



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería Química**

**Microplásticos en EDAR. Evaluación en la  
línea de aguas y de fangos.**

**Autor:**

**García Briones, José Manuel**

**Tutora: Fernández-Polanco, María**

**Departamento: Ingeniería Química  
y Tecnología del Medio Ambiente**

**Valladolid, Abril de 2022.**



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**



## RESUMEN

En el siguiente trabajo se realizará una búsqueda bibliográfica, sobre los microplásticos, su origen y los mecanismos por los que se forman; los tipos en los que se dividen y las vías de transporte; y los impactos que provocan en la naturaleza y en los seres humanos.

El documento se centrará en aquellos microplásticos que aparecen en las aguas residuales y en las depuradoras, estudiando los métodos disponibles para su detección, análisis y eliminación en aguas residuales.

Con el objetivo de evaluar el comportamiento de los microplásticos en una depuradora, como elemento crítico del ciclo que describen en la naturaleza, se realizará un balance de materia a la línea de tratamiento de una EDAR con un caudal de 3 m<sup>3</sup>/s y una concentración de entrada de 15,72 MP/L.

### Palabras clave:

- EDAR (Estación Depuradora de Aguas Residuales)
- Fangos
- Impacto ambiental
- Línea de agua
- Microplásticos



## ABSTRACT

In the following work, a bibliographic search will be carried out on microplastics, their origin and the mechanisms by which they are formed; the types into which they are divided and the transport routes; and the impacts they cause in nature and on human beings.

The paper will focus on those microplastics that occur in wastewater and sewage treatment plants, looking at the methods available for their detection, analysis and removal in wastewater.

In order to evaluate the behaviour of microplastics in a wastewater treatment plant, as a critical element of the cycle they describe in nature, a balance of matter will be carried out on the treatment line of a WWTP with a flow rate of 3 m<sup>3</sup>/s and an inlet concentration of 15.72 MP/L.

### Keywords:

- Environmental impact
- Microplastics
- Sludge
- Water line
- WWTP (Wastewater Treatment Plant)

## Índice de contenidos

<b>1. Introducción</b> .....	9
<b>2. Objetivos</b> .....	11
<b>3. Estado del arte</b> .....	13
¿Qué son los microplásticos? .....	13
Clasificación y caracterización .....	14
Cuantificación de los microplásticos.....	16
Ciclo de los microplásticos.....	16
Mecanismos de degradación .....	17
Mecanismos de transporte .....	21
Impactos de la producción de microplásticos.....	25
Impactos de los microplásticos en el ser humano.....	25
Impacto de los microplásticos en la naturaleza.....	28
Medidas adoptadas y normativa vigente .....	31
<b>4. Microplásticos en EDAR</b> .....	33
Características del agua residual urbana. Contaminantes presentes.....	33
Línea de tratamiento de aguas en una EDAR urbana.....	34
Línea de aguas .....	35
Línea de fangos.....	39
Sistema de muestreo en una EDAR urbana .....	43
Recogida de muestras.....	43
Pretratamiento de las muestras.....	44
Caracterización y análisis de las muestras .....	45
Eliminación de microplásticos en una EDAR urbana .....	46
<b>5. Evaluación del vertido de microplásticos en una EDAR urbana</b> .....	49
Escenarios/situaciones.....	49
Datos de partida y condiciones de operación.....	50
Cálculos.....	52
Línea de aguas .....	52
Línea de fangos.....	59
Balance total de microplásticos en una EDAR.....	66
<b>6. Conclusiones</b> .....	69
<b>7. Líneas futuras</b> .....	71
<b>8. Bibliografía</b> .....	73



ANEJOS.....	83
<i>Anejo 1. Nomenclatura</i> .....	83
<i>Anejo 2. Tablas</i> .....	86
<i>Anejo 3. Cálculos en Excel</i> .....	89



## Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Medidas adoptadas por diferentes países para minimizar la contaminación por microplásticos.....	31
<b>Tabla 2.</b> Eficacia de eliminación de diferentes tecnologías aplicadas en el tratamiento terciario .....	47
<b>Tabla 3.</b> Eliminación de microplásticos en la línea de aguas .....	49
<b>Tabla 4.</b> Tabla de corrientes .....	50
<b>Tabla 5.</b> Datos de partida .....	51
<b>Tabla 6.</b> Características del agua tratada.....	58
<b>Tabla 7.</b> Datos de partida de la digestión anaerobia.....	61
<b>Tabla 8.</b> Contenido de microplásticos en la línea de fangos y microplásticos retirados, en MP/d .....	65

## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Producción anual de plástico global desde 1950 hasta 2020 .....	13
<b>Figura 2.</b> Clasificación general de los microplásticos .....	14
<b>Figura 3.</b> Texturas superficiales de muestras típicas de plástico caracterizadas mediante microscopía óptica (a), SEM (b) y AFM (c) .....	15
<b>Figura 4.</b> Ciclo de los microplásticos .....	17
<b>Figura 5.</b> Principales mecanismos de degradación de los plásticos .....	18
<b>Figura 6.</b> Ciclo que describen los microplásticos en el medio ambiente .....	24
<b>Figura 7.</b> Daños potenciales para el ser humano producidos por microplásticos.....	26
<b>Figura 8.</b> Esquema básico de un desarenador .....	35
<b>Figura 9.</b> Esquema básico de un desengrasador .....	36
<b>Figura 10.</b> Esquema de un sedimentador/decantador circular .....	37
<b>Figura 11.</b> Elementos básicos del proceso de fangos activos.....	39
<b>Figura 12.</b> Esquema de un espesador por gravedad .....	40
<b>Figura 13.</b> Croquis de un sistema natural (eras de secado) .....	42
<b>Figura 14.</b> Esquema de un sistema mecánico (filtro de banda).....	42
<b>Figura 15.</b> Sistema de toma de muestras por filtración superficial .....	43
<b>Figura 16.</b> Estereomicroscopio .....	45
<b>Figura 17.</b> Diagrama de bloques del proceso .....	50
<b>Figura 18.</b> Diagrama de bloques del pretratamiento (desarenado y desengrasado).54	
<b>Figura 19.</b> Diagrama de flujo del tratamiento primario (sedimentador) .....	56
<b>Figura 20.</b> Diagrama de flujo del tratamiento secundario (reactor biológico y sedimentador).....	58
<b>Figura 21.</b> Diagrama de flujo del espesamiento de fangos .....	60
<b>Figura 22.</b> Diagrama de flujo del digester anaerobio .....	63
<b>Figura 23.</b> Diagrama de flujo de la deshidratación de fangos .....	65
<b>Figura 24.</b> Balance total de microplásticos en una EDAR urbana .....	66



## 1. Introducción

Los microplásticos se han convertido en un problema global que no deja de empeorar y de difícil solución. Debido a su durabilidad, versatilidad, resistencia o a su ligereza, y a sus bajos costes de producción, los plásticos constituyen un elemento fundamental en la sociedad actual, y su producción aumenta cada año. Sin embargo, su uso generalizado ha provocado la contaminación de medios acuáticos y terrestres, y cerca del 10% de todo el plástico que se produce termina en el océano debido a una mala gestión de los residuos.

Los plásticos vertidos al ambiente se degradan, debido a diversos factores, hasta reducir su tamaño miles y miles de veces, apareciendo entonces lo que se conoce como microplásticos, que son plásticos con un tamaño inferior a 5 mm. A su vez, los microplásticos se encuentran en productos industriales, revestimientos, prendas de textiles sintéticos o en cosméticos y productos de higiene y cuidado personal. Por su pequeño tamaño, estas partículas pueden dispersarse por todo el planeta, ya sea por corrientes de aire, corrientes marinas, o incluso acopladas a animales y plantas acuáticos y terrestres.

Debido a su pequeño tamaño, son difíciles de detectar, por lo que es posible cuantificar el problema por completo, y por tanto su análisis y caracterización no son fáciles. Dado que en su mayor medida se acumulan en el agua, las plantas de tratamiento de aguas residuales (EDAR) podrían desempeñar un papel importante en el vertido de microplásticos al medio ambiente. Dependiendo de los equipos empleados, en la EDAR se pueden eliminar parte de esos microplásticos y evitar que terminen en aguas dulces y saladas.



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**



## 2. Objetivos

Se va a proceder a recopilar la información existente sobre los microplásticos, en lo referente a su origen, el problema que representan, las vías por las que se distribuyen en el medio ambiente, los mecanismos por los que se generan, así como los daños que pueden causar a corto y largo plazo al entrar en contacto con los seres vivos. También se comentarán las medidas o normativas ya implantadas para mitigar sus impactos.

