y a la vida acuática. Estos contaminantes incluyen una variedad de partículas y sustancias que alteran las propiedades físicas del agua, como su color, olor, turbidez y temperatura.

3.1.1. Sedimentos y sólidos suspendidos

Los *sedimentos* son partículas que provienen principalmente de la erosión del suelo. Esta erosión puede ser natural o el resultado de actividades humanas como la agricultura,

la minería y la construcción. Los sólidos suspendidos pueden incluir una variedad de materiales, como limo, arcilla, partículas orgánicas e inorgánicas, así como restos de plantas.

Normalmente, los sedimentos disminuyen la claridad del agua, afectando a la fotosíntesis en plantas acuáticas. Además, pueden dañar la vida acuática, cubriendo los hábitats y afectando a la respiración de peces y de otros organismos.

3.1.2. Residuos sólidos

Incluyen una amplia gama de materiales, como plásticos, vidrio, metal y otros desechos, que terminan en cuerpos de agua debido a la mala gestión de los residuos. Estos residuos no solo son antiestéticos, sino que también pueden ser peligrosos para la vida acuática. Los animales pueden quedar atrapados en ellos o ingerirlos, lo que puede llevar a lesiones graves o a la muerte.

3.1.3. Cambios de temperatura

Las plantas industriales y de producción de energía a menudo usan agua para enfriar máquinas y procesos, descargando posteriormente el agua caliente de vuelta a los cuerpos de agua. Esto puede llevar a un aumento significativo en la temperatura del agua.

Un cambio en la temperatura del agua puede tener efectos graves en los ecosistemas acuáticos. Puede afectar al metabolismo, a la reproducción y a la supervivencia de muchas especies acuáticas. También reduce el nivel de oxígeno en el agua, lo que puede provocar la muerte de peces y otros organismos acuáticos.

3.1.4. Contaminación visual y olorosa

Además de los impactos físicos, la contaminación visual y los malos olores también son considerados contaminantes físicos. Estos aspectos afectan a la percepción humana del agua, disminuyendo su atractivo para actividades recreativas y turísticas.

Es crucial abordar la contaminación física del agua para preservar los ecosistemas acuáticos y garantizar la disponibilidad de agua segura y limpia para el consumo humano y para otros usos.

4. Contaminantes químicos

Los contaminantes químicos son normalmente originados de desechos domésticos, agrícolas e industriales.

Entre los contaminantes inorgánicos se incluyen una gran variedad de sustancias disueltas, como sales metálicas (cloruros, sulfatos, nitratos, fosfatos y carbonatos), ácidos, bases y gases

tóxicos (dióxido de azufre, amoníaco, sulfuro de hidrógeno, cloro). Los ácidos son especialmente dañinos para la vida acuática y causan la corrosión de los metales. Los metales pesados, como el plomo, el cadmio, el mercurio, el arsénico y el cromo, representan una grave amenaza debido a su toxicidad y persistencia en el ambiente, ya que no se degradan biológicamente. Aunque algunos son nutrientes en bajas concentraciones, se vuelven tóxicos al superar ciertos niveles.

Entre los contaminantes orgánicos, se incluyen residuos humanos y animales, desechos de procesamiento de alimentos, residuos de mataderos, productos químicos industriales, disolventes, aceites, breas, tintes, plásticos y pesticidas. Estos contaminantes reducen el oxígeno en el agua y pueden ser tóxicos para la vida acuática. Algunos de los más dañinos y abundantes son los jabones, los detergentes y los purines.

4.1. Metales pesados

En realidad, el término *metales pesados* no se relaciona tanto con su densidad como con la similitud de sus efectos ambientales a los derivados del uso del plomo y mercurio. En este contexto, el cadmio, por ejemplo, se considera un metal pesado en términos de contaminación ambiental, a pesar de tener una densidad inferior a la del hierro. Los metales pesados incluyen elementos como el plomo, el mercurio, el cadmio, el arsénico y el cromo, entre otros, y son conocidos por su toxicidad incluso en concentraciones muy bajas. Estos contaminantes provienen de diversas fuentes, incluyendo actividades industriales, minería, desechos agrícolas e incluso de la erosión natural de rocas.

Uno de los aspectos más preocupantes de los metales pesados es su capacidad para bioacumularse en los tejidos vivos. Esto significa que, una vez que entran en la cadena alimentaria, se acumulan en concentraciones cada vez mayores a medida que se asciende en la cadena trófica. Por ejemplo, los peces que viven en aguas contaminadas con mercurio pueden acumular niveles peligrosos de este metal en sus cuerpos. Cuando los humanos y otros animales consumen estos peces, también absorben y acumulan el mercurio en sus tejidos, lo que puede llevar a graves problemas de salud.

Los principales metales pesados que actúan como contaminantes en el medioambiente, especialmente en el agua, son (véase tabla 7):

- Plomo. Proviene de tuberías de agua antiguas, pinturas, baterías y actividades industriales. Es tóxico para el sistema nervioso y puede causar varios problemas de salud, especialmente en niños. No se metaboliza y puede excretarse, pero ciertas cantidades se pueden fijar en los huesos debido a que presenta un comportamiento químico similar al del calcio.
- Mercurio. Es cuantitativamente el mayor contaminante de todos los metales. Se origina en la minería (especialmente la extracción de oro), en la quema de carbón y en la incineración de residuos, especialmente algunas pilas y termómetros, aunque las últimas legislaciones han restringido mucho su uso. El mercurio es extremada-

mente tóxico, incluso en pequeñas cantidades, y puede acumularse especialmente en los tejidos grasos de peces y mariscos, entrando de este modo en la cadena alimenticia.

- **Cadmio.** Proviene de fuentes como la minería y la fundición de metales, también del uso en pigmentos para colorantes, en componentes de baterías, así como del uso de fertilizantes fosfatados. El cadmio puede causar daños renales y óseos, y está clasificado como un carcinógeno humano.
- **Arsénico.** Está presente en altas concentraciones en algunas áreas geográficas. También proviene de la minería, de la fundición de metales y del uso de pesticidas. El mecanismo de toxicidad del arsénico es la inhibición de la actividad enzimática. El arsénico es conocido por causar varios tipos de cáncer y problemas en la piel.
- **Cromo.** Utilizado en numerosos procesos industriales, como la fabricación de acero inoxidable, tintes y pigmentos. El cromo hexavalente es especialmente tóxico y puede causar varios tipos de cáncer.

Tabla 7. Origen y efecto de los metales pesados en la contaminación del agua

Elemento	Origen	Efecto
Plomo	Combustión de gasolinas con plomo. Industria. Pinturas.	Tóxico. Anemia. Enfermedades del riñón y del sistema nervioso. Convulsiones.
Mercurio	Combustión de carbones. Residuos industriales. Minería.	Toxicidad aguda y crónica. Temblores. Erupciones cutáneas. Alucinaciones.
Cadmio	Combustión del carbón. Residuos mineros. Chapado de metales. Pigmentos.	Enfermedades cardiovasculares. Hipertensión. Reemplaza bioquímicamente al cinc. Cancerígeno.
Arsénico	Minería. Pesticidas. Residuos químicos.	Tóxico. Posiblemente cancerígeno. Dermatitis. Melanosis.
Cromo	Fabricación de aleaciones. Tintes y pigmentos.	Tóxico. Cancerígeno.



Elemento	Origen	Efecto
◀		
Níquel	Combustión de carbones. Aditivos de gasolinas. Fabricación de aleaciones. Catalizadores.	Cáncer de pulmón. Dermatitis. Dolores de cabeza. Náuseas.
Antimonio	Industria del esmaltado de loza. Baterías. Fabricación de plásticos.	Patología cardíaca.
Selenio	Combustión de carbones y petróleo.	Esencial para la vida, pero en muy pequeñas concentraciones (50-60 µg/día). Tóxico, a altas concentraciones. Tanto en exceso como en defecto, es posiblemente cancerígeno.
Manganeso	Minería. Residuos industriales. Fabricación de aleaciones.	A concentraciones altas, causa daños en el sistema nervioso. Fiebres. Neumonía.
Berilio	Combustión de carbones. Industria nuclear y aeroespacial.	Toxicidad aguda y crónica. Posiblemente cancerígeno. Afecciones pulmonares.
Vanadio	Combustión de carbones y petróleo. Industria.	Inhibe la formación de fosfolípidos.
Platino	Catalizadores de combustión.	Conjuntivitis, dermatitis crónica y asma.

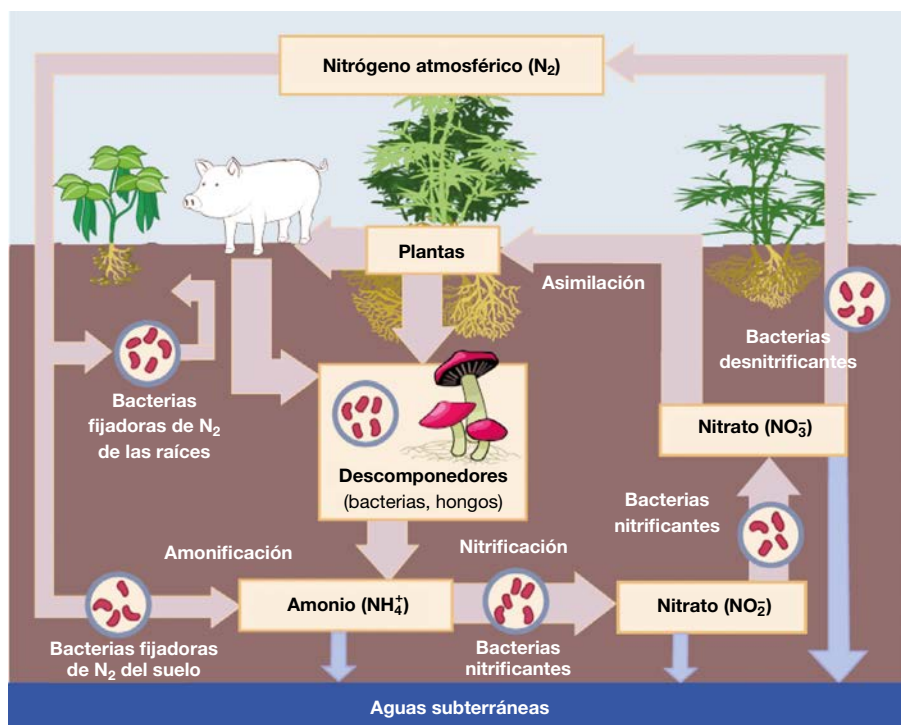
El tratamiento y la eliminación de los metales pesados en las aguas residuales y en los cuerpos de agua sigue siendo uno de los campos de investigación. Se emplean diversas tecnologías, como la precipitación química, la filtración y la adsorción, para eliminar estos contaminantes del agua. Sin embargo, la prevención sigue siendo la mejor estrategia. Esto implica una regulación más estricta de las descargas industriales, prácticas mineras más seguras y una mayor concienciación pública sobre los peligros de la contaminación por metales pesados.

4.2. Purines (nitratos y nitritos)

Los *purines* son excrementos animales mezclados con agua. Al igual que el estiércol, son útiles para fertilizar el suelo, pero usados de forma incorrecta pueden contaminar el agua superficial y subterránea con nitratos (NO_3^-). Si los nitratos superan 50 mg/L, el agua deja de ser potable porque puede producir problemas sanitarios. Los compuestos nitrogenados que se pueden formar son los siguientes:

- Los nitratos (NO_3^-), de por sí, no son tóxicos ni perjudiciales para la salud, pero pueden reaccionar y producir otros compuestos que sí lo son.
- Los nitritos (NO_2^-) son tóxicos debido a que oxidan la hemoglobina de la sangre, lo que impide el transporte de oxígeno desde los pulmones hacia los tejidos.
- Las nitrosaminas son compuestos químicos cuya estructura química es de la forma $\text{R}_1\text{R}_2\text{-N-N=O}$ y la mayoría de ellas son cancerígenas. Se forman por reacción de nitratos y nitritos con aminas.

Figura 6. Ciclo del nitrógeno



Fuente: adaptado de Johann Dréo/Wikimedia Commons (CC-BY-SA-4.0).

En el ciclo de nitrógeno de la figura 6 se muestra el proceso que sigue el nitrógeno durante el tiempo que circula entre la atmósfera y los distintos ecosistemas terrestres y marinos. Normalmente, los purines tienen una gran cantidad de amonio que, por procesos de nitrificación, se transforman en nitratos; posteriormente, en nitritos; y, finalmente, terminan en forma de N_2 , volviendo a la atmósfera. El problema surge en caso de que los nitratos y los nitritos puedan llegar a zonas de aguas subterráneas, contaminándolas.

La diferencia principal entre los purines y otros tipos de excrementos radica en su bajo contenido de materia seca. Los purines están compuestos por diversos elementos contaminantes perjudiciales para el medioambiente, especialmente por un exceso significativo de nitratos (NO_3^-) y fosfatos (PO_4^{3-}). Tanto el nitrógeno como el fósforo son macronutrientes esenciales para la vida de las plantas, pero su exceso puede desencadenar la proliferación descontrolada de vida en el proceso de eutrofización que veremos más adelante. Cuando alguna masa de agua se ve afectada por un exceso de nitratos, dejan de ser potables, ya que estos pueden transformarse en nitritos, y estos sí que son tóxicos, ya que oxidan la hemoglobina impidiendo que transporte el oxígeno a los tejidos, además de estar considerados como probablemente cancerígenos para el ser humano.

En España, la cantidad de aguas afectadas por excesos de nitratos es cada vez mayor, especialmente considerando que en años recientes la tendencia ha empeorado. Ello ha llevado a la introducción de medidas protectoras para evitar que siga este aumento. En el Real Decreto 47/2022, de 18 de enero, sobre protección de las aguas contra la contaminación difusa producida por los nitratos procedentes de fuentes agrarias, se pretende dar solución a la problemática ambiental derivada de la presencia de nitratos en las aguas subterráneas y, además, cumplir con los objetivos fijados por la Unión Europea en esta materia.

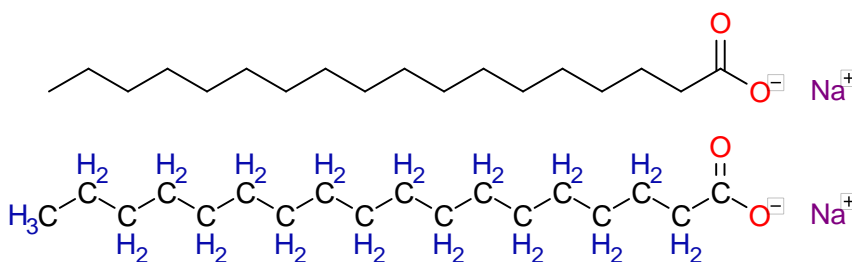
En cuanto a la reducción de purines, actualmente no existe una solución técnica específica. La mayoría de las plantas de tratamiento emplean enfoques muy similares, combinando técnicas populares, como la separación de fases, la nitrificación-desnitrificación y el compostaje. Algunas plantas se centran en tratar los purines para su reutilización como fertilizantes, mientras que otras simplemente los transforman y almacenan, y algunas los convierten en biogás. En el caso de utilizar los purines como fertilizantes, es crucial que se sometan a un tratamiento previo, ya que, de lo contrario, podrían ocasionar contaminaciones graves en los suelos. Durante su tratamiento, se mejora la relación carbono/nitrógeno, al mezclarlos con otros residuos orgánicos, intentando asegurar que su calidad como fertilizante sea óptima.

4.3. Jabones y detergentes

Los *jabones* son sustancias conocidas desde el antiguo Egipto, pero no se extendió su uso hasta el siglo XVIII. Se fabrican por *saponificación*, que es la reacción de una grasa con una base fuerte. La molécula de jabón se compone de una larga cadena de hidrocarburos con un extremo iónico. La parte iónica permite que se pueda enlazar con el agua (recordemos que el agua es una molécula polar) y, por otro lado, la cadena hidrocarbonada puede enlazarse con sustancias orgánicas. Este doble comportamiento que le proporciona propiedades hidrofó-

bicas e hidrofílicas es lo que hace que sean moléculas *anfifílicas*. La cola hidrofóbica, generalmente una cadena de 16-18 átomos de carbono, se disuelve en grasas y aceites, mientras que la cabeza hidrofílica se disuelve en agua. En la figura 7 se muestra la estructura de un jabón típico, el estearato sódico.

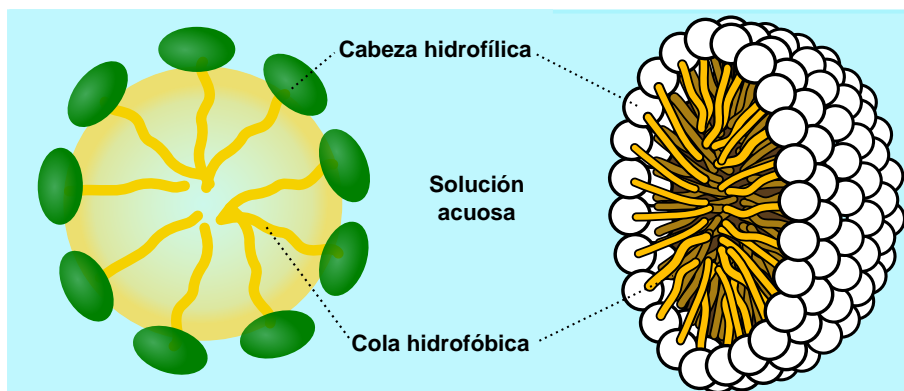
Figura 7. Estructura química del estearato sódico



Fuente: elaboración propia.

Cuando el jabón se mezcla con agua, las colas hidrofóbicas se adhieren a las partículas de grasa y suciedad, mientras que las cabezas hidrofílicas permanecen en contacto con el agua. Esto forma estructuras llamadas *micelas*, en las cuales las colas hidrofóbicas quedan atrapadas en el interior, rodeadas por las cabezas hidrofílicas (véase figura 8). Las micelas permiten que las partículas de grasa se dispersen en el agua, lo que facilita su eliminación al enjuagar.

Figura 8. Estructura de una micela de jabón suspendida en agua

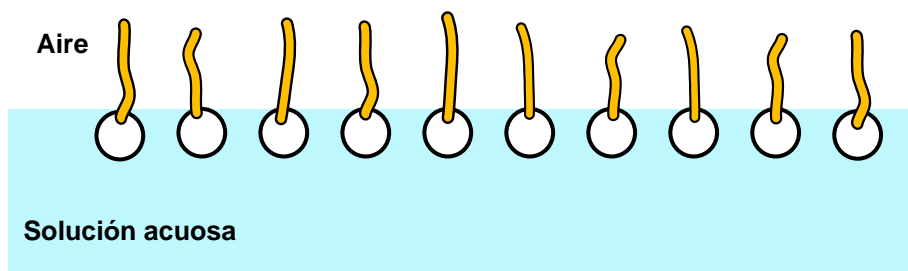


Fuente: elaboración propia.

El problema que tienen los jabones es que, en presencia de iones como el Ca^{2+} o el Mg^{2+} , precipitan, por lo que es necesario una mayor cantidad de jabón para conseguir el efecto de eliminación de grasas deseado.

Los jabones también forman parte de un tipo de compuestos conocidos como *surfactantes*. Los surfactantes son capaces de disminuir la tensión superficial del agua, ya que consiguen romper los puentes de hidrógeno en la superficie aire-agua. Esto lo consiguen al situar las cabezas hidrofílicas en la superficie del agua, mientras que las colas hidrofóbicas se posicionan fuera del agua, como se muestra en la figura 9.

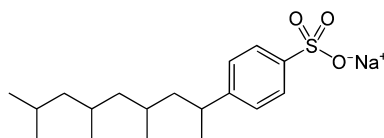
Figura 9. Interacción de un agente surfactante para disminuir la tensión superficial



Fuente: elaboración propia.

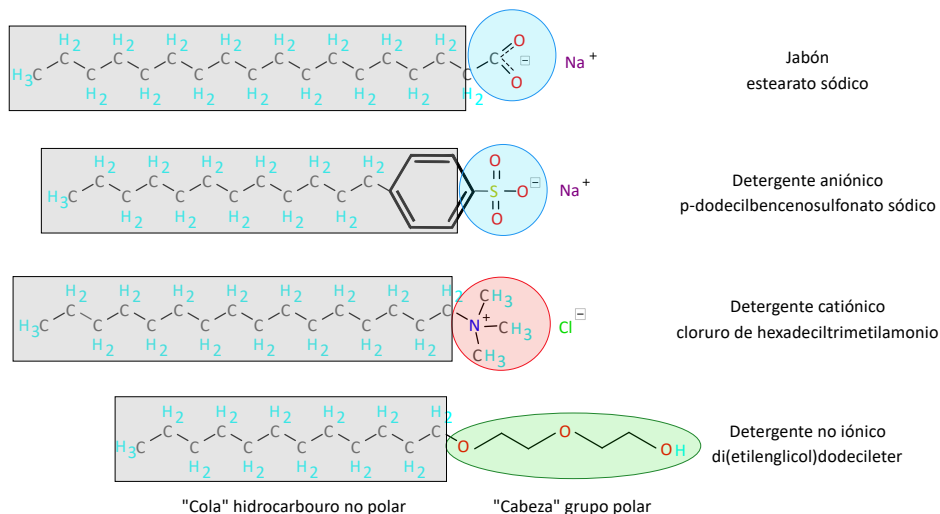
Tras la Segunda Guerra Mundial, con el invento de la lavadora, se desarrollaron los *detergentes*. Estos compuestos no precipitan en aguas duras y el proceso de sintetización parte de compuestos químicos derivados del petróleo. Suelen ser sulfonatos de cadena larga en forma de sales sódicas (RSO_3Na), que son solubles en agua y no precipitan en aguas duras, a diferencia de los jabones. Uno de los primeros detergentes populares fue el sulfonato de alquilbenceno ramificado (véase figura 10). Estas ramificaciones hacen de escudo y los microorganismos no pueden degradar los hidrocarburos ramificados, lo que provoca una gran toxicidad y problemas de contaminación. Desde el año 1965, la industria ha estado trabajando en detergentes biodegradables, como el p-dodecylbencenosulfonato sódico, que, al ser lineal, mejora su compatibilidad ambiental. En la figura 11 se muestra la estructura química de distintos jabones y detergentes.

Figura 10. Sulfonato de alquilbenceno ramificado



Fuente: elaboración propia.

Figura 11. Estructura de varios jabones y detergentes



Fuente: elaboración propia.

Es importante destacar que la contaminación asociada a los detergentes no se debe únicamente a su ingrediente principal o agente de limpieza, sino también a los componentes adicionales, como coadyuvantes, potenciadores y aditivos. Estos elementos adicionales, que incluyen antiespumantes, agentes blanqueadores, suavizantes y fragancias, aportan propiedades beneficiosas al proceso de lavado, pero también pueden contribuir a la contaminación ambiental. Muchos detergentes utilizan fosfatos, fosfonatos o percarboxilatos en su composición. Estos compuestos actúan como fertilizantes de las algas, potenciando el proceso de eutrofización que veremos más adelante.

4.4. Petróleo

La contaminación causada por petróleo crudo o refinado puede producirse tanto de forma accidental, por accidentes en su transporte, como intencionada, fundamentalmente por la limpieza de barcos petroleros. Se estima que cada año se vierten aproximadamente 3 800 millones de litros de petróleo a los océanos como resultado de actividades humanas. De esta cifra, al menos el 22 % se debe a descargas operacionales intencionales de barcos, el 12 % proviene de derrames de buques y el 36 % restante resulta de las descargas de aguas

residuales.

Los daños producidos a la naturaleza son indiscutibles, sobre todo a la flora y fauna marinas, produciendo muerte por asfixia, a la vez que impide la entrada de luz, reduciendo la fotosíntesis y el desarrollo de plantas verdes.

Los impactos del petróleo tienen consecuencias que perduran por décadas. Un año después del derrame del Prestige, la degradación de los hidrocarburos fue mínima, lo que resultó en la contaminación de las costas.

A los diez años del derrame del Exxon Valdez, se comprobó que los peces y mejillones cercanos al área del incidente aún estaban expuestos a residuos de hidrocarburos en el entorno. En otro estudio realizado 17 años después se identificó aún la presencia de contaminación residual originada por ese mismo incidente.

4.5. Pesticidas

Un *pesticida* es una sustancia, o mezcla de varias, que se usa para destruir o regular el crecimiento de plantas (herbicidas) y hongos (fungicidas), así como para prevenir, repeler, destruir o controlar plagas de insectos (insecticidas) y roedores (rodenticidas).