Además de eso, debido a que su principal lugar de acumulación son las aguas de ríos, mares y océanos, se va a estudiar el comportamiento de los microplásticos dentro de una planta depuradora de aguas urbanas (EDAR), empleando para ello datos experimentales obtenidos de anteriores estudios, que trabajan con porcentajes de eliminación correspondientes a cada una de las etapas de tratamiento de la línea de aguas. Los cálculos se realizarán para una planta que trate un caudal correspondiente a una población de 300.000 personas, estableciendo varios escenarios posibles (dependiendo del ratio de eliminación de microplásticos de la corriente de aguas principal).

Por último, se determinará el destino final de los microplásticos una vez se someten al tratamiento en la EDAR y se comentarán algunas de las tecnologías de tratamiento disponibles y/o en vías de desarrollo,



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

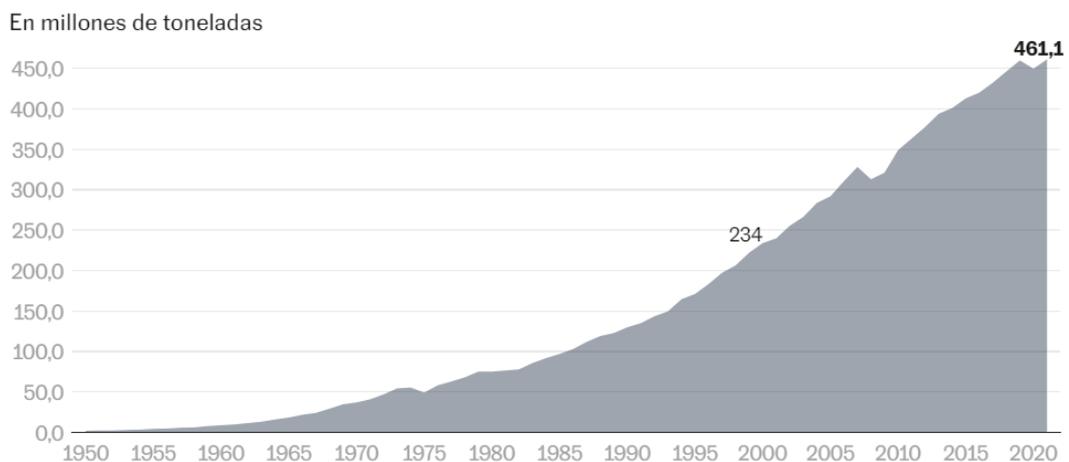
### 3. Estado del arte

#### ¿Qué son los microplásticos?

Desde los años cincuenta, la producción de plásticos a nivel mundial ha crecido de manera desmesurada. De una producción anual de 1,7 millones de toneladas (Mt) en 1950, los últimos estudios (2020) dieron un valor de 460 Mt, siendo en años anteriores (2014) de 299 Mt (*Figura 1*). De todos estos plásticos, únicamente entre el 6 - 26% se somete correctamente a un proceso de reciclado [1], por lo que cada año se vierten en los mares y océanos entre 6 y 12 Mt. Se estima que cerca de 250 Mt de plásticos están presentes en el océano, entre la superficie, el fondo marino, y circulando a la deriva en forma de plásticos de menor tamaño [2]. El proceso natural de degradación de los plásticos es extremadamente lento, van dividiéndose en piezas de menor tamaño, hasta llegar a dividirse en microplásticos (partículas de tamaño inferior a 5mm) y nanoplásticos (tamaño inferior a 1000 nm) [3].

Se denomina microplásticos a todas las partículas de plástico sólidas (o en forma de matriz polimérica) de forma regular o irregular, cuyo tamaño oscila entre 1  $\mu\text{m}$ - 5 mm. Entre los más comunes, se encuentran el polietileno (PE), polipropileno (PP), tereftalato de polietileno (PET), policloruro de vinilo (PVC) y poliestireno (PS) [4].

Estas partículas pueden transportar algunos contaminantes, como metales pesados, hidrocarburos aromáticos, éteres u otras sustancias procedentes de medicamentos o productos de cuidado personal. Además de hacer de vectores de estas toxinas, presentan efectos nocivos para el organismo de los seres vivos, riesgos para los ecosistemas, modificaciones en las cadenas de alimentación, etc.



*Figura 1. Producción anual de plástico global desde 1950 hasta 2020 [5]*

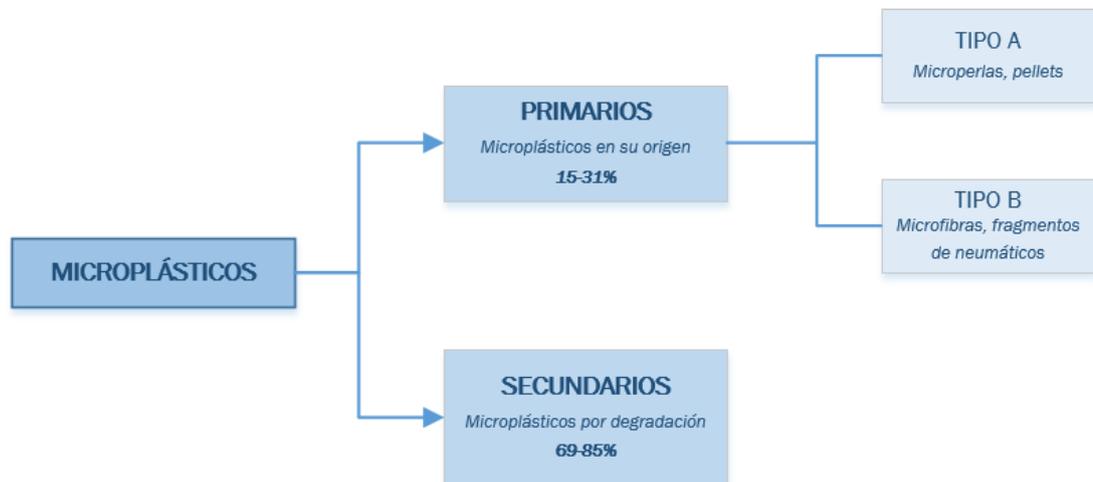
## Clasificación y caracterización

Los microplásticos vertidos en el ambiente pueden dividirse en dos grandes grupos (*Figura 2*):

- *Microplásticos primarios*: son aquellos que se producen originariamente de pequeño tamaño. Se dividen en:
  - o *Tipo A*: son aquellos que se producen con un tamaño inferior a 5mm, como las microperlas de los cosméticos o los pellets.
  - o *Tipo B*: comprenden aquellos que se generan durante el uso de piezas de plásticos más grandes, por ejemplo, las microfibras presentes en la ropa sintética, y los fragmentos de neumáticos fruto de la abrasión con el suelo [6].

Este grupo representa entre el 15 % y el 31 % del total [7].

- *Microplásticos secundarios*: los que se producen por el choque y la sucesiva fragmentación de plásticos de mayor tamaño, por efecto de la temperatura y de la degradación por exposición a la luz solar (fotodegradación). Suponen entre el 69 % y el 85 % de todos los microplásticos del océano [8].



*Figura 2. Clasificación general de los microplásticos [Elaboración propia]*

A su vez, los microplásticos pueden clasificarse de forma física (tamaño, forma, color...) o mediante un criterio químico (composición, tipo de polímero, características...). Los criterios más utilizados son los siguientes:

- **Morfología:** pueden presentarse como fibras, en pequeños fragmentos, películas finas, pellets, microperlas, o como espumas (por ejemplo, en el caso del poliestireno) [9].
- **Composición química:** depende de la composición de los polímeros que forman los microplásticos y de su grado de polimerización; así como de la presencia de otros compuestos tales como plastificantes, estabilizadores, antioxidantes, retardantes de llama, etc [10]. Para clasificarlos según su estado de oxidación, se utiliza el índice de carbonilo (IC), que mide la relación entre el área atribuida al grupo  $-C=O$  frente a la atribuida al grupo metileno  $-CH_2$  [11].
- **Aspecto y textura:** en cuanto a la apariencia, pueden clasificarse según criterios como el color, el brillo, la niebla (opacidad del material) o la amarillez que presentan las partículas [12]. Respecto a la textura, debido a la degradación sufrida pueden aparecer grietas, escamas, hoyos o ranuras, como se aprecia en la *Figura 3* [13].