En agricultura prefieren utilizar el término *fitosanitario*. Existen dos tipos:

- Las mezclas químicas, cuyo objetivo es proteger los vegetales y sus productos de organismos nocivos.
- Los que destruyen las plantas, regulan o inhiben la germinación.

El principal problema medioambiental derivado del uso de pesticidas químicos surge debido a la baja biodegradabilidad de muchos de ellos, lo que resulta en su acumulación en el entorno con consecuencias a largo plazo de efectos desconocidos. Otros problemas significativos asociados con su utilización incluyen su toxicidad intrínseca, la posibilidad de bioamplificación², la falta de especificidad para el organismo objetivo y la resistencia desarrollada por dicho organismo al producto (véase tabla 8).

Es relevante recordar que el primer pesticida moderno fue el DDT (diclorodifeniltricloroetano), utilizado por el ejército aliado durante la Segunda Guerra Mundial para controlar el tifus y la malaria.

Después de la guerra, su aplicación se extendió a usos agrícolas, pero, debido a la bioamplificación observada en la mayoría de los países, su uso está actualmente prohibido.

² La *bioamplificación* o *biomagnificación* se refiere al aumento en la concentración de un contaminante a medida que pasa de un nivel trófico a otro, debido a la acumulación del contaminante a través de la cadena alimentaria. Cuando un organismo consume individuos de un nivel trófico inferior, incorpora el contaminante presente en todos esos individuos. Este proceso se repite a medida que un animal se alimenta de ese organismo, causando un aumento gradual en la concentración del contaminante a medida que se avanza en los niveles tróficos.

Tabla 8. Propiedades de algunos pesticidas químicos

Clase	Ejemplos	DL50, mg/kg (ratas)	Persistencia (vida media)	Toxicidad
Hidrocarburos clorados	Aldrín	40	Persistentes (2-5 años).	Relativamente baja para el hombre.
	DDT	250		
	Lindano	125		
Compuestos organofosforados	Paratión	8	Degradables (1-10 semanas).	Alta para el hombre y otros animales.
	Malatión	1500		
Carbamatos	Carbaril	540	Degradables (1 semana).	Diversas, depen- diendo del caso concreto.
	Zentrán	30		
Fenoxiherbicidas	Ácido 2,4 diclorofenoxiacético	–	Moderadamente degradables (2-4 meses).	Baja para el hombre y otros animales.
	Ácido 2,4,5 triclorofenoxiacético	–		

Nota. DL50 es la dosis letal para el 50 % de la población. Se expresa generalmente como la masa de la sustancia administrada por masa de animal sometido al ensayo.

4.6. Plásticos

El plástico es un material asequible, duradero y flexible que se encuentra en todas partes en la vida moderna, desde envases hasta prendas de vestir y productos de belleza. Pero el gran problema es que se desecha de forma masiva. Anualmente, más de 280 millones de toneladas de plásticos de un solo uso terminan en la basura.

Según Naciones Unidas (2022), en total, el 46 % de los desechos plásticos se deposita en vertederos municipales, mientras que el 22 % se gestiona de manera inadecuada y se convierte en basura. A diferencia de otros materiales, el plástico no se biodegrada. La descomposición de un plástico puede tardar cientos de años. Cuando es desechado, se acumula en el medioambiente. Esta contaminación afecta negativamente a la fauna marina, degrada el suelo, contamina las aguas subterráneas y puede llegar a tener consecuencias graves para la salud humana.

El sector de envasado representa la principal fuente de desechos plásticos de un solo uso en todo el mundo. Aproximadamente, el 36 % de la producción total de plásticos se destina a

envases y embalajes. Esto abarca envases de plástico desechables para alimentos y bebidas, de los cuales el 85 % termina en vertederos o se gestiona como residuo de manera inadecuada.

La agricultura es otro ámbito donde el plástico está ampliamente presente, utilizado en diversos productos que van desde recubrimientos de semillas hasta películas de mantillo. La industria pesquera también contribuye significativamente a los desechos plásticos. Estudios recientes sugieren que más de 100 millones de fibras de plástico ingresan a los océanos solo por los aparejos de pesca industrial, como redes y anzuelos. Además, la industria de la moda representa otro gran consumidor de plástico, siendo, aproximadamente, un 60 % de materiales plásticos los utilizados en la confección de ropa, como acrílicos, poliéster y nailon, y muchas de las prendas no son correctamente recicladas y acaban como residuos.

Uno de los problemas principales actualmente son las toneladas de plásticos que acaban en las masas de aguas y que está llevando a introducir legislaciones cada vez más restrictivas en su uso y fabricación. Se estima que en 2019 había 109 Mt de plásticos en ríos y lagos y 30 Mt en el mar (Organisation for Economic Co-operation and Development [OECD], 2022).

4.7. Contaminantes biológicos

Los contaminantes biológicos en el agua representan una amenaza considerable para la salud humana y el equilibrio de los ecosistemas acuáticos. Estos contaminantes, compuestos por organismos vivos o sus productos metabólicos, abarcan bacterias, virus, hongos, parásitos y toxinas biológicas. La presencia de estos agentes patógenos en el agua puede derivar en una serie de problemas de salud y tener impactos negativos en la biodiversidad acuática.

Las fuentes de contaminación biológica en el agua son diversas y pueden originarse tanto por actividades humanas como por factores naturales. Las aguas residuales urbanas, agrícolas e industriales son importantes fuentes de bacterias, virus y parásitos que pueden infiltrarse en los cuerpos de agua.

Existen tres categorías distintas de microorganismos que pueden ser transmitidos a través del agua potable: bacterias, virus y protozoos. En la gran mayoría de los países industrializados, los sistemas de tratamiento del agua destinada al consumo humano han logrado con éxito la práctica eliminación de las bacterias. Sin embargo, no se puede afirmar lo mismo respecto a muchos virus y protozoos, especialmente en su estado de quiste.

4.7.1. Bacterias

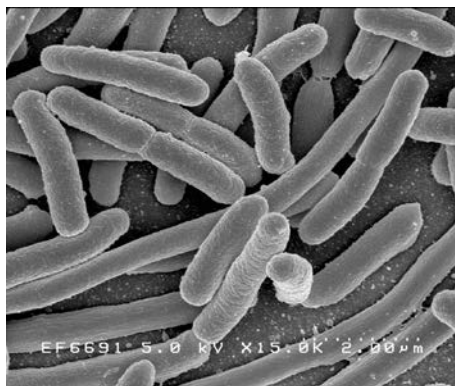
Las bacterias son microorganismos omnipresentes en el ambiente acuático. *Escherichia coli* (*E. coli*), *Salmonella*, *Vibrio cholerae* y *Clostridium perfringens* son ejemplos de bacterias patógenas que pueden contaminar el agua y causar enfermedades gastrointestinales en humanos.

Los sistemas públicos encargados del suministro y la distribución de agua implementan diversas medidas para asegurar la calidad del agua potable. Un paso crucial en estas medidas es la realización periódica de pruebas para detectar la presencia de bacterias coliformes, entre

las cuales destaca la *E. coli* (véase figura 12). Es importante señalar que el riesgo asociado a la presencia de *E. coli* en el agua se deriva principalmente de la alta probabilidad de que los desechos fecales contengan esta bacteria.

La supervivencia de la bacteria *E. coli* en entornos fuera del intestino de los animales, que le proporcionan los nutrientes necesarios (entornos no entéricos), es limitada. Por lo tanto, su detección indica una contaminación reciente, convirtiéndola así en uno de los indicadores más significativos de la calidad del agua en un momento dado.

Figura 12. **Colonia de *Escherichia coli***



Fuente: dominio público.

4.7.2. Virus

Los virus acuáticos, como los norovirus y adenovirus, son responsables de infecciones virales transmitidas por el agua. Estos pueden provocar brotes de enfermedades gastrointestinales en comunidades expuestas.

4.7.3. Parásitos

Los parásitos son organismos que dependen de otros seres vivos, llamados *hospedadores*, para su supervivencia. Ejemplos como *Giardia lamblia* y *Cryptosporidium parvum* son protozoos que pueden contaminar el agua potable y causar infecciones intestinales en humanos.

5. Fenómenos producidos por la contaminación del agua

Las consecuencias de la contaminación del agua pueden dar lugar a una serie de fenómenos ambientales y de salud pública, como la desaparición de la biodiversidad y de los ecosistemas acuáticos, problemas asociados a la alteración de la cadena alimentaria, etc.

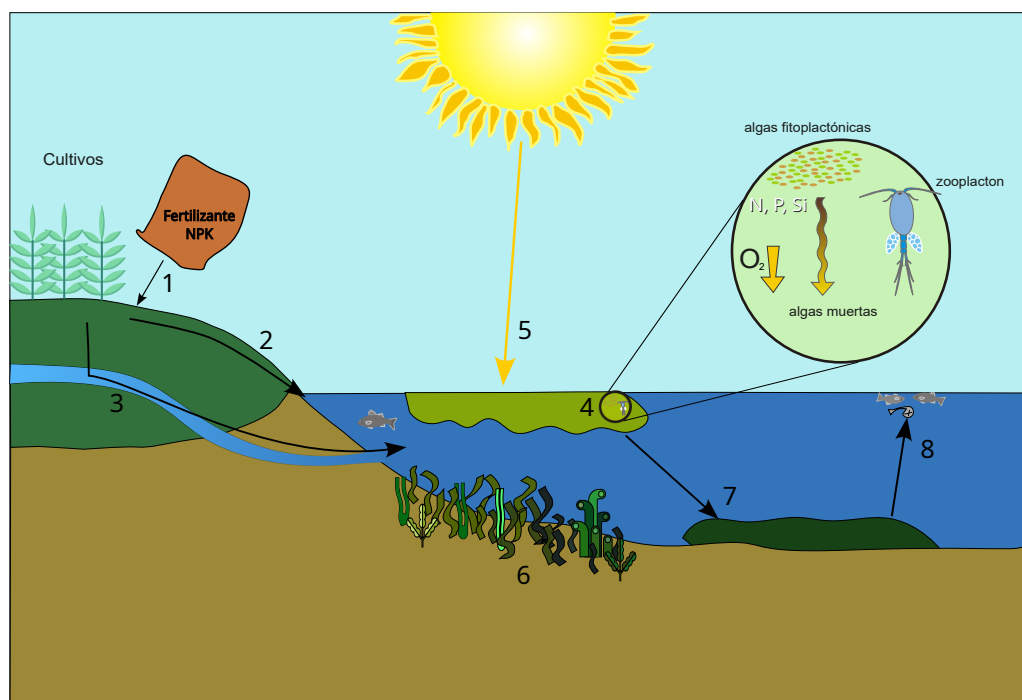
5.1. Eutrofización

Según el Real Decreto 47/2022, de 18 de enero, sobre protección de las aguas contra la contaminación difusa producida por los nitratos procedentes de fuentes agrarias, se define el término *eutrofización* como «el aumento de la concentración de compuestos de nitrógeno y fósforo que provoca un crecimiento acelerado de las algas o plantas acuáticas superiores,

causando trastornos negativos en el equilibrio de las poblaciones biológicas presentes en el medio acuático y en la propia calidad del agua». Este fenómeno puede ocurrir tanto en agua dulce (lagos, ríos, embalses, etc.) como en cuerpos de agua marina.

El término *eutrofización*, de origen griego, significa «bien alimentado». Se refiere a la condición de masas de agua donde hay un exceso de nutrientes que provoca el crecimiento excesivo de algas, lo que puede conducir a un grave deterioro de la vida acuática.

Figura 13. **Proceso de eutrofización**



Nota:

1. Exceso de nutrientes en los cultivos.
2. Algunos nutrientes se escurren por el suelo hacia un cuerpo de agua.
3. Algunos nutrientes se filtran al suelo, donde pueden permanecer durante años. Finalmente, son drenados a un cuerpo de agua.
4. El exceso de nutrientes provoca la proliferación de algas superficiales.
5. La proliferación de algas reduce la penetración de la luz.
6. Las plantas que se encuentran debajo de la floración de algas mueren porque no pueden recibir luz solar para realizar la fotosíntesis.
7. Con el tiempo, la proliferación de algas muere y se hunde hasta el fondo del lago. Las bacterias comienzan a descomponer los restos, consumiendo oxígeno para respirar.
8. La descomposición hace que el agua se quede sin oxígeno. Las formas de vida más grandes, como los peces, mueren asfixiadas. La masa de agua ya no puede sustentar la vida.

Fuente: elaboración propia.

El proceso completo de eutrofización es el que se describe en la figura 13. Los nutrientes provenientes de aguas residuales, de actividades industriales o de fertilizantes se acumulan en las masas de agua provocando un incremento de la biomasa de algas superficiales a través de la fotosíntesis. Esto produce la falta de luz en el fondo, lo que causa una reducción de la biomasa del fondo tanto vegetal como animal, que muere y se deposita en el fondo del lago, descomponiéndose y consumiendo gran cantidad de oxígeno y liberando más nutrientes, como fósforo, nitrógeno y potasio. La eutrofización también puede ocurrir de manera natural. Los nutrientes clave para controlar este proceso son principalmente el fósforo y el nitrógeno, y, en algunas ocasiones, el potasio, el hierro y el silicio, en función del tipo de algas.

5.2. Acidificación

Los organismos acuáticos han desarrollado adaptaciones específicas para sobrevivir dentro de rangos particulares de acidez y salinidad. Por ejemplo, un pez de agua dulce se enfrentaría a problemas osmóticos y, probablemente, moriría al encontrarse en el océano; y, viceversa, un pez de agua salada no estaría adaptado para sobrevivir en agua dulce. Las actividades humanas pueden aumentar la acidez y salinidad del agua. La alcalinidad del agua, aunque menos vinculada a la actividad humana, está más influenciada por el tipo de suelos por los que fluye, aunque en ocasiones la actividad humana puede alterar la geografía del terreno.

La fuente más habitual de contaminantes ácidos proviene de las minas abandonadas de carbón y de la lluvia ácida. En algunas minas se han medido pH inferiores a 3 por la oxidación de los sulfuros de hierro a ácido sulfúrico. Este ácido sulfúrico es capaz de disolver algunos minerales, enriqueciéndose en metales pesados, que aumenta la capacidad contaminante de estas fuentes acuosas, denominada *drenaje ácido de la mina*.

Como ya abordamos en el capítulo anterior, algunas industrias contribuyen al incremento de la acidez con la emisión de óxidos de azufre y nitrógeno, que se transforman en ácidos y se introducen en las aguas naturales a través de la lluvia ácida. Es importante señalar que el agua que se evapora, ya sea desde el océano o desde áreas terrestres, regresa en forma de lluvia. Esta lluvia, al disolver, reaccionar o arrastrar compuestos presentes en la atmósfera, no es agua pura, sino más bien una solución de diversos compuestos. En promedio, el pH de la lluvia es aproximadamente 5,7, lo que indica una ligera acidez debido al CO₂ presente en la atmósfera (véase apartado 2.3.2). En zonas industrializadas, se ha observado un aumento de acidez con un pH que oscila entre 3 y 5.

5.3. Contaminación por microplásticos

La contaminación por microplásticos se refiere a la presencia de diminutas partículas de plástico, con dimensiones que oscilan entre 1 micrómetro y 5 milímetros, en entornos naturales.

Estos microplásticos pueden clasificarse en los *microplásticos primarios*, que se producen originalmente en estas dimensiones, y los *microplásticos secundarios*, que resultan de la descomposición de plásticos más grandes.

Las fuentes principales de los microplásticos son:

- Descomposición de productos de plástico. Como ya se comentó en el apartado 4.6, una considerable cantidad de plástico termina contaminando los océanos y los mares. El agua, la radiación solar, el viento y los microorganismos contribuyen a la descomposición de los desechos plásticos arrojados al océano, transformándolos en microplásticos.
- Fibras de ropa. Según un estudio de Boucher y Friot, los microplásticos también proceden del lavado de ropa. Cada vez que se lava una prenda, aproximadamente 700 000 fibras microscópicas son liberadas hacia los océanos. Además, en el estudio realizado por la Institution of Mechanical Engineers, se resalta que alrededor del 35 % de los microplásticos que son liberados en los océanos a nivel mundial provienen de textiles sintéticos.
- Fragmentación de artículos de caucho. Es una fuente importante de microplásticos. Estos pequeños fragmentos provienen principalmente del desgaste de neumáticos de vehículos y de la descomposición de productos de caucho utilizados en diversas aplicaciones. Durante el uso normal, los neumáticos se desgastan, liberando partículas microscópicas de caucho en el aire y en las carreteras, las cuales luego son llevadas a los cursos de agua y a los suelos a través de la escorrentía y de procesos atmosféricos.
- Residuos de cosméticos y productos de cuidado personal. Son una fuente notable de microplásticos en el medioambiente. Estos microplásticos, a menudo denominados *microperlas*, son pequeñas partículas de plástico que se añaden intencionalmente a muchos productos cosméticos y de cuidado personal, como exfoliantes faciales y corporales, pastas dentales y algunos tipos de maquillaje. Las microperlas en cosméticos y productos de cuidado personal suelen ser de polietileno (PE), pero también pueden estar hechas de otros plásticos, como polipropileno (PP), polimetilmetacrilato (PMMA) y nailon. Tras su uso, estas partículas se van por el desagüe y, debido a su tamaño diminuto, con frecuencia no son capturadas por los sistemas de tratamiento de aguas residuales, llegando a ríos, lagos y océanos.

Un reciente estudio estima en más de 170 billones las partículas de plástico que están flotando en los océanos del mundo. Todas estas partículas de microplásticos pueden ser ingeridas por diversas formas de vida marina, como el plancton, los bivalvos, los peces e incluso las ballenas, quienes las confunden con alimentos y de esta forma entran en la cadena trófica.

Según un estudio de 2019 realizado por Cox en Estados Unidos, el consumo anual de microplásticos puede variar entre las 39 000 y las 52 000 partículas en función de la edad y el sexo, y aumenta en caso de beber agua embotellada. En el caso de la inhalación, se estimó entre 74 000 y 121 000 partículas anuales.

6. Tratamiento de aguas

El concepto de *tratamiento de aguas* abarca una serie de operaciones que pueden ser de naturaleza física, química, fisicoquímica o biológica. Su propósito fundamental es la eliminación o la reducción de la contaminación y de las características no deseadas que están presentes en diversos tipos de aguas, ya sean naturales, de abastecimiento, de procesos industriales o residuales, siendo estas últimas conocidas como *aguas negras* en el ámbito urbano. El objetivo final es transformar estas aguas en recursos que cumplan con las especificaciones requeridas para su uso final, lo cual implica una adaptación de los procesos en función de las propiedades del agua original y de su destino final.

Dado que las demandas más rigurosas en cuanto a la calidad del agua están centradas en su aplicación para el consumo humano y animal, se establece comúnmente una distinción entre tratamientos de potabilización y tratamientos de depuración de aguas residuales. Aunque ambos compartan varias operaciones, sus enfoques difieren según los requisitos específicos de cada caso.

Los *tratamientos de potabilización* se orientan hacia la preparación del agua para el consumo humano y animal. Este proceso se lleva a cabo en las estaciones de tratamiento de agua potable (ETAP) e implica una serie de operaciones diseñadas para garantizar que el agua sea segura y cumpla con los estándares establecidos para el consumo. Algunas de las operaciones comunes en los tratamientos de potabilización incluyen:

- Coagulación y floculación. La adición de coagulantes y floculantes ayuda a aglutinar partículas en suspensión, facilitando su posterior eliminación.
- Sedimentación. Las partículas aglutinadas sedimentan, permitiendo la separación del agua clarificada.
- Filtración. El agua clarificada pasa a través de filtros para eliminar partículas más pequeñas y asegurar una mayor pureza.
- Desinfección. Métodos como la cloración o la radiación ultravioleta se utilizan para eliminar microorganismos patógenos.

Los parámetros y los valores paramétricos están fijados por el Real Decreto 3/2023, de 10 de enero, por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro, y cuyos valores se incluyen en el anexo 1 de este capítulo.

En contraste, los *tratamientos de depuración de aguas residuales* están destinados a reducir la carga contaminante en las aguas usadas antes de devolverlas al medioambiente. Estos tratamientos se realizan en las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) y abarcan una variedad de procesos que buscan minimizar el impacto ambiental de estas aguas. Algunas de las operaciones comunes en los tratamientos de depuración incluyen:

- Tratamiento primario. Comprende procesos físicos, como la filtración y sedimentación para eliminar sólidos en suspensión.

- Tratamiento secundario. Se centra en procesos biológicos, como la biodegradación por microorganismos, para reducir la carga orgánica.
- Tratamiento terciario. Puede implicar procesos avanzados, como la filtración adicional o la desinfección para eliminar contaminantes residuales.

Algunas de las etapas realizadas en ambas estaciones son comunes.

6.1. Estaciones de tratamiento de agua potable (ETAP)

De acuerdo con las directrices de calidad del agua establecidas por la Organización Mundial de la Salud, el agua debe cumplir con varios requisitos para ser considerada potable. Un aspecto evidente a simple vista es que el agua potable debe ser incolora, inodora e insípida. Además, no debe contener sustancias perjudiciales para la salud, ya sean contaminantes biológicos, químicos o radiactivos. También se requiere una proporción adecuada de gases y sales minerales disueltas.

Una gran porción del agua dulce disponible en el planeta no es apta para el consumo directo y requiere someterse previamente a un proceso de potabilización. La conversión del *agua bruta* extraída de embalses y otras fuentes en *agua apta* que sea segura para el consumo humano implica una labor de gran responsabilidad, tanto en términos sanitarios como medioambientales.

Las ETAP implementan diversos procesos para convertir el agua bruta en agua potable, segura y apta para el consumo humano. Estos procesos pueden variar según la calidad del agua de entrada y los estándares locales, pero, en general, incluyen los que describimos a continuación.

6.1.1. Captación y pretratamiento

El primer paso es la captación del agua bruta desde fuentes como embalses, ríos o pozos. A continuación, se procede al desbaste y tamizado, que consiste en la retención de sólidos grandes mediante rejas y tamices. Posteriormente, el agua pasa a los desarenadores, para eliminar partículas en suspensión gruesas (arenas, limos y arcillas), de granulometría superior a 200 μm . Para ello se produce una disminución de la velocidad de flujo, con la finalidad de que se puedan depositar los granos de arena por gravedad, pero evitando que se deposite materia orgánica que pueda producir una fermentación. Los desarenadores pueden ser de flujo vertical, flujo horizontal o flujo inducido.

6.1.2. Preoxidación

Se introduce en el agua un agente químico oxidante. Este es capaz de eliminar cualquier materia que pueda oxidarse, tanto orgánica como inorgánica. Las sustancias que se suelen

usar como oxidantes son el cloro (Cl_2) y sus derivados, principalmente hipoclorito de sodio (NaClO) o dióxido de cloro (ClO_2), permanganato de potasio (KMnO_4), ozono (O_3) y agua oxigenada (H_2O_2), bien solos o en combinación.

Esta preoxidación se lleva a cabo al inicio de la planta de tratamiento para asegurar una desinfección preliminar con la finalidad de evitar la contaminación de equipos y conductos, particularmente en relación con la legionela.

6.1.3. Coagulación y floculación

Este proceso está diseñado para eliminar partículas que dan turbidez al agua. Son partículas en suspensión demasiado pequeñas para que decanten por gravedad. Estas partículas suelen tener carga (generalmente negativa), lo que hace que se repelan entre ellas y por ello no se agrupen.

La coagulación tiene el efecto de desestabilizar las cargas de las partículas en suspensión. Se añaden coagulantes con cargas opuestas a las de los sólidos en suspensión para neutralizar las cargas que rodean a partículas dispersas, como arcilla y sustancias orgánicas.