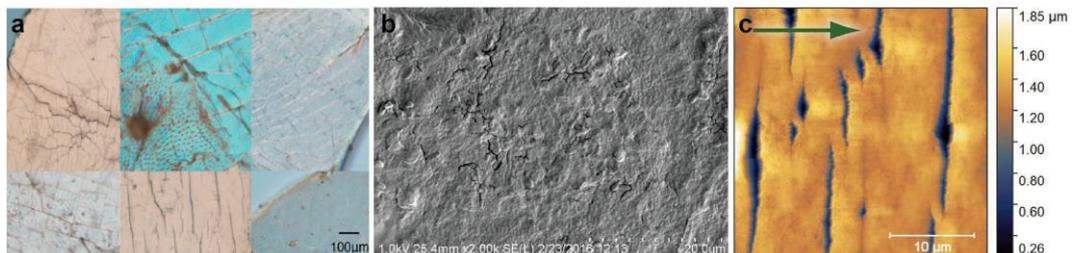


Figura 3. Texturas superficiales de muestras típicas de plástico caracterizadas mediante microscopía óptica (a), SEM (b) y AFM (c)[13]

- **Propiedades fisicoquímicas:** el grado de cristalinidad (entre 0-90%) determina la rigidez de los polímeros [14]. La estabilidad térmica (capacidad para resistir la acción del calor y mantener su composición y propiedades) se relaciona con la estructura química, el grado de cristalinidad y el peso molecular. Respecto a las propiedades superficiales, pueden caracterizarse según su hidrofobicidad (capacidad de la superficie para repeler el agua), su carga superficial (depende de la ionización de los grupos terminales) o su porosidad [15].
- **Propiedades mecánicas:** en cuanto a las propiedades de tracción, el alargamiento a la rotura (refleja cambios porcentuales de longitud antes de producirse la rotura) y el módulo de Young (módulo de tracción) sirven para clasificar los microplásticos. En cuanto al cizallamiento, las más relevantes son la resistencia al cizallamiento (máxima tensión soportable sin generar daño estructural) y el módulo de cizallamiento (respuesta del material ante una deformación por cizallamiento). Todas estas propiedades mecánicas están relacionadas con el peso

molecular, la cristalinidad o los aditivos que presentan los microplásticos [16].

## Cuantificación de los microplásticos

Debido a la complejidad que supone su detección, y más aún su clasificación y caracterización, la cantidad de microplásticos no puede establecerse con unidades de masa o de volumen. Su tamaño y su forma pueden variar, por lo que a la hora de cuantificarlos se emplea el factor “unidades de microplásticos” o “número de microplásticos”. De esta forma, se emplean los siguientes términos para determinar la cantidad de microplásticos:

- Número de microplásticos por unidad de tiempo: se emplea principalmente en el análisis del vertido de microplásticos al ambiente, las unidades son  $MP/d$  o en algunos casos  $MP/año$ .
- Número de microplásticos por unidad de volumen: determina la concentración de microplásticos en el agua, las unidades más utilizadas son  $MP/L$  o  $MP/m^3$ .
- Número de microplásticos por unidad de masa: se emplea para determinar la concentración de microplásticos en el caso de corrientes de fango, las unidades más empleadas son  $MP/g$  o  $MP/kg$ .

## Ciclo de los microplásticos

Al acceder al medio ambiente, los microplásticos describen un comportamiento cíclico, puesto que su eliminación por degradación natural requiere de largos periodos de tiempo.

Las principales fuentes de vertido de microplásticos, se pueden clasificar en tres grandes grupos:

- Actividad humana: vertido de microplásticos en el ambiente debido a la acción del ser humano, como el trabajo del campo en actividades agrícolas y ganaderas, los núcleos urbanos, el lavado de prendas sintéticas, el uso de algunos cosméticos y productos de higiene personal, y actividades como la pesca en ríos y mares. Se podría incluir también el vertido de microplásticos en aguas tratadas en una EDAR urbana y en los lodos separados en esta.

- **Actividad industrial:** realizado por fábricas al verter sus residuos en ríos, mares o directamente a la atmósfera, vertido de pellets.
- **Abrasión del terreno:** debido al desgaste de las carreteras y los neumáticos de los coches, o a las filtraciones en vertederos.

Una vez los microplásticos llegan al medio ambiente, son transportados por diferentes medios (aire, ríos y mares, suelo), donde se degradan poco a poco, hasta terminar acumulados en el fondo de ríos y mares, ingeridos por animales o absorbidos por la vegetación de la zona. En los dos últimos casos, existe la posibilidad de que sean ingeridos por el ser humano, suponiendo unos riesgos y presentando entonces un comportamiento cíclico, como queda recogido en la *Figura 4*.

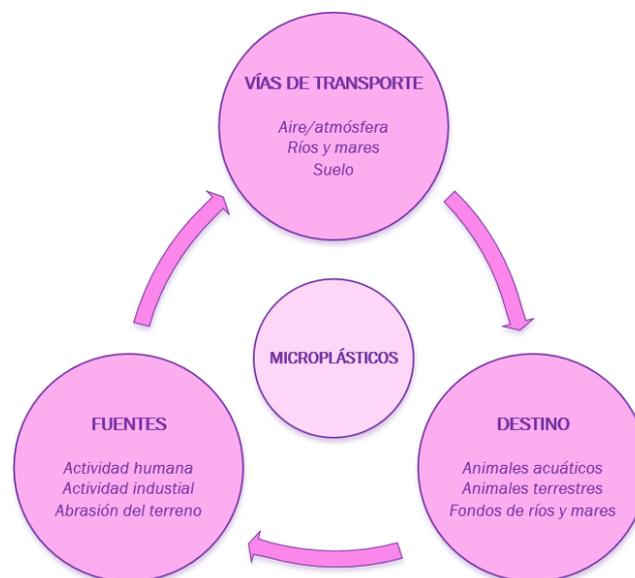


Figura 4. Ciclo de los microplásticos [Elaboración propia] [17] [1] [4]

## Mecanismos de degradación

Los plásticos empleados hoy en día tardan entre cientos y miles de años en degradarse, dependiendo de sus propiedades características y de las condiciones del entorno donde están depositados. La meteorización ambiental provoca la descomposición de estos plásticos, aunque a un ritmo muy lento, lo que conduce a cambios en sus propiedades debidos a los procesos que tienen lugar [13]. Entre todos ellos, cabe destacar los recogidos en la *Figura 5*, que se detallarán más adelante:

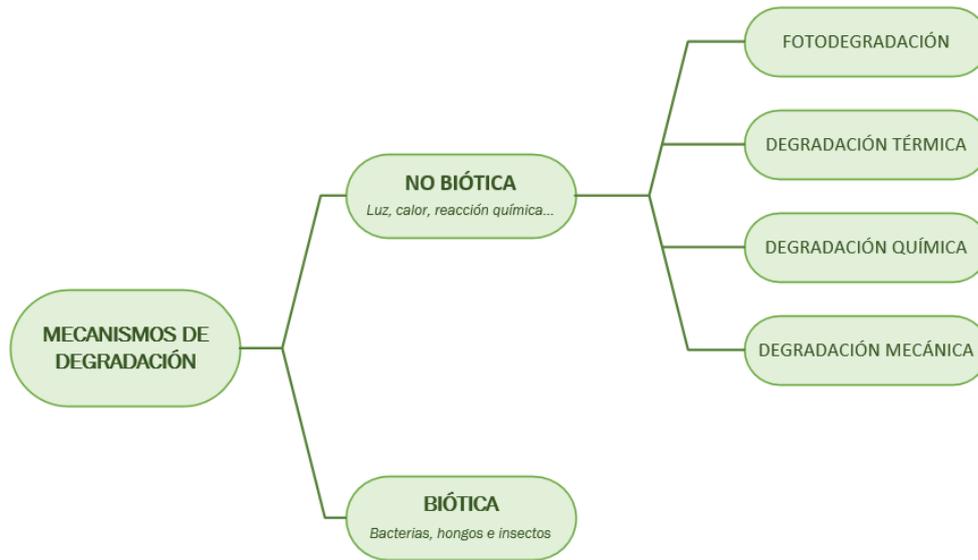


Figura 5. Principales mecanismos de degradación de los plásticos [Elaboración propia]

#### - Fotodegradación

Constituye el proceso más importante que inicia la degradación. Los plásticos reciben la energía de la radiación ultravioleta UV-B (de longitudes de onda entre 290-315 nm) y UV-A (315-400nm) [18]. Cada uno de los polímeros presenta un comportamiento diferente:

- El polietileno (PE) es resistente a la fotodegradación, pero la presencia de impurezas en su estructura puede permitir que se adicionen grupos cromóforos. Los grupos carbonilos de la columna vertebral del PE también pueden actuar como cromóforos. Se producen entonces las reacciones Norrish tipo I y II, para dar lugar a radicales, vinilos y cetonas, rompiendo la cadena principal. Posteriormente, los radicales libres pueden transformarse en peróxidos, los cuales pueden producir aldehídos, cetonas, ácidos carboxílicos, ésteres y alcoholes, dividiendo en repetidas veces la cadena original [19].
- En el caso del polipropileno (PP), al presentar un carbono terciario su estabilidad es menor que la del PE, pero el mecanismo de fotodegradación es muy similar.
- El poli-cloruro de polivinilo (PVC) se libera del hidrógeno y del cloro (proceso de deshidrocloración) al someterse a baja radiación ultravioleta, lo que da lugar a cadenas cortas insaturadas. Los enlaces dobles carbono-carbono (C=C) son menos estables y continúan degradándose. La presencia de grupos cromóforos (impurezas) da lugar a la formación de radicales libres, que forman hidroperóxidos que pueden romper los dobles enlaces de la cadena principal [20].
- En el poliestireno (PS) aparecen anillos de fenilo, que al exponerse a la radiación UV forman un estado triple de excitación. Entonces pueden

disociarse o transferirse a enlaces carbono-hidrógeno (C-H) o carbono-carbono (C-C) colindantes [21].