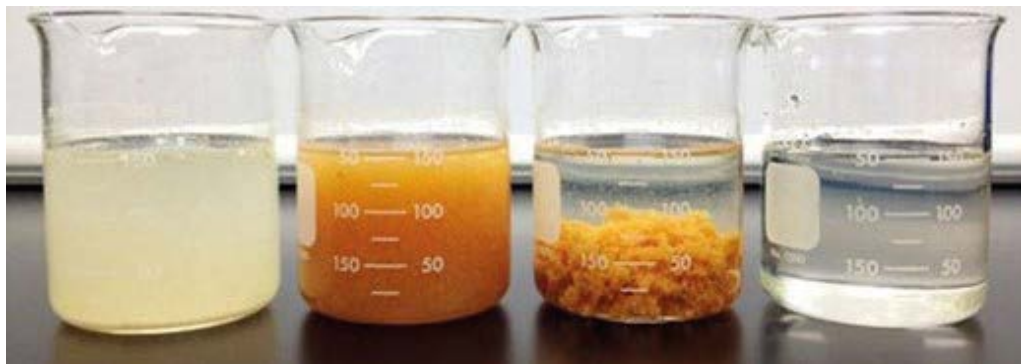
Una vez que se neutralizan las cargas, las partículas suspendidas pequeñas pueden unirse entre sí, formando microflóculos que son demasiado pequeños para ser visibles a simple vista. Se requiere una agitación rápida y de alta energía para dispersar eficazmente el coagulante y favorecer las colisiones de partículas, logrando así una coagulación adecuada y la formación de microflóculos. El exceso de agitación no afecta a la coagulación, pero la falta de ella deja este paso incompleto.

Después de la coagulación, sigue la etapa de floculación, donde se realiza una mezcla suave para aumentar el tamaño de los microflóculos a partículas suspendidas visibles. La velocidad de agitación es muy importante (véase figura 14).

Estos microflóculos entran en contacto mediante una mezcla lenta, provocando que se unan y formen flóculos más grandes y visibles. Si la agitación es demasiado rápida, se rompen por choques entre ellos. El tamaño del flóculo sigue aumentando debido a colisiones, dando lugar a macroflóculos.

En esta etapa, se pueden agregar floculantes, polímeros de alto peso molecular, para fortalecer y unir los flóculos, así como para incrementar su peso y velocidad de sedimentación. Una vez que el flóculo ha alcanzado su tamaño y resistencia óptimos, el agua está lista para el proceso de separación, ya sea sedimentación, flotación o filtración.

Por tanto, el proceso global se basa en la neutralización de las cargas eléctricas negativas de las partículas que mantienen a estas partículas coloidales separadas. Al neutralizar estas cargas, se altera el equilibrio y las partículas se agrupan, incrementando su tamaño y facilitando la decantación. Inicialmente, es necesaria una agitación rápida para que el coagulante se disperse y, luego, una agitación lenta para facilitar que las partículas se unan y formen los flóculos.

Figura 14. **Proceso de coagulación-floculación**

Fuente: <https://bioquimia.es/pi/coagulantes/>.

6.1.4. Decantación o sedimentación

Se hace pasar el agua a través de clarificadores o sedimentadores, donde se disminuye la velocidad de flujo para facilitar que los flóculos se depositen en el fondo, formando lodos sedimentados.

6.1.5. Filtración

El agua se hace pasar a través de filtros de arena o membranas para eliminar las partículas más pequeñas y los sólidos suspendidos restantes. En este procedimiento, se retienen las partículas diminutas que no fueron eliminadas durante la sedimentación anterior. Dichas partículas de menor tamaño quedan atrapadas en los espacios existentes entre los granos de arena cuando el agua fluye a través de un lecho de este material.

El lecho de filtración acumula gradualmente sedimentos al retener sólidos, por lo que es necesario llevar a cabo un proceso de lavado del filtro mediante la introducción de aire a presión o introduciendo una corriente de agua tratada en sentido contrario al flujo normal con el fin de eliminar los sólidos retenidos y restaurar el funcionamiento normal del filtro.

6.1.6. Desinfección

El propósito de la desinfección del agua es eliminar o desactivar los microorganismos dañinos, patógenos o, simplemente, indeseables, que no han sido eliminados en las etapas anteriores del tratamiento del agua. Es importante destacar que la desinfección no conlleva la destrucción de todos los organismos vivos, proceso que se conoce como *esterilización*.

El proceso conlleva la aplicación de desinfectantes, como ozono, cloro o radiación ultravioleta, para eliminar o inactivar microorganismos patógenos presentes en el agua. A veces son necesarios tratamientos adicionales como los siguientes:

- Filtración mediante carbón activado. Retiene las moléculas que pueden causar malos olores y sabores en el agua en sus microporos internos. El carbón puede utilizarse en forma de polvo o granos.
- Ablandamiento. Se realiza en zonas de aguas duras para eliminar las sales de calcio y magnesio. Este procedimiento no solo mejora la calidad del agua, sino que también previene posibles problemas en la red de distribución, como la formación de incrustaciones de cal.

6.1.7. Ajuste de pH

Finalmente, a veces es necesario realizar un ajuste final del pH para garantizar que esté dentro de unos límites aceptables. En caso de ser necesario, suele ser por un exceso de acidez, que se regula mediante la incorporación de reactivos químicos adecuados, como hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) o hidróxido de sodio (NaOH). Otro de los propósitos es evitar la corrosión o que se produzcan incrustaciones en las tuberías.

6.1.8. Almacenamiento y distribución

Una vez que el agua ha sido tratada y purificada, se traslada a depósitos conectados a la red de suministro. Este proceso tiene un doble propósito: en primer lugar, garantizar un suministro continuo de agua potable bajo condiciones controladas y, en segundo lugar, asegurar la disponibilidad de agua para el futuro aprovechando los excedentes que superen las necesidades actuales de abastecimiento. Estos depósitos se encuentran estratégicamente distribuidos en diversos puntos, desde los cuales se realiza el suministro utilizando sistemas de bombeo o aprovechando la gravedad, especialmente cuando están ubicados en terrenos elevados.

En la tabla 9 se muestra un ejemplo de las 14 ETAP para el abastecimiento de agua de la Comunidad de Madrid que trata el Canal de Isabel II.

Tabla 9. **ETAP de la Comunidad de Madrid**

Denominación	Fecha de entrada en servicio	Capacidad máxima en servicio de tratamiento (m^3/s)	Capacidad máxima de tratamiento (m^3/d)
Colmenar	1976	16,0	1 382 000
El Bodonal	1969	4,0	346 000



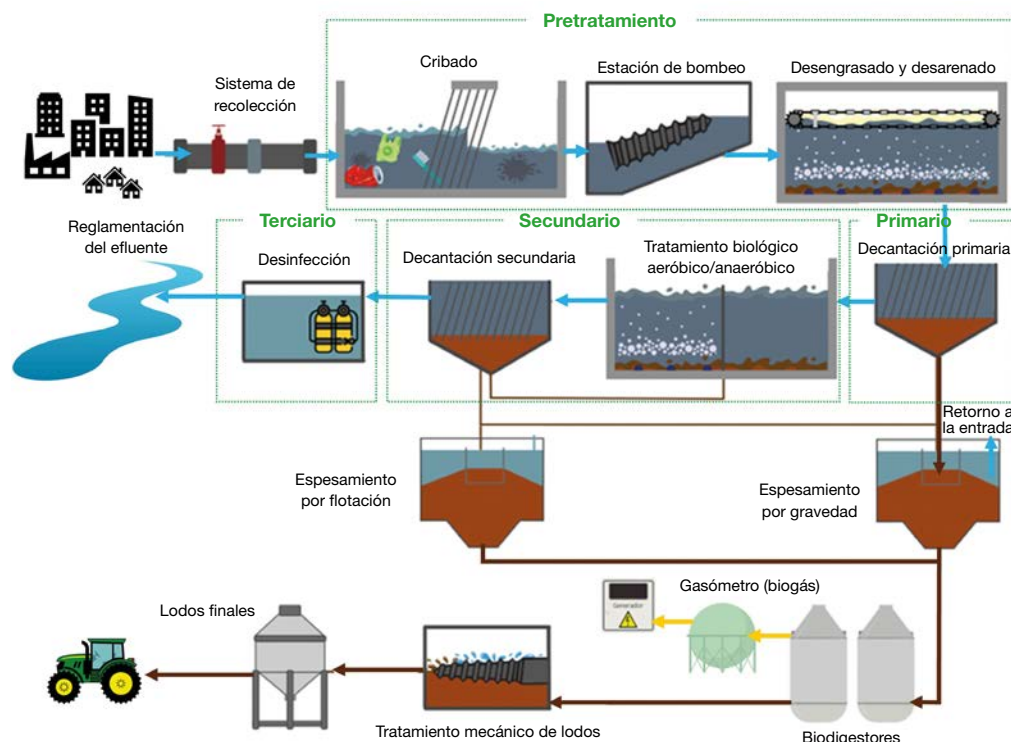
Denominación	Fecha de entrada en servicio	Capacidad máxima en servicio de tratamiento (m ³ /s)	Capacidad máxima de tratamiento (m ³ /d)
Grinón	2008	0,94	81 000
La Aceña	2000	0,5	43 000
La Jarosa	1969	1,5	130 000
Majadahonda	1967	3,8	328 000
Navacerrada	1969	1,0	86 000
Pelayos	2016	0,332	29 000
Pinilla	1992	0,416	36 000
Rozas de Puerto Real	1988	0,175	15 000
Santillana	1972	4,0	346 000
Torrelaguna	1967	6,0	518 000
Valmayor	1976	12,0	1 036 000
Tajo	2010	2,0	173 000
Total		52,331	4 520 000

6.2. Estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR)

Después de ser utilizada en diversos hogares e industrias, el agua es recolectada por la red de saneamiento, compuesta por una serie de tuberías y canalizaciones destinadas a recoger y llevar el excedente de agua y los desechos (aguas residuales) desde cada residencia hasta las EDAR, donde se inicia un proceso integral de tratamiento para obtener agua apta para su retorno a la naturaleza. Este proceso abarca diversas fases y se basa en técnicas físico-químicas y biológicas, que incluyen desbaste, desengrasado, decantación, fangos activos, reactor biológico, biodiscos, microfiltración, entre otras. El objetivo es eliminar y/o reducir los contaminantes potencialmente perjudiciales para el entorno natural. Gracias a estas ins-

talaciones, logramos tanto la reutilización del recurso depurado como su reintegración al medioambiente con el mínimo impacto posible. En algunas de ellas, las más modernas, se obtiene energía a partir de la generación de biogás. En la figura 15 se puede observar un esquema general de una EDAR en el que se muestran todas las etapas.

Figura 15. Diagrama general de procesos de una EDAR



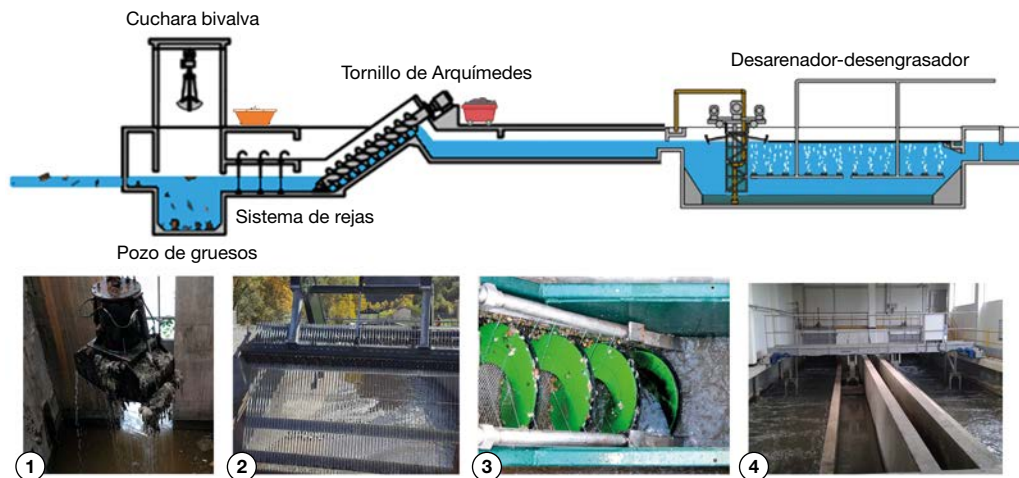
Nota. Esquema general de los procesos que componen el funcionamiento global de una EDAR, donde las flechas azules indican la línea de aguas; las marrones, la línea de fangos; y las amarillas, la línea de gases. Dentro de la línea de tratamiento de aguas, los procesos se suelen dividir en cuatro etapas, que incluyen el pretratamiento, el tratamiento primario, el tratamiento secundario y el tratamiento terciario (marcadas con recuadros verdes).

Fuente: elaboración propia.

6.2.1. Pretratamiento

Esta fase se enfoca en la eliminación de partículas y sustancias gruesas que podrían causar problemas en etapas posteriores del proceso de tratamiento.