- Por último, el tereftalato de polietileno (PET) está compuesto por enlaces tipo éster. Estos pueden disociarse y formar CO, CO<sub>2</sub>, ácido tereftálico, anhídridos, ácidos carboxílicos y ésteres [19].

#### - Degradación térmica

Se produce cuando los plásticos se descomponen debido a la energía que reciben al estar sometidos a elevadas temperaturas. Esta temperatura depende de las propiedades térmicas del polímero, así como del oxígeno disponible [22]. Entre las propiedades de las que depende, se encuentran[23]:

- a) Temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ), a la cual el polímero abandona su estado vítreo para adoptar uno plástico.
- b) Punto de fusión ( $T_m$ ).
- c) Energía de activación ( $E_a$ ), que determina la temperatura a la que se inicia la degradación del plástico.

En aquellos plásticos que contienen hidrógeno, al encontrarse en presencia de oxígeno se da lugar una oxidación exotérmica (200°C) [24]. Sin embargo, esto es poco probable ya que en el medio ambiente no se alcanzan estas temperaturas; se produce una oxidación térmica de forma lenta unida a la fotodegradación, en zonas de playa (costas) o expuestas directamente a la luz del sol. Además, la velocidad de degradación térmica aumenta acorde a la temperatura, y el aumento de la humedad disminuye la energía de activación.

#### - Degradación química

Al estar presentes en la atmósfera diferentes contaminantes (ozono, O<sub>3</sub>; dióxido de azufre, SO<sub>2</sub>; dióxido de nitrógeno, NO<sub>2</sub>; y compuestos orgánicos volátiles, COV's) algunos microplásticos pueden ser atacados por estos, formando radicales mediante reacciones fotoquímicas y provocando su degradación [22].

Los enlaces dobles C=C de los polímeros insaturados se rompen al entrar en contacto con estos contaminantes, fraccionando así la cadena y generando radicales. En entornos acuáticos, el pH y la salinidad del agua influyen en la degradación de los plásticos [25].

#### - Degradación mecánica

Cuando se encuentran en el medio ambiente, los plásticos pueden descomponerse por la acción de fuerzas externas (colisión y abrasión con las rocas y arenas debido al viento y las olas del mar, congelación y descongelación, etc) [26]. Los daños producidos dependen de las propiedades mecánicas que presenten los plásticos, entre las que destaca la tensión de fractura o alargamiento de rotura, que representa la resistencia de un material plástico a cambios en su forma sin la formación de grietas (varía entre 1-900%). Cuanto menos sea este factor, más propenso a fragmentarse es el plástico bajo la acción de fuerzas de tracción externas [22].

En el caso de las fibras sintéticas, el lavado doméstico constituye la principal fuente de estas; las prendas, al desgastarse tienden a liberar fibras de microplásticos (microfibras) no solo en las máquinas de lavado, sino directamente al aire [27].

También aparecen pequeños fragmentos de caucho debidos al desgaste de los neumáticos y los discos de freno de los vehículos, y al desgaste de las calzadas y carreteras [28].

#### - Degradación biótica

Los organismos son los encargados de degradar los plásticos, ya sea de forma física (mordedura, masticación o fragmentación en el proceso digestivo) o biológica (procesos bioquímicos). Estos microorganismos son en su mayor parte bacterias, hongos e insectos [22].

Debido a su naturaleza sólida, los polímeros plásticos convencionales sólo presentan una fracción muy pequeña expuesta a posible degradación; además es necesaria la acción de enzimas extracelulares para romperlos, y permitir su absorción celular y metabolización [29]. Sin embargo, una degradación abiótica previa, al generar productos de menor tamaño y mayor número de poros superficiales puede acelerar los procesos de biodegradación.

Los plásticos se clasifican en hidrolizables o no hidrolizables, dependiendo de si presentan o no grupos éster o grupos amida. Los no hidrolizables (PE, PP, PVC) son más difíciles de degradar, pero reaccionan ante enzimas que hidrolizan la lignina, mediante la oxidación de O<sub>2</sub>, obteniéndose productos de inferior peso molecular. En el caso de los hidrolizables (PET, poliuretano), presentan vías de biodegradación por hidrólisis (hidrolasas extracelulares), aunque también pueden degradarse por oxidación enzimática [13].

Por último, los plásticos pueden mineralizarse en  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  si las condiciones son aeróbicas; y en  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ , ácidos orgánicos,  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{NH}_4$  cuando son anaeróbicas, lo que implica un crecimiento de la biomasa microbiana. Aun así, este proceso anaeróbico es energéticamente desfavorable en comparación con el proceso aeróbico, además de necesitar mucho más tiempo para llevarse a cabo [30].

## Mecanismos de transporte

Debido a su pequeño tamaño, los microplásticos se depositan en el medio ambiente y son transportados de un lugar a otro por diferentes vías. Los principales mecanismos de transporte son:

- Transporte por aire

El conjunto de microplásticos que aparecen en el aire está compuesto en su mayoría por fibras de textiles sintéticos, trozos de neumáticos de caucho sintético y el polvo urbano generado [31]. Otras fuentes pueden ser los materiales de construcción, emisiones industriales o la incineración de residuos. Una vez emitidas al aire, estas partículas son transportadas de un lugar a otro por acción de las corrientes, hasta asentarse en el suelo o en los sedimentos de la zona [32]. También pueden ser transportados por precipitaciones atmosféricas en forma de nieve o lluvia [33]. En zonas con mayor actividad urbana, su concentración aumenta considerablemente (se detectaron 1,5 MP/L en París, mientras que el valor asciende a 4,18 MP/L en Shanghai) [34]. Su destino depende de diversos factores, como la velocidad y dirección del viento, la concentración de contaminación atmosférica, las precipitaciones o la temperatura [35]. Aunque puedan resultar perjudiciales para el ser humano, al poder ser ingeridos por las vías respiratorias, las limitaciones a la hora de detectar microplásticos en el aire dificulta cuantificar este riesgo [4]. A su vez, estos microplásticos pueden ser transportados hasta zonas de bosques, montañas, y zonas marinas.

- Transporte por el suelo

En el suelo se acumula una gran cantidad de microplásticos, la mayor parte de ellos en forma de fibras. Proceden en gran parte de biosólidos y de los lodos generados en las depuradoras, los cuales se emplean a posteriori para el compostaje, por lo que terminan en zonas de explotación agrícola [36]. También pueden originarse a partir de la degradación de otros plásticos de mayor tamaño presentes en vertederos, de la desintegración de películas de plástico empleadas en las tierras de cultivo; pueden proceder de la escorrentía superficial y del riego con aguas residuales, o haber sido transportados por aire a través de la atmósfera [31].

Su acumulación interfiere con el crecimiento y desarrollo de los cultivos de forma normal, y con el desarrollo de microorganismos: alteran la estructura del suelo, inmovilizan los nutrientes, transportan y adsorben contaminantes, etc. Los microplásticos tienen el potencial de inhibir el crecimiento de los cultivos, lo que a su vez puede reducir la producción de alimentos [37].

Al situarse en las capas superiores del sustrato, se produce una degradación de estos microplásticos, ya que se someten a la irradiación ultravioleta y altas temperaturas por la acción de la luz solar [38]. Los animales y microorganismos presentes en el suelo también contribuyen a esta degradación, sin embargo, esto sucede a un ritmo extremadamente lento [21].

Una vez degradados, los microplásticos son transportados hasta capas más profundas del terreno por bioturbación, infiltraciones de agua o mediante el laboreo del suelo en las actividades agrícolas, lo cual aumenta en los terrenos porosos y con sistemas de riego artificiales. Una vez que forman parte del sustrato, pueden ser absorbidos por la vegetación a través de las raíces y llegar hasta los brotes [39].

- Transporte por agua
  - a) Aguas dulces

Aquellos microplásticos que no son retenidos en los fangos, y no son retirados durante el tratamiento de estos, pueden terminar en el agua de ríos y lagos [40]. Los más comunes son los de origen industrial en polvo de resina plástica, los vertidos de pellets de las máquinas de chorro de aire, las microperlas presentes en los productos de cuidado personal, así como las materias primas utilizadas para fabricar productos de plástico. Además de eso, la urbanización, la proximidad a una población humana densa, el tiempo de retención del agua, la proximidad a los centros urbanos, el tipo de gestión de residuos y los vertidos de aguas residuales también pueden influir en el número de microplásticos presentes en los sistemas acuáticos [41].

Por lo general, los lagos y las zonas de menor velocidad de flujo actúan como sumideros de los microplásticos, mientras que los ríos y arroyos sirven como sistemas de transporte [42].

Las plantas de tratamiento de aguas residuales también contribuyen al vertido de microplásticos al agua, dado que en un tratamiento estándar no se eliminan por completo (valores cercanos al 88%, que pueden llegar hasta el 97% en caso de emplear tratamientos terciarios). Muchos de estos microplásticos terminan depositados en las orillas de los ríos, en las zonas de acumulación de sedimentos [43].

Una vez llegan al corriente de agua dulce, son colonizados por una biopelícula microbiana (biofilm), compuesta por bacterias, hongos y algas. Esta película podría alterar algunas propiedades de los microplásticos (densidad, flotación, etc). Después, los microplásticos son ingeridos por peces u otros animales acuáticos.

#### b) Océanos y mares

Los mares y océanos constituyen el mayor sumidero de residuos plásticos, los cuales proceden en su mayor medida de las zonas terrestres. Estos residuos (aproximadamente el 80% de los residuos presentes en el mar [44]) llegan hasta los océanos a través de las playas (vertido de basuras, desechos, etc), a través de la desembocadura de ríos, mediante el transporte atmosférico, etc. Otra fuente importante de plásticos sería la actividad humana en el mar, como la pesca, el transporte de personas y/o el transporte de mercancías [45].

De todas estas vías, los ríos constituyen una de las mayores fuentes de microplásticos para el mar. Entre 1,15 y 2,41 Mt de desechos plásticos se vierten en los mares y océanos cada año a través de los ríos. Los más contaminantes se encuentran el continente asiático, y representan casi un 70% de ese total [46].

Los microplásticos procedentes de los cosméticos y los pellets pueden entrar en las vías fluviales a través de los sistemas de desagüe domésticos e industriales. Las EDAR también pueden contribuir al vertido de plásticos en océanos al liberar sus efluentes directamente al mar (en el caso de zonas costeras) o al liberarlos en los ríos (que finalmente terminan en el mar). En la zonas de playa, actividades como el turismo y el ocio, la pesca recreativa y comercial, la navegación y la industria marina, producen directamente grandes cantidades de plásticos y microplásticos que se vierten en el océano [45]. Se estima un vertido anual de aproximadamente 1,5 Mt de microplásticos primarios los cuales proceden en su mayoría de India y Asia Meridional (18,3%), seguido de América del Norte (17,2%), Europa y Asia Central (15,9%), China

(15,8%), Asia Oriental y Oceanía (15,0%), América del Sur (9,1%), y África y Oriente Medio (8,7%) [47].

Al igual que ocurre en aguas dulces, al entrar en el mar los microplásticos se recubren por un biofilm, que varía su flotabilidad y puede generar ciclos de inmersión-resurgimiento [48]. Por norma general, los microplásticos menos densos se acumulan en las costas y en la superficie del agua, mientras que las partículas más densas se quedan en el fondo y en aguas más profundas. Dentro del mar, los microplásticos pueden ser transportados por tres medios:

- 1) Transporte por gravedad de flujos de sedimentos
- 2) Sedimentación/transporte biológico
- 3) Transporte de corrientes termohalinas, que influyen en la distribución de los microplásticos a través de la creación de puntos calientes de acumulación,

Además de eso, el hielo marino lleva actuando mucho tiempo como sumidero de microplásticos, especialmente en lugares remotos. Debido al cambio climático, el derretimiento de estos hielos podría liberar una gran cantidad de microplásticos, aumentando el riesgo para los organismos y los ecosistemas polares [49].

En la siguiente imagen aparece representado el ciclo que describen los microplásticos en el medio ambiente, incluyendo las fuentes de origen, las vías de transporte y los mecanismos de degradación a los que se someten (Figura 6).

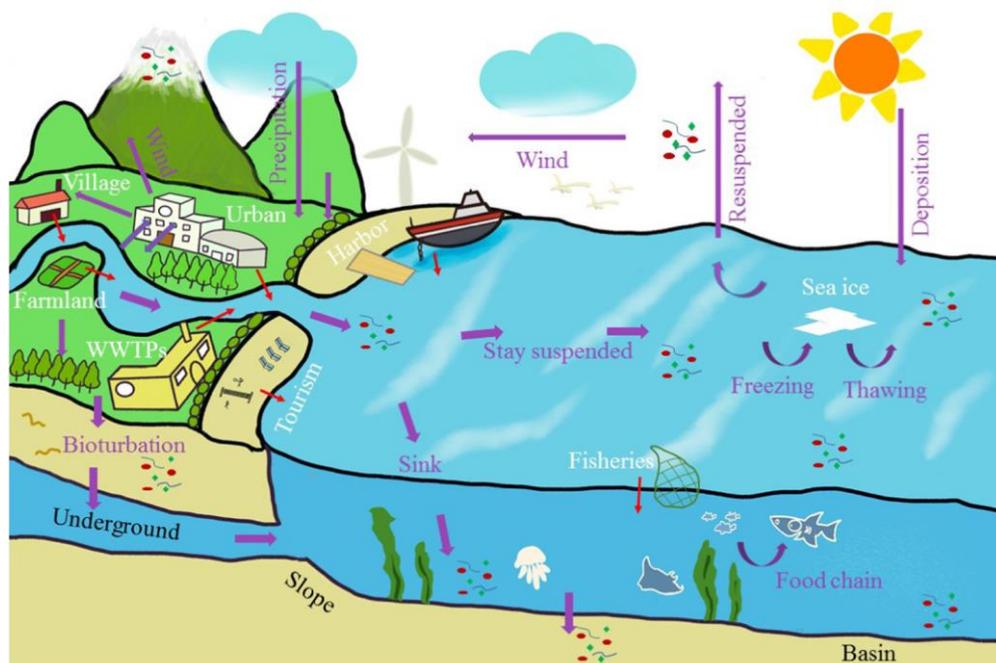


Figura 6. Ciclo que describen los microplásticos en el medio ambiente [1]

## Impactos de la producción de microplásticos

Debido a su naturaleza inorgánica, el vertido de microplásticos en el medio ambiente puede tener consecuencias adversas para el resto de organismos vivos. A pesar de que aún no se conocen los efectos a largo plazo, algunos de los impactos más relevantes aparecen recogidos en el siguiente apartado.

### Impactos de los microplásticos en el ser humano

#### Vías de exposición

La exposición del ser humano a los microplásticos y nanoplásticos puede darse a través de diferentes vías, entre las que destacan las siguientes [50]:

- Ingestión

Se considera la principal vía de exposición humana, se estima un consumo anual de entre 39.000 y 52.000 partículas de microplásticos por persona únicamente por ingestión, que asciende a 74.000 y 121.000 si se incluyen las partículas ingeridas por inhalación [51]. En el caso de las personas que únicamente consumían agua embotellada, hay que sumarle otras 90.000 partículas anuales. Además, han aparecido microplásticos en alimentos, como bivalvos (se estima que los ciudadanos europeos ingieren cerca de 11.000 microplásticos por el consumo de animales bivalvos), crustáceos y pescados, en la sal (unas 37 partículas por persona [52], 100 si se habla de población china [53]) y en el azúcar; aunque también aparecen microplásticos en el polvo presente en los contenedores de alimentos, y en los platos y envases donde se consumen estos, lo que supondría una fuente de microplásticos más importante incluso que los propios alimentos. Estos microplásticos ingeridos pueden penetrar en la mucosa intestinal, provocando, en el caso de poliestireno (PS), la reducción de la secreción de mucosa intestinal, desequilibrando la microbiota intestinal y alterando procesos metabólicos [54].