Figura 16. Esquema de procesos de pretratamiento en una EDAR

**Nota:**

1. Pozo de gruesos con recogida de sólidos mediante una cuchara bivalva.
2. Sistema de rejās para la retención de sólidos.
3. Tornillo de Arquímedes.
4. Desarenador-desengrasador.

Fuente: elaboración propia.

En la figura 16 se muestra un esquema simplificado de estos procesos en el que se identifican varios sistemas y elementos:

- Pozo de gruesos. Situado al inicio del sistema de recolección de aguas residuales, este pozo tiene un fondo tronco-piramidal invertido y paredes inclinadas para concentrar sólidos y arenas decantadas en un área específica, facilitando su extracción con cucharas anfibia.
- Desbaste. Este proceso implica la separación del agua residual de sólidos como piedras, ramas, plásticos y trapos mediante rejās de gruesos (separación entre 5 y 15 cm) y de finos (separación entre 5 y 15 cm), tamices (huecos entre 0,2 y 6 mm) y tornillos de Arquímedes.
- Desarenado y desengrasado. El desarenado elimina partículas inertes y pesadas con granulometría superior a 200 μm , para evitar la acumulación de sedimentos en canales y conductos, proteger las bombas y prevenir sobrecargas en fases posteriores. Estas partículas inertes son mayores que las partículas orgánicas. Las partículas orgánicas no queremos eliminarlas en esta etapa, ya que interesa procesarlas en etapas posteriores. El desarenador se diseña para que las partículas sedimenten en menos de 2-3 min, que es el tiempo medio de residencia para este

tratamiento. Hay dos tipos de desarenadores: estáticos y aireados. Normalmente, en el mismo equipo se produce el desengrasado, que, también por diferencia de densidad, tiene como objetivo eliminar materias flotantes, más ligeras que el agua, las cuales, mediante unas rasquetas, son barridas hacia un cajón de recogida, evitando interferencias en los procesos de tratamiento posteriores.

6.2.2. Tratamiento primario

El objetivo principal del tratamiento primario es la eliminación de sólidos en suspensión, siendo menos efectivo en la eliminación de la materia orgánica.

Este tratamiento se compone de lo que se denomina *decantación primaria*, que consiste en reducir los sólidos en suspensión mediante la acción de la gravedad, de la cual salen fangos que se deben llevar a un digestor, normalmente anaeróbico, para la producción de biogás. Esta decantación primaria no está en todas las EDAR, sobre todo en las pequeñas, en las que no hay aprovechamiento por biogás.

Los decantadores pueden ser circulares o rectangulares, aunque los circulares son los más extendidos (véase figura 17). La entrada de agua se realiza por un conducto situado en la parte central, desde abajo. Cuando llega a la parte superior hay una especie de campana que sirve para disminuir la velocidad de flujo del agua. Una vez en el interior, el agua circula desde el centro hacia el exterior, con una velocidad muy lenta, para que no se produzca el arrastre de partículas y estas puedan sedimentar en el fondo del decantador. En el fondo se disponen unas rasquetas que, por medio del giro, mueven los fangos hacia el centro, por donde se extraen estos y son conducidos hacia el espesador.

En el mismo decantador primario también pueden usarse dos procesos simultáneos. Se trata de hacer un tratamiento fisicoquímico para eliminar más materia orgánica, eliminando partículas coloidales. Este tratamiento consiste en la desestabilización de estas partículas, en su agregación y en su posterior separación del agua, similar a la coagulación-floculación de las ETAP. En este caso, el diseño del decantador es algo distinto, siendo un poco más complejo, ya que necesita de una zona de agitación rápida para producir la coagulación; de otra zona de agitación menor, donde se produce la floculación; y de otra zona con una velocidad de flujo muy lenta, donde se produce la sedimentación. Se suelen usar en depuradoras que reciben vertidos industriales o en depuradoras de zonas turísticas.

Figura 17. Decantador primario



Fuente: elaboración propia.

Además de los decantadores tradicionales, existen decantadores de placa inclinada (o lamelares). Unas placas dispuestas de forma inclinada, por las que atraviesa el agua con las partículas, ayudan a que estas últimas se depositen.

6.2.3. Tratamiento secundario

El tratamiento secundario, también llamado *tratamiento biológico*, es el corazón de la EDAR, cuyo objetivo principal es la reducción de materia orgánica DBO5 y DQO (véase apartado 2.6). Gracias al desarrollo de distintos tipos de bacterias se pueden lograr rendimientos de eliminación de hasta el 95 %. También se elimina nitrógeno y fósforo.

El proceso biológico consta de dos partes: un reactor y un decantador secundario. En el reactor, los microorganismos utilizan los contaminantes del agua como alimento, lo que hace que estos contaminantes desaparezcan a medida que crecen los microorganismos. Luego, los microorganismos se eliminan del agua en el decantador secundario. Al final del proceso, el agua no contiene contaminantes ni microorganismos, ya que la biomasa formada se ha sedimentado.

Los objetivos del tratamiento secundario son varios:

- Eliminar la materia orgánica presente en las aguas residuales es el principal objetivo.
- Eliminar el amonio, ya que estos compuestos, al ser vertidos en el medio natural, consumen oxígeno, afectando a la fauna piscícola y a la vida acuática en general. Por lo tanto, se busca su eliminación en la planta de tratamiento.
- Eliminar nutrientes como nitrógeno y fósforo para prevenir la eutrofización en los cuerpos receptores, como lagos y embalses. La acumulación excesiva de estos nutrientes podría dar lugar a un crecimiento descontrolado de algas.
- Aunque no se elimina completamente, se produce una cierta reducción de patógenos en el proceso biológico debido al desarrollo de protozoos que se alimentan de estos microorganismos. Sin embargo, se requiere una desinfección posterior para alcanzar niveles óptimos de eliminación de patógenos.

En el proceso biológico –el más habitual es el denominado de *fangos activos*³–, se producen procesos bioquímicos fundamentales que consumen los contaminantes presentes en el agua. Se realiza en una especie de piscina por donde circula el agua en condiciones controladas de oxígeno y otros parámetros. Para ello se disponen en el fondo unos difusores de aire para poder oxigenar el agua a su paso (véase figura 18). Los contaminantes se utilizan para el crecimiento y aumento en el número de células de los microorganismos presentes. Durante el proceso de crecimiento, se forman bacterias filamentosas que se van agregando unas a otras

³ Un *fango activo* consiste en partículas de lodo que han proliferado a partir de materia orgánica presente en aguas residuales. Este sedimento se califica como *activo* debido a que las partículas albergan microorganismos tales como hongos, bacterias y protozoos.

formando bioflóculos. Esto se debe a la formación de una sustancia pegajosa que permite que las bacterias se adhieran entre sí y formen estos flóculos. Posteriormente, van creciendo y resultando en flóculos cada vez más grandes y densos. Estos, finalmente, sedimentan con facilidad en el decantador secundario.

Es esencial que se produzca una adecuada biofloculación y la presencia de bacterias filamentosas para garantizar una sedimentación efectiva. Cualquier fallo en estas etapas puede llevar a problemas de sedimentación, lo que impactaría negativamente en la calidad del efluente tratado.

Los métodos utilizados para mantener los microorganismos incluyen:

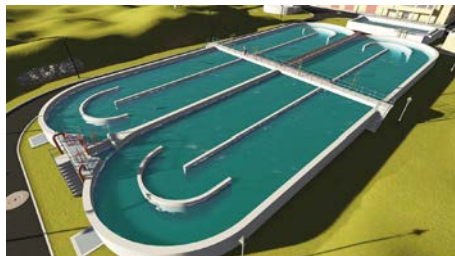
- Cultivo en suspensión. Sería en la propia agua, sin ningún tipo de soporte.
- Cultivo fijo o en soporte. Existe un soporte, que puede ser una grava o un plástico, sobre el cual se desarrolla la biomasa, formando una biopelícula de pequeño espesor (1-2 mm).

En la mayoría de las estaciones, se reducen también los nutrientes, como el nitrógeno y el fósforo, para evitar posibles problemas posteriores de eutrofización.

Los compuestos de nitrógeno son variados: ureas, amoníaco (NH_3), iones amonio (NH_4^+), nitrato, (NO_3^-) y nitrito (NO_2^-). Para eliminar estos compuestos se busca producir nitrógeno gas N_2 , para lo cual se deben producir una serie de transformaciones que llevan a cabo distintas bacterias. Algunas necesitan ambiente aerobio y otras, anaerobio. Estas transformaciones que se muestran en la figura 19 se realizan en el reactor. Las reacciones son realizadas mediante la acción metabólica de microorganismos, la nitrificación por aeróbicos y la desnitrificación por anóxicos.

Los compuestos de fósforo en el agua residual suelen estar en forma de ortofosfatos (PO_4^{3-}), de pirofosfatos ($\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$) y de compuestos orgánicos. En gran medida, el fósforo proviene del uso de detergentes sintéticos y de su uso para el control de la corrosión en los sistemas de distribución de agua potable. Los microorganismos que degradan la materia orgánica emplean el fósforo en procesos vitales como la síntesis y el mantenimiento celular, así como en el transporte de energía. Esto conlleva que entre un 10 % y un 30 % del fósforo total contenido en el agua residual se retire como nutriente durante el tratamiento biológico. No obstante, para alcanzar niveles más bajos de fósforo en el efluente se requiere una eliminación adicional, incluso por encima de las cantidades necesarias, en situaciones donde las bacterias puedan absorber más fósforo del necesario. Para ello es necesario un tipo de microorganismos

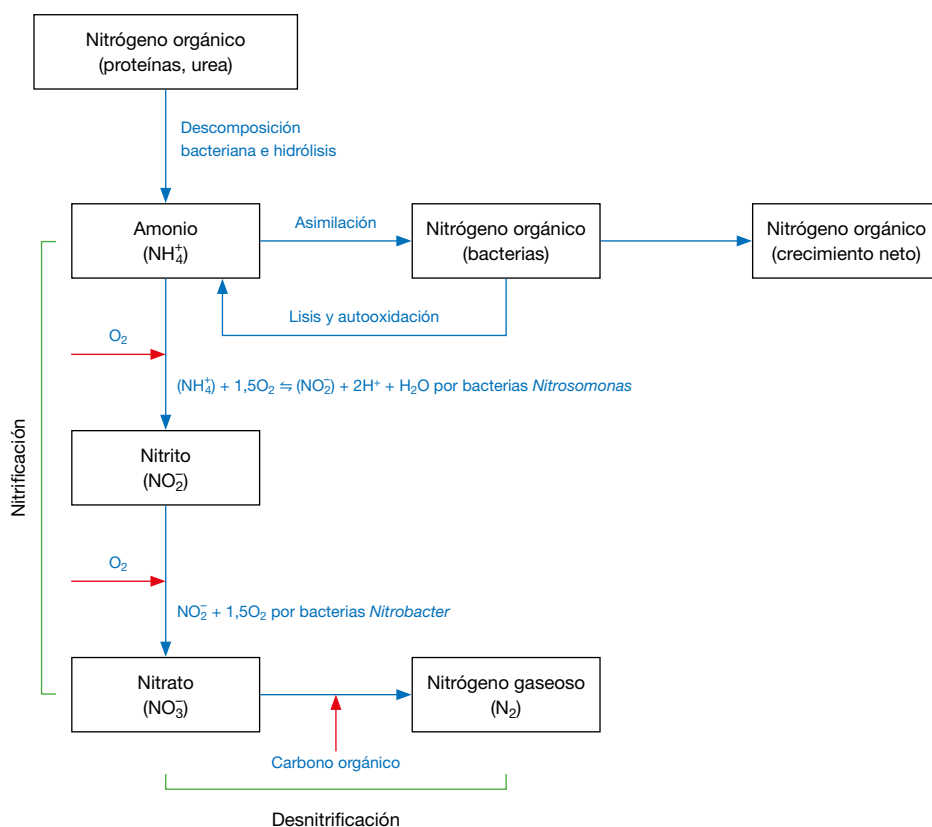
Figura 18. Infografía del reactor biológico de una EDAR



Fuente: <https://autodidactaengeomatica.blogspot.com/2016/01/edar-virtual-parte-iv-tratamiento.html>.

que pueden acumular fósforo en condiciones aeróbicas o anóxicas. Otra vía de eliminación del fósforo es por precipitación con reactivos químicos. Este proceso de precipitación química ocurre por reacciones del ortofosfato con iones metálicos (normalmente Fe^{3+} , Fe^{2+} y Al^{3+}) para dar lugar a sales metálicas insolubles. En la figura 19 se muestra un esquema del proceso seguido en una EDAR para la eliminación de los compuestos nitrogenados.