- Inhalación

Las prendas textiles sintéticas, el polvo desprendido por los materiales de construcción, la incineración de residuos en vertederos, etc; son algunas de las principales fuentes de microplásticos al aire (0,3-1,5 MP/m<sup>3</sup> en exteriores; 0,4-56,5 MP/m<sup>3</sup> en el interior) [34]. Una persona inhala entre 26 y 130 partículas de microplásticos al día, aunque esto depende de las propiedades de las partículas (el tamaño, la densidad o la hidrofobicidad influyen en su absorción a través del sistema respiratorio), los métodos de muestreo, y diversos factores,

como la limpieza de las superficies, la calidad del aire o el factor estacional [55].

Una vez las partículas entran en el sistema respiratorio, son digeridas por los macrófagos, llegando después a la corriente sanguínea y al sistema linfático [56]. Los microplásticos que no se absorben, se acumulan en el sistema respiratorio, lo que a largo plazo puede provocar una inflamación crónica (también conocido como sobrecarga de polvo). También pueden provocar reacciones asmáticas, neumonía crónica, alveolitis alérgica, etc; dependiendo del individuo y del nivel de exposición a las micropartículas. [35]

#### - Contacto dérmico

Las partículas de tamaño superior a 100 nm no se absorben a través de la piel, pero no ocurre lo mismo en el caso de los nanoplásticos [57]. El uso de productos de higiene personal que contengan microplásticos puede asociarse con daños inflamatorios en la piel (jabón de manos, mascarillas faciales, etc) y de las mucosas gastrointestinales (pastas de dientes, enjuagues bucales) [58]. Sin embargo, esta vía de contaminación aún se está investigando y valorando los daños a largo plazo.

### Riesgos para la salud

La exposición del ser humano a los microplásticos puede acarrear riesgos para su salud (*Figura 7*), entre los cuales destacan:

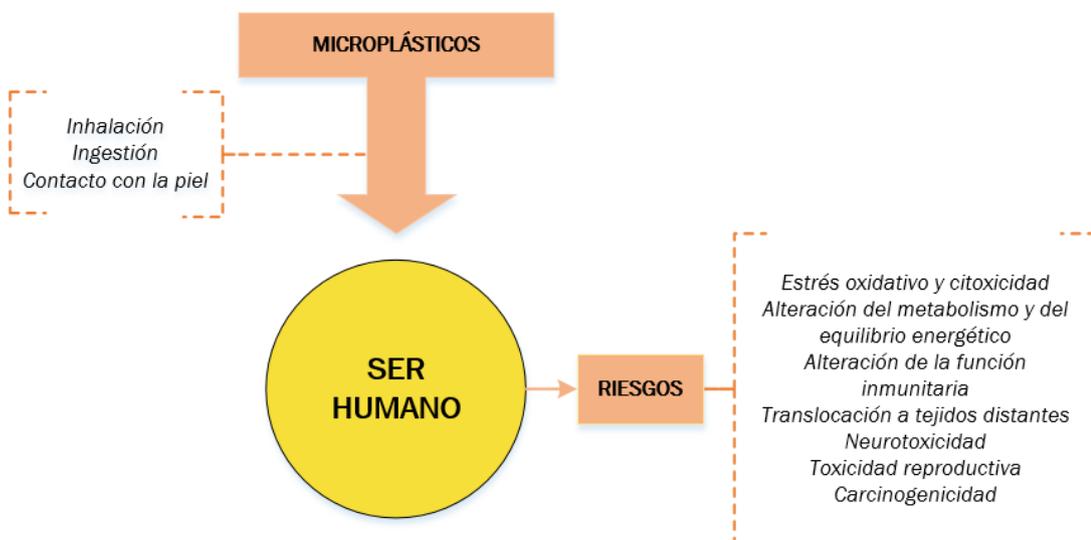


Figura 7. Daños potenciales para el ser humano producidos por microplásticos [Elaboración propia][50]

- Estrés oxidativo y citotoxicidad.

Los microplásticos, al contener especies reactivas de oxígeno (ROS) como producto de la polimerización y el procesamiento, pueden liberar sustancias químicas oxidantes adsorbidas a su superficie (como por ejemplo algunos metales), provocando una respuesta inflamatoria en el cuerpo humano [59]. A su vez, hay estudios que demuestran que las prótesis de extremidades y articulaciones que contienen microplásticos liberan tóxicos y radicales libres debido a una respuesta inflamatoria aguda [60]. Los oxidantes inducen la hidrólisis, que deriva en degradación, agrietamiento y lixiviación del polímero, lo que posteriormente podría provocar un rechazo de la prótesis por parte del cuerpo.

- Alteración del metabolismo y del equilibrio energético

La presencia de micropartículas plásticas en el organismo puede influir directamente en el metabolismo (modulando la actividad de las enzimas metabólicas) o alterar el equilibrio energético (afecta a las reservas de lípidos y a la ingesta de nutrientes) [61].

- Alteración de la función inmunitaria

Los microplásticos inducen respuestas inmunes locales o sistemáticas, dependiendo de su diseminación y de la respuesta del huésped. En individuos genéticamente susceptibles, la exposición ambiental podría ser más que suficiente para alterar dicha respuesta, provocando enfermedades autoinmunes o inmunosupresión, lo que daría lugar a la producción de anticuerpos contra los propios antígenos [62].

- Translocación a tejidos distantes

Tras la exposición a ellos, los microplásticos podrían llegar a traspasar a diferentes tejidos si acceden al torrente sanguíneo. Al entrar en contacto con el sistema circulatorio, causarían una respuesta inflamatoria, citotoxicidad en las células sanguíneas, inflamación vascular, etc [63]. Mediante pruebas in vitro se ha demostrado que las nanopartículas (de tamaño inferior a 250 nm) podían provocar la adhesión a los glóbulos rojos. Los microplásticos de muy pequeño tamaño (20-200  $\mu\text{m}$ ) aumentaban la hemólisis [64]. Mediante un modelo de perfusión de la placenta humana, se demostró que las nanopartículas (<250 nm) podían atravesar la barrera placentaria, siendo transportadas por difusión por proteínas intra y extracelulares. En la zona renal, las células epiteliales expuestas al contacto con microplásticos los asimilaban, y su continua acumulación generó un deterioro significativo de la funcionalidad renal. También se ha demostrado que, después de llegar al hueso, las partículas podrían originar cierta pérdida ósea [65].

- Neurotoxicidad

Tras la exposición a micropartículas, puede producirse una activación de las células inmunitarias del cerebro, ya sea por contacto directo o por acción de las citoquinas proinflamatorias circulantes, lo que podría llegar a provocar daños permanentes en la zona neuronal [66]. Algunos estudios demuestran que los nanoplásticos (PE, partículas de 40-70 nm) indujeron toxicidad y disminuyeron la actividad metabólica debido a la mayor presencia de compuestos bioactivos [67].

- Toxicidad reproductiva

Se obtuvieron resultados en ensayos con animales que pueden utilizarse para prever el efecto futuro de la exposición en el ser humano. En la *Caenorhabditis elegans* (microorganismo), la acumulación de ciertas partículas en la gónada provocó estrés oxidativo y desorden del metabolismo energético, lo que disminuyó la actividad reproductiva [68]. En las ostras, el número de ovocitos y la velocidad de los espermatozoides disminuyeron significativamente cuando se expusieron a microplásticos de poliestireno [69].

- Carcinogenicidad

La inflamación crónica y la irritación provocada por la ingesta de microplásticos, podría causar daños en el ADN y provocar la formación de tumores malignos [62].

## Impacto de los microplásticos en la naturaleza

El vertido de microplásticos en el medio ambiente genera peligros directos e indirectos para diversos organismos (estrés fisiológico, alteración del balance energético, metabolismo y respuesta inmunitaria anormales, daños intestinales...). Además, provocan efectos externos en el ecosistema, al cambiar la distribución de los alimentos, y en la superficie de las aguas contaminadas impide la respiración y la fotosíntesis del plancton marino [9]. Los daños más frecuentes se pueden dividir de la siguiente forma:

- *Interacción con plantas acuáticas*

La exposición a microplásticos puede reducir significativamente el crecimiento de microalgas, tanto en aguas dulces como en mares y océanos, gradualmente a medida que aumenta el tamaño de los microplásticos [70].

Además no sólo causaría daños físicos, si no que afectaría a su metabolismo y su expresión genética [71]. Estas plantas constituyen el alimento de peces y aves en ambientes acuáticos, los cuales acabarían ingiriendo microplásticos.

Entre los factores que intervienen en la adsorción de microplásticos, destacan [72]:

- a) En la celulosa presente en la superficie de las plantas aparece una atracción electrostática que favorece la adsorción.
- b) En las capas epífitas, un aumento de la viscosidad favorece que los microplásticos se asienten en la superficie.
- c) Las bacterias y microorganismos asociados a las plantas.

- *Interacción con los animales acuáticos*

Unas altas concentraciones de microplásticos en la superficie de las plantas puede afectar a la transferencia de nutrientes. Esta transferencia se produce principalmente entre depredadores y presas (mejillones, cangrejos y presas) [73].

Microorganismos acuáticos, anfibios y peces interactúan con los microplásticos directa o indirectamente. Los microplásticos de mayor densidad, se depositan en el fondo de mares y océanos, siendo ingeridos por organismos bentónicos (bivalvos, mejillones), donde la ingesta podría producirse por filtración. Aquellos de densidad media o baja densidad, son ingeridos por el resto de organismos [74].

- *Interacción con las aves acuáticas*

Los animales y plantas acuáticos proporcionan alimento para las aves acuáticas, las cuales habitan en deltas y estuarios, en humedales, tierras inundables, etc [75]. En los estudios realizados, se han encontrado microplásticos en las heces de diversas aves (una media de 4,93 MP/g), en su mayoría de color rojo. De esta manera se observa que no sólo afectan a organismos acuáticos (peces y plantas) sino que también tienen impacto sobre los animales que se alimentan de estos organismos.

- *Microplásticos como vectores*

A su vez, los microplásticos pueden servir como medio de transporte para determinadas sustancias, entre las que destacan:

#### a) Transporte de antibióticos

En el medio ambiente se liberan un gran número de antibióticos a lo largo del año (sólo en China, cerca de 54.000 toneladas [76]). La adsorción de estos antibióticos por parte de los microplásticos puede conducir a una migración de largo alcance, causando efectos complejos, y aumentando su toxicidad al poder ser ingeridos por organismos acuáticos.

Dependiendo del tipo de microplástico, presenta diferentes características superficiales (distribución y tamaño de los poros, propiedades físicas y químicas) y diferentes grados de unión cristalina, por lo que su capacidad de adsorción de los antibióticos es diferente (por ejemplo, en el caso de la poliamida, su estructura porosa y los enlaces de hidrógeno de su superficie le dan una gran capacidad de adsorción) [77]. La capacidad de adsorción depende a su vez del tipo de interacción entre los antibióticos y los microplásticos (enlace  $\pi$ - $\pi$ , fuerzas de Van der Waals, puentes de hidrógeno o enlace iónico) [78].

#### b) Transporte de iones de metales pesados

Entre las fuentes más importantes de contaminación por metales pesados en agua dulce y salada, encontramos diferentes tipos de pinturas (antioxidantes y anticorrosivos presentes en puertos, muelles, y cascos de los barcos), que contienen una cantidad abundante de contaminantes [79]. Dado que los plásticos no se degradan con facilidad en el agua, los metales pesados se acumulan en ellos. Los iones metálicos presentan una fuerte afinidad con los microplásticos y se adsorben a su superficie, lo que provoca una bioacumulación de contaminantes y venenos en el medio acuático [80].

#### c) Transporte de contaminantes orgánicos persistentes

En función de las necesidades requeridas, se añaden aditivos orgánicos o minerales durante el proceso de fabricación de los plásticos (estabilizadores biológicos, antioxidantes, lubricantes, estabilizadores de llama, pigmentos, etc). Se estima que los plásticos no fibrosos contienen alrededor de un 7% de aditivos químicos [81], por lo que cerca de 2 toneladas de aditivos se encuentran ahora mismo en mares y océanos. Entre los aditivos más comunes, se encuentran los disruptores endocrinos, presentes en juguetes, tarjetas de crédito o en los volantes de los coches, los cuales tienen efectos tóxicos y perjudiciales para los organismos acuáticos [74].

## Medidas adoptadas y normativa vigente

Aunque no existe como tal una legislación que regule la producción de microplásticos, si existen políticas emitidas por la Unión Europea para minimizarlo [82].

Entre ellas, encontramos la Directiva (UE) 2019/904, aprobada por el Parlamento Europeo y el Consejo el 5 de junio de 2019 [83]. Conocida también como la Directiva de Plásticos de Un Solo Uso (Single-Use Plastic Directive), principalmente se refiere a recipientes para alimentos y bebidas, pajitas, bastoncillos de algodón y algunos cosméticos (en la Unión Europea está prohibida la venta de cosméticos fabricados a partir de plásticos oxodegradables) [84].

Al resultar nocivos para el medio ambiente, los plásticos de un solo uso deberán reducirse progresivamente hasta el año 2026, cuando se deberán haber implantado todas las medidas necesarias para ello [83]. Algunos de los países que han implantado medidas aparecen recogidos en la *Tabla 1*:

*Tabla 1. Medidas adoptadas por diferentes países para minimizar la contaminación por microplásticos [Elaboración propia]*

PAÍS	MEDIDAS
PORTUGAL	Prohibición de la comercialización de cosméticos y detergentes que contengan microperlas (>0,01%)
PAÍSES BAJOS	Prohibición de la venta de cosméticos que contengan microperlas, 2014
FRANCIA	Prohibición del uso de microperlas en cosméticos a partir de 2018. Prohibición de los bastoncillos de algodón, 2020
SUECIA	Prohibición de cosméticos que contengan microperlas, a partir de 2018.
REINO UNIDO	Prohibición del uso de microperlas en productos cosméticos, a partir de 2018.
CHINA	Prohibición del uso de microperlas en cosméticos y productos de cuidado persona, 2020
ESTADOS UNIDOS	Prohibición de la fabricación, envasado y distribución de cosméticos que contengan microperlas, y medicamentos de venta libre (pastas de dientes), <i>Microbead-Free Waters Act</i> , 2015
CANADÁ	Prohibición de la fabricación, de cosméticos que contengan microperlas, 2018



En España, el 28 de mayo de 2021 se desarrolló un proyecto de Ley de Residuos y Suelos Contaminados [85], en el que se revisó la normativa anterior y se establecieron nuevos objetivos, como por ejemplo:

- Reducción de comercialización de plásticos de un solo uso (vasos para bebidas, tapas, tapones, y recipientes alimentarios de consumo inmediato) hasta un 50% para 2026 y hasta un 70% para 2030.
- Prohibición de la entrada en el mercado de plásticos desechables como pajitas, bastoncillos, cubiertos y platos.
- Regulación del diseño de recipientes (las tapas y tapones deben permanecer unidos a las botellas, las botellas fabricadas con PET deben contener un 25% de material reciclado a partir de 2025, y todas las botellas un 30% en 2030).

## 4. Microplásticos en EDAR

En el apartado siguiente se describirá la línea de tratamiento de una EDAR de aguas residuales urbanas, comentando cada uno de los procesos que la componen, así como los parámetros característicos de cada uno. Además, se comentarán los métodos de detección y de análisis que permiten determinar el contenido de microplásticos dentro del agua, así como la capacidad de eliminación de estos en cada una de las etapas del tratamiento.

### Características del agua residual urbana. Contaminantes presentes.

Normalmente, el afluente de una EDAR urbana presenta unas características diferentes a las del efluente ya tratado, de las cuales interesa conocer:

- Temperatura: su valor condiciona los procesos de depuración. La temperatura de las aguas residuales suele ser más elevada que la del suministro, debida al añadido de agua caliente doméstica e industrial. Los valores óptimos para el correcto desarrollo de los procesos se sitúan entre 25-30°C.
- pH: si el efluente de aguas no contiene vertidos industriales, el valor de pH oscila entre 6,5-8,5. Debe medirse y controlarse a la entrada de la planta.

Dentro de las aguas residuales urbanas, existen diferentes tipos de contaminantes y sustancias que es necesario eliminar, para evitar problemas a posteriori y reducir el impacto que genera su vertido. Entre ellas destacan:

- Sólidos en suspensión (ST): su vertido puede ocasionar el depósito de fangos a la salida de la planta. Se define como la materia que se obtiene como residuo después de someter al agua a un proceso de evaporación de 103-105°C. Determina la cantidad de fangos que habrá que eliminar en la EDAR, y se dividen en sólido fijos (o sólidos inertes, SI) y sólidos volátiles (SV).
- Materia orgánica (MO): compuesta en su mayoría por proteínas, carbohidratos, grasas animales. Se determina como:
  - a) DBO (demanda bioquímica de oxígeno): materia orgánica biodegradable que existe en el agua residual.
  - b) DQO (demanda química de oxígeno): cantidad de oxígeno (O<sub>2</sub>) consumido por los cuerpos reductores presentes en el agua residual sin intervención de organismos vivos.