Figura 19. Esquema sobre la transformación de varias formas de nitrógeno en procesos de tratamiento biológico



Fuente: adaptado de Chen *et al.* (2006) y Crites y Tchobanoglous (1998).

Posteriormente, se lleva a cabo una decantación secundaria para eliminar los flóculos formados. Se emplean decantadores similares a los mencionados anteriormente en el tratamiento primario (véase apartado 6.2.2). Los lodos obtenidos tanto en el decantador secun-

dario como en el primario pasarían al espesador.

6.2.4. Tratamiento terciario

Los propósitos principales de esta etapa son:

- Eliminar sólidos suspendidos y sólidos coloidales que se escapan del decantador secundario.
- Eliminar materia orgánica y nutrientes, nitrógeno y fósforo.
- Eliminar microorganismos patógenos.

Se asemejan en gran parte a los que se realizan en las ETAP descritas anteriormente, por lo que las explicaremos de forma resumida.

6.2.4.1. Filtración

El primer proceso para eliminar sólidos consiste en una filtración, similar al de una ETAP (véase apartado 6.1.5). Para ello se hace pasar el agua a través de unos filtros que pueden ser:

- Material granular. Normalmente, arena a baja velocidad (inferior a 15 m/h).
- Membranas. Cada vez son más frecuentes.

En ambos casos estos filtros se van obstruyendo y es necesario hacer una limpieza cada cierto tiempo.

6.2.4.2. Coagulación-floculación-sedimentación

Este proceso es idéntico al tratamiento que se realiza en la ETAP (véase apartado 6.1.3) para eliminar partículas coloidales que no pueden precipitar y que escapan del sistema de filtración.

6.4.2.3. Desinfección

Para esta etapa es necesario que el agua llegue sin partículas, ya que los tratamientos de desinfección no funcionan cuando hay partículas.

Puede realizarse por distintos métodos:

- Cloración. Se adiciona cloro y se hace circular por un canal con la finalidad de que

el tiempo de residencia sea el necesario para eliminar los patógenos.

- Ozonización. Se añade ozono, haciéndolo burbujear en unos depósitos, que debe ser producido en la propia planta, ya que no se puede almacenar.
- Radiación ultravioleta. Se introducen unas lámparas ultravioletas en el canal que deben estar espaciadas para permitir el paso del agua, pero lo suficientemente juntas para que la acción de las radiaciones llegue a todas las partes del fluido. Este sistema es el más sencillo de operar, pero suele ser el más costoso.

6.2.5. Tratamiento de fangos

Los fangos provenientes de los decantadores primarios (materia orgánica sin tratar) y secundarios (material biológico producido por la materia orgánica tratada) son los que deben tratarse antes de poder ser usados en agricultura o trasladados a vertederos.

No todas las EDAR tienen línea de fangos, por lo que algunas deben transportarlos a otras instalaciones donde sean tratados o usados en agricultura. Los fangos producidos en las EDAR no son residuos peligrosos, a no ser que provengan de industrias que generen residuos tóxicos y peligrosos que acabarían en el fango.

Los fangos contienen fundamentalmente:

- Gran cantidad de agua (aproximadamente el 95 %), lo que hace que ocupen un gran volumen, que sean difíciles de manipular y que su transporte resulte caro.
- Contenido orgánico, ya que los fangos que provienen del decantador primario no han sido tratados y su potencial de descomposición y putrefacción es muy elevado, pudiendo generar malos olores.
- Alto contenido de nutrientes, entre ellos nitrógeno y fósforo.
- Gran cantidad de patógenos que pueden causar enfermedades.

Los objetivos finales serán los siguientes:

- Reducir el volumen. El objetivo es eliminar el agua para disminuir los gastos asociados al transporte y que el tamaño de las instalaciones de tratamiento sea menor (reactor digestor).
- Estabilizar. El objetivo es eliminar organismos patógenos y degradar la materia orgánica para disminuir su potencial de putrefacción y evitar malos olores.

Las etapas de las que consta el tratamiento las vemos de forma resumida a continuación:

- Espesamiento. Se reduce la cantidad de agua de los lodos, aumentando su concentración de sólidos. Esto facilita su manejo y reduce los costos de transporte. Puede realizarse por decantación o por flotación. Normalmente, los lodos primarios se

hacen en un espesador por decantación y los secundarios, menos densos, en otro decantador por flotación.

- **Estabilización.** Los lodos espesados se envían a un digestor que puede ser aeróbico o anaeróbico. El aerobio es más sencillo técnicamente, pero el más utilizado es el anaerobio, ya que permite obtener biogás. En un ambiente sin oxígeno se provoca que las bacterias anaeróbicas descompongan la materia orgánica de los lodos, generando biogás (principalmente metano) como subproducto. El biogás puede ser capturado y utilizado como fuente de energía renovable para el mantenimiento de la planta.
- **Acondicionamiento.** Puede ser químico o térmico, para poder eliminar el agua en la etapa posterior.
- **Deshidratación.** Consiste en una eliminación de agua. Esto se logra generalmente mediante equipos de deshidratación mecánica, como prensas de tornillo, centrífugas, filtros banda o eras de secado.

El fango final se puede usar como fertilizante en agricultura, incinerarse o transportarse hasta vertederos controlados.

Los requisitos para el vertido de aguas residuales están fijados por el Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo del Real Decreto-Ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas, y cuyos valores se incluyen en el anexo 2 de este capítulo.

Anexo 1

Parámetros y valores paramétricos contenidos en el Real Decreto 3/2023, de 10 de enero, por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro.

Tabla 10. Valores paramétricos de los parámetros microbiológicos

Parámetro	Valor paramétrico	Unidad
<i>Escherichia coli</i> (E.Coli)	0	UFC en 100 mL
Enterococo intestinal	0	UFC en 100 mL
<i>Clostridium perfringens</i> (incluidas esporas)	0	UFC en 100 mL
<i>Legionella spp</i>	100	UFC en 1 L

Nota. UFC (unidad formadora de colonias) es la unidad para contabilizar microorganismos.

Tabla 11. Valores paramétricos de los parámetros químicos

Parámetro	Valor paramétrico	Unidad
Acilamida	0,10	µg/L
Antimonio	10	µg/L
Arsénico	10	µg/L
Benceno	1,0	µg/L
Benzo(a)pireno	0,010	µg/L
Bisfenol A	2,5	µg/L
Boro	1,5	mg/L
Bromato	10	µg/L
Cadmio	5,0	µg/L
Cianuro	50	µg/L
Clorato	0,25	mg/L



Parámetro	Valor paramétrico	Unidad
Clorito	0,25	mg/L
Cloruro de vinilo	0,50	µg/L
Cobre	2,0	mg/L
Cromo total	25	µg/L
1,2-dicloroetano	3,0	µg/L
Epiclorhidrina	0,10	µg/L
Fluoruro	1,5	mg/L
Mercurio	1,0	µg/L
Microcistina	1,0	µg/L
Níquel	20	µg/L
Nitrato	50	mg/L
Nitritos	0,50	mg/L
Plaguicida	0,10	µg/L
Plomo	5,0	µg/L
Selenio	20	µg/L
Uranio	30	µg/L

Tabla 12. Valores paramétricos de los indicadores de calidad

Parámetro	Valor paramétrico	Unidad
Bacterias coliformes	0	UFC/100 mL
Recuento de colonias a 22 °C	100	UFC/1 mL
Colifagos somáticos	0	UFP/100 mL
Aluminio	200	µg/L

Parámetro	Valor paramétrico	Unidad
Amonio	0,50	mg/L
Carbono orgánico	5,0	mg/L
Cloro combinado residual	2,0	mg/L
Cloro libre residual	1,0	mg/L
Cloruro	250	mg/L
Conductividad	2500	μS/cm a 20 °C
Hierro	200	μg/L
Manganeso	50	μg/L
Oxidabilidad (DQO)	5,0	mg/L
pH	6,5 a 9,5	Unidades pH
Sodio	200	mg/L
Sulfato	250	mg/L
Turbidez	4,0	UNF
Índice de Langelier	± 0,5	Unidades de pH

Nota. UFP (unidad formadora de placas) es la medida para contabilizar el número de partículas de virus capaces de formar placas (denominadas *virus viables*). UNF (unidad nefelométrica de turbidez) es la medida para la turbidez de líquidos.

Tabla 13. **Valores de referencia de las características organolépticas**

Parámetro	Valor de referencia	Unidad
Color	15	mg/L
Olor	3	Índice de dilución.
Sabor	3	Índice de dilución.

Tabla 14. Valores de referencia de los parámetros que caracterizan el agua

Parámetro	Valor de referencia	Unidad
Calcio	100	mg/L
Dureza total	500	mg/L CaCO ₃
Magnesio	30	mg/L
Potasio	10	mg/L

Nota. En aguas desalinizadas o ablandadas el contenido en sales es muy bajo y debe remineralizarse. El valor paramétrico mínimo de dureza total debe ser al menos 55 mg/L CaCO₃.

Anexo 2

Tabla 15. **Requisitos para los vertidos procedentes de instalaciones de depuración de aguas residuales urbanas mediante tratamiento secundario** (a)

Parámetros	Concentración	Porcentaje mínimo de reducción (b)
DBO ₅ (c) (a 20 °C sin nitrificación)	25 mg/L O ₂	70-90 %
DQO	125 mg/L O ₂	75 %
Total sólidos en suspensión	35 mg/L (d)	90 % (d)

- (a) O un proceso equivalente. Se aplicará el valor de concentración o el porcentaje de reducción.
 (b) Reducción relacionada con la carga del caudal de entrada.
 (c) Este parámetro puede sustituirse por otro: carbono orgánico total (COT) o demanda total de oxígeno (DTO), si puede establecerse una correlación entre la DBO₅ y el parámetro sustituto.
 (d) Este requisito es optativo. Los análisis de vertidos procedentes de sistemas de depuración por lagunaje se llevarán a cabo sobre muestras filtradas; no obstante, la concentración de sólidos en suspensión en las muestras de agua sin filtrar no deberá superar los 150 mg/L.

Tabla 16. **Requisitos para los vertidos procedentes de instalaciones de depuración de aguas residuales urbanas en zonas de alta montaña (> 1 500 m)** (a)

Parámetros	Concentración	Porcentaje mínimo de reducción (b)
DBO ₅ (c) (a 20 °C sin nitrificación)	25 mg/L O ₂	40 %
DQO	125 mg/L O ₂	75 %
Total sólidos en suspensión	2000-10000 h-e (d)	60 mg/L
	> 10000 h-e (d)	35 mg/L
		70 %
		90 %

- (a) Tratamiento biológico o menos riguroso, según el artículo 5.3 del Real Decreto-Ley 11/95. Se aplicará el valor de concentración o el porcentaje de reducción.
 (b) Reducción relacionada con la carga del caudal de entrada.
 (c) Este parámetro puede sustituirse por otro: carbono orgánico total (COT) o demanda total de oxígeno (DTO), si puede establecerse una correlación entre la DBO₅ y el parámetro sustituto.
 (d) h-e (habitantes equivalentes).

Tabla 17. Requisitos para los vertidos procedentes de instalaciones de depuración de aguas residuales urbanas mediante tratamiento primario

Parámetros	Porcentaje mínimo de reducción ^(a)
DBO5	20 %
Total sólidos en suspensión	50 %

(a) Reducción relacionada con la carga del caudal de entrada.

Para el caso de vertidos de instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas realizados en zonas sensibles cuyas aguas sean eutróficas o tengan tendencia a serlo en un futuro próximo, además de los requisitos expresados en la tabla 15, se deberán cumplir los contenidos en la tabla 18.

Tabla 18. Requisitos para los vertidos procedentes de instalaciones de depuración de aguas residuales urbanas mediante tratamiento más riguroso ^(a)

Parámetros	Concentración		Porcentaje mínimo de reducción ^(b)
	10 000 a 100 000 h-e	> 100 000 h-e	
Fósforo total	2 mg/L P	1 mg/L P	80 %
Nitrógeno total ^(c) (mg/L N)	15 mg/L N ^(d)	10 mg/L N	70-80 %

(a) Según la situación local, se podrán aplicar uno o los dos parámetros. Se aplicará el valor de concentración o el porcentaje de reducción.

(b) Reducción relacionada con la carga del caudal de entrada.

(c) Nitrógeno total equivalente a la suma del nitrógeno Kjeldahl total (N orgánico y amoniacal), nitrógeno en forma de nitrato (NO₃) y nitrógeno en forma de nitrito (NO₂).

(d) Estos valores de concentración constituyen medias anuales según el punto 3.º del apartado A) 2 del anexo III del Real Decreto 509/96. No obstante, los requisitos relativos al nitrógeno pueden comprobarse mediante medias diarias cuando se demuestre que, de conformidad con el apartado A) 1 del anexo III, se obtiene el mismo nivel de protección. En ese caso, la media diaria no deberá superar los 20 mg/L de nitrógeno total para todas las muestras, cuando la temperatura del efluente del reactor biológico sea superior o igual a 12 °C. En sustitución del requisito relativo a la temperatura, se podrá aplicar una limitación del tiempo de funcionamiento que tenga en cuenta las condiciones climáticas regionales.

Ejercicios voluntarios

1. Calcule la dureza y clasifique las siguientes muestras de agua tomadas en distintos puntos de España a finales del 2023. ¿Son todas aptas para el consumo?

Número de muestra	[Ca ²⁺] mg/L	[Mg ²⁺] mg/L	[Na ⁺] mg/L	[K ⁺] mg/L	pH	Conductividad μS/cm
1	86,9	23	95	16,8	7,49	1 151
2	117	37	49	2,5	7,50	986
3	11,1	2,2	5,0	0,5	8,5	111
4	31,3	3,5	5,2	1,1	7,8	181
5	141	42	101	31,1	7,52	2585

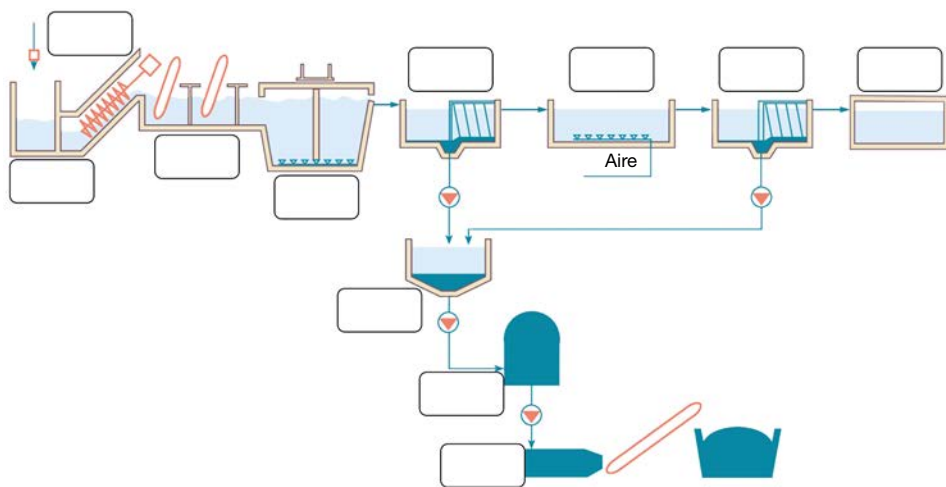
2. Supóngase un agua contaminada con la siguiente composición (en mg/L):

Composición	Concentración (mg/L)	Composición	Concentración (mg/L)
Ca(HCO ₃) ₂	52	Mg(HCO ₃) ₂	36
MgSO ₄	3	NaCl	15
CaCl ₂	43	Mg(HSO ₃) ₂	9
MgCl ₂	6	C ₆ H ₅ – CH ₃	2
C ₆ H ₅ – NH – C ₂ H ₅	1,5	C ₆ H ₁₂ O ₆	0,5
C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁	1		

Calcule la dureza total, permanente y temporal, así como la DBO.

3. ¿Cuál es la diferencia entre jabones y detergentes? Realice una búsqueda y razone cuáles cree que son más contaminantes en función de su composición química.

4. ¿Cuál sería la DQO (demanda bioquímica de oxígeno) de un agua residual que contiene 100 mg/L de un compuesto orgánico con fórmula molecular $C_6H_{12}O_6$?
5. ¿Se ha preguntado alguna vez cómo es el agua que llega a su domicilio? Busque la ETAP que distribuye agua a su localidad y visualice los datos siguientes: fecha de entrada en servicio y remodelaciones, fases del proceso de tratamiento de agua, reactivos empleados y algunos datos técnicos. También puede encontrar algunos datos de la analítica del agua.
6. Explique el proceso de coagulación-floculación-sedimentación. Indique si es necesario agitación en cada etapa del proceso. Investigue cómo debería ser el diseño para poder llevar a cabo todo el proceso en un único tanque.
7. ¿Se ha preguntado alguna vez qué pasa con el agua que sale de su residencia? Busque datos sobre la EDAR que da servicio a su municipio y visualice datos de entrada en servicio y tratamientos del agua.
8. En el GeoPortal del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico puede consultar muchos datos, incluidos situación de agriculturas, calidad y evaluación ambiental, cambio climático, agua, etc. Pruebe a buscar datos de las depuradoras de aguas residuales, parcelas agrícolas de aplicación de lodos de EDAR y vertederos de residuos.
<https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/geoportal.html>
<https://sig.mapama.gob.es/geoportal/>
9. En la figura siguiente se muestra el esquema de una EDAR. Incluya en los cuadros en blanco qué proceso o lugar se está indicando.



10. ¿Qué diferencia hay entre las condiciones aeróbicas, anaeróbicas y anóxicas de un reactor biológico?
11. Nos han encargado un trabajo sobre la ubicación de una industria en la que se prevé que la descarga de sus residuos líquidos se realice en un río. Se ha determinado que el caudal mínimo es de $10 \text{ m}^3/\text{s}$.

El contaminante mayoritario de la industria es un compuesto orgánico no reactivo X. El caudal que se pretende descargar es de 100 L/s y la concentración de X es de 3500 mg/L . El río, aguas arriba (antes de la descarga), lleva una concentración de X de 30 mg/L .

Consultando los valores de la agencia reguladora del medioambiente, se establece una concentración máxima de 100 mg/L de la sustancia X.

Determine si se podría establecer en dicha localización el vertido de aguas residuales al río sin necesidad de someterlas a un proceso de depuración previo.

Referencias bibliográficas

- Apraiz, I., Giulia, L., David, L., Persson, J. y Cristóbal, S. (2009). Proteomic analysis of mussels exposed to fresh and weathered prestige's oil. *Journal of Proteomics & Bioinformatics*, 2(6), 255-261. <https://scite.ai/reports/proteomic-analysis-of-mussels-exposed-A8kPJQ>
- Boucher, J. y Friot, D. (2017). *Primary Microplastics in the Oceans: A Global Evaluation of Sources*. International Union for Conservation of Nature (IUCN). 10.2305/iucn.ch.2017.01. <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2017-002-En.pdf>
- Canal de Isabel II. *Estaciones de tratamiento de agua potable*. Comunidad de Madrid. <https://www.canal-deisabelsegunda.es/tratamiento>
- Cárdenas Calvachi, G. L. y Sánchez Ortiz, I. A. (2013). Nitrógeno en aguas residuales: orígenes, efectos y mecanismos de remoción para preservar el ambiente y la salud pública. *Universidad y Salud*, 15(1), 72-88. <https://revistas.udenar.edu.co/index.php/usalud/article/view/375>
- Chen, S., Ling, J. y Blancheton, J.-P. (2006). Nitrification kinetics of biofilm as affected by water quality factors. *Aquacultural Engineering*, 34, 179-197. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.09.004>
- Cox, K. D., Covernton, G. A., Davies, H. L., Dower, J. F., Juanes, F. y Dudas, S. E. (2019). Human consumption of microplastics. *Environmental Science & Technology*, 53(12), 7068-7074. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01517>
- Crites, R. y Tchobanoglous, G., (1998). *Small and Decentralized Wastewater Management Systems*. McGraw-Hill.
- Directiva 91/271/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=celex%3A31991L0271>
- Directiva (UE) 2020/2184 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 2020, relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano (versión refundida). <https://www.boe.es/doue/2020/435/L00001-00062.pdf>

- Doménech, J. (2003a). «Cryptosporidium» y «Giardia», problemas emergentes en el agua de consumo humano. *Offarm: Farmacia y Sociedad*, 22(11), 112-116. <https://www.elsevier.es/es-revista-offarm-4-articulo-cryptosporidium-giardia-problemas-emergentes-el-13055926>
- Doménech, J. (2003b). Depuración y potabilización del agua. *Offarm: Farmacia y Sociedad*, 22(8), 110-116. <https://www.elsevier.es/es-revista-offarm-4-articulo-depuracion-potabilizacion-del-agua-13051504>
- Eriksen, M., Cowger, W., Erdle, L. M., Coffin, S., Villarrubia-Gómez, P., Moore, C. J., Carpenter, E. J., Day, R. H., Thiel, M. y Wilcox, C. (2023). A growing plastic smog, now estimated to be over 170 trillion plastic particles afloat in the world's oceans-Urgent solutions required. *PLoS ONE*, 18(3), 1-12. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281596>
- Institution of Mechanical Engineers. (2018). *Engineering Out Fashion Waste*. <https://www.imeche.org/policy-and-press/reports/detail/engineering-out-fashion-waste>
- James, I. D. (1997). *The Geochemistry of Natural Waters: Surface and Groundwater Environments*. Prentice-Hall.
- Jewett, S. C., Dean, T. A., Woodin, B. R., Hoberg, M. K. y Stegeman, J. J. (2002). Exposure to hydrocarbons 10 years after the Exxon Valdez oil spill: evidence from cytochrome P4501A expression and biliary FACs in nearshore demersal fishes. *Marine Environmental Research*, 54(1), 21-48. [https://doi.org/10.1016/S0141-1136\(02\)00093-4](https://doi.org/10.1016/S0141-1136(02)00093-4)
- McGowan, W. (2000). *Water Processing: Residential, Commercial, Light-Industrial* (3.^a ed.). Water Quality Association.
- Ministerio de Sanidad. (2024). *Sistema de Información Nacional de Aguas de Consumo (SINAC)*. <https://sinacv2.sanidad.gob.es/CiudadanoWeb/ciudadano/inicioCiudadanoAction.do>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s. f.). *Estación depuradora de aguas residuales (EDAR)*. <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/saneamiento-depuracion/sistemas/edar.html>
- Müller, J. D., Gruber, N., Carter, B., Feely, R., Ishii, M., Lange, N., Lauvset, S. K., Murata, A., Olsen, A., Pérez, F. F., Sabine, C., Tanhua, T., Wanninkhof, R. y Zhu, D. (2023). Decadal trends in the oceanic storage of anthropogenic carbon from 1994 to 2014. *AGU Advances*, 4(4). <https://doi.org/10.1029/2023AV000875>
- Naciones Unidas. (2022). Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/41263/Plastic_Science_S.pdf?sequence=7&isAllowed=y
- OECD. (2022). *Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options*. https://www.oecd-ilibrary.org/environment/global-plastics-outlook_de747aef-en
- Organización Mundial de la Salud. (2011). *Hardness in Drinking-Water*. <https://cdn.who.int/media/docs/default-source/wash-documents/wash-chemicals/hardness-bd.pdf>
- Organización Mundial de la Salud. (2018). *Guías para la calidad del agua de consumo humano: cuarta edición que incorpora la primera adenda*. <https://emergencymanual.iom.int/sites/g/files/tmzbd11956/files/2022-11/9789243549958-spa.pdf>
- Sabine, C., Feely, R., Gruber, N., Key, R., Lee, K., Bullister, J. L., Wanninkhof, R., Wong, C. S., Wallace, D. W. R., Tilbrook, B., Millero, F. J., Peng, T.-H., Kozyr, A., Ono, S. y Rios, A. F. (2004). The oceanic sink for anthropogenic CO₂. *Science*, 305(5682), 367-371. <https://doi.org/10.1126/science.1097403>
- Uthicke, S., Pecorino, D., Albright, R., Negri, A. P., Cantin, N., Liddy, M., Dworjanyn, S., Kamya, P., Byrne, M. y Lamare, M. (2013). Impacts of ocean acidification on early life-history stages and settlement of the coral-Eating sea star «*Acanthaster planci*». *PLoS ONE*, 8(12), 1-9. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0082938>