Si no se trata correctamente, puede llevar al agotamiento de los recursos naturales de oxígeno y al desarrollo de condiciones sépticas.

- Patógenos: por el agua residual pueden transmitirse enfermedades contagiosas.
- Nutrientes: si se vierten en el entorno acuáticos, pueden favorecer el crecimiento no deseado de especies acuáticas (eutrofización) y contribuir a la contaminación de las aguas subterráneas. Principalmente son:
  - a) *Carbono (COT, Carbono Orgánico Total)*
  - b) *Nitrógeno*: en forma amoniacal ( $NH_4^+$ ,  $NH_3$ ), en forma de nitratos ( $NO_3^-$ ) y total.
  - c) *Fósforo*: en forma de fosfatos ( $PO_4^{3-}$ ,  $P_2O_7^{4-}$ ).
- Metales pesados: son añadidos durante las actividades comerciales e industriales
- Contaminantes prioritarios: compuestos orgánicos e inorgánicos que presentan carcinogenicidad, mutagenicidad, teratogenicidad o toxicidad.
- Materia orgánica refractaria: aquella que resiste ante la aplicación de métodos convencionales de tratamiento (compuestos tensoactivos, fenoles, pesticidas empleados en la agricultura, etc)
- Sólidos inorgánicos disueltos: principalmente calcio (Ca), sodio (Na) y algunos sulfatos ( $SO_2$ ,  $SO_3$ ); son añadidos como consecuencia del uso del agua.

## Línea de tratamiento de aguas en una EDAR urbana

A continuación, se describirá una línea convencional de tratamiento de aguas residuales urbanas, así como los procesos a los que se someten los fangos generados para que puedan ser aprovechados a posteriori, incluyendo los parámetros característicos de cada uno de ellos.

La función principal de una depuradora (EDAR) es eliminar desperdicios, grasas, aceites, etc; que pueda contener el agua residual, así como la materia orgánica e inorgánica, con el objetivo de reducir la contaminación [86] hasta unos límites aceptables. Además de eso, se tratan los fangos producidos durante dicha depuración con intención de cumplir las condiciones exigidas para el destino que se les vaya a dar (vertederos, uso en agricultura, etc) [87].

## Línea de aguas

- *Pretratamiento (pozo de gruesos, rejas de desbaste, desengrasado y desarenado)*

**Rejas de desbaste y pozo de gruesos:** en esta fase se separan aquellos materiales más grandes y gruesos, que pueden perjudicar las siguientes etapas de tratamiento [88]. A la entrada de la línea de aguas se coloca un pozo de gruesos, de fondo tronco-piramidal invertido y paredes inclinadas, cuya función es concentrar los sólidos de mayor tamaño y extraerlos mediante palas bivalvas [89]. Posteriormente, se emplean rejas o tamices para cribar el agua y eliminar piedras, ramas, plásticos de gran tamaño, etc.

**Desarenador:** se emplea para separar los residuos sólidos en suspensión (arenas, arcillas, piedras, etc), en general de pequeño tamaño [90] que lleva el agua residual que perjudican el posterior tratamiento, evitando su deposición en canales y protegiendo las bombas y el resto de equipos. Estos sólidos se retiran en depósitos, donde se reduce la velocidad del agua y se remansa (hasta un valor de 0,3 m/s, llamado velocidad de barrido) y dado a su mayor peso, las partículas descienden hasta el fondo del depósito (desarenador). El principal objetivo es la extracción de la cantidad máxima de materia mineral y la mínima de materia orgánica. Para evacuar las arenas depositadas, pueden emplearse bombas sumergibles que purguen el depósito, en ocasiones también se emplea un clarificador de arenas. Dependiendo del flujo de agua, se diferencian tres tipos: flujo vertical, flujo inducido y flujo horizontal [91]. Entre los parámetros característicos se encuentra el PAR, que representa la cantidad de arena seca que contiene la corriente de alimentación (g de arena seca/m<sup>3</sup>), y la concentración de la corriente de arena-agua que sale del desarenador.

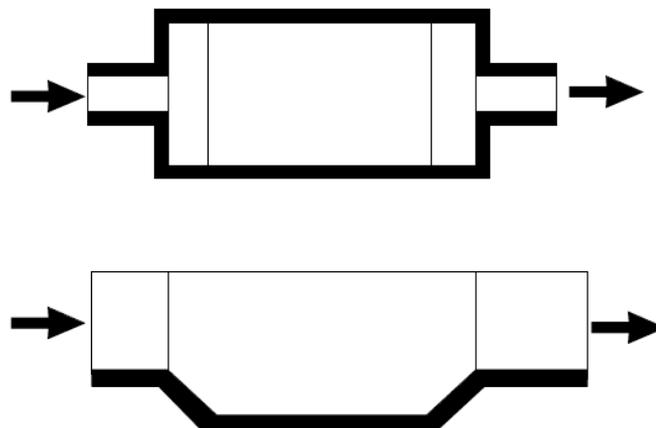


Figura 8. Esquema básico de un desarenador [92]

**Desengrasado:** se emplea para eliminar las grasas procedentes de garajes, hogares y calefacciones, lavaderos, etc [91]; en general se eliminan los elementos sólidos y líquidos que tienen una densidad menor a la del agua, y por tanto no pueden mezclarse lo que generaría obstrucciones, formación de capas superficiales que dificultan la sedimentación y la correcta aireación (por ejemplo en el caso de los fangos, perturban el proceso de digestión) [90]. Normalmente, se emplea el siguiente sistema para su eliminación: primero, se procede con una emulsión de las grasas en el arenero mediante un proceso de aireación, para su posterior retirada; seguido de una separación de las grasas residuales en las balsas de decantación, mediante rasquetas superficiales [91].

Si el desarenado y el desengrasado se realizan de forma conjunta en el mismo depósito, el aire comprimido añadido para la desemeulsión impide la sedimentación de partículas de fango, y la arena depositada en el fondo es más limpia. Las arenas al sedimentar deceleran la ascensión de las partículas de grasa, por lo que aumenta el rendimiento de flotación de las grasas.

Las grasas representan alrededor de un 28% de los sólidos suspendidos totales, y la corriente de grasas suele presentar una concentración del 4% en masa.

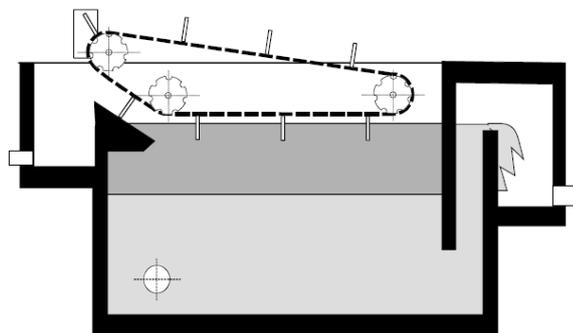


Figura 9. Esquema básico de un desengrasador [92]

- *Tratamiento primario (sedimentador primario)*

Se trata de un proceso físico que favorece la deposición de las partículas en suspensión del agua residual por acción de la gravedad. Las partículas de densidad mayor a la del agua sedimentan en el fondo, mientras que por la parte superior sale el agua tratada o agua clarificada. Para conseguir esta separación, se reduce la velocidad del agua considerablemente en los decantadores, que son tanque de sección circular o rectangular, con el fondo inclinado hacia una o varias zonas de descarga. Las partículas extraídas de la zona inferior se llevan a la línea de fangos. Está condicionado por la forma y la velocidad de las partículas sólidas que se desean separar, y actúan dos fuerzas:

- 1) Fuerza horizontal: debida al movimiento del agua dentro del decantador, velocidad horizontal.
- 2) Fuerza vertical: debida a la acción de la gravedad, origina la velocidad de sedimentación.

La partícula avanza en el decantador y desciende lentamente hasta el fondo [93].

Tiene como objetivo reducir la concentración de sólidos suspendidos presentes en el agua residual. Se genera un efluente menos turbio debido a la reducción de sólidos, y una línea de lodos o fango primario, proceso de separación sólido-líquido, exclusiva acción de la gravedad, pretende la eliminación de sólidos sedimentables y materias flotables. Parte de los sólidos tienen características que producen su floculación, lo que hace que al chocar las partículas se agreguen unas con otras y formen partículas de mayor tamaño, acelerando así el proceso de sedimentación [94]. Durante el tratamiento primario se eliminan cerca del 50% de los sólidos suspendidos totales, quedando retenidos en el fango primario, que presenta una concentración del 1-2% en masa.

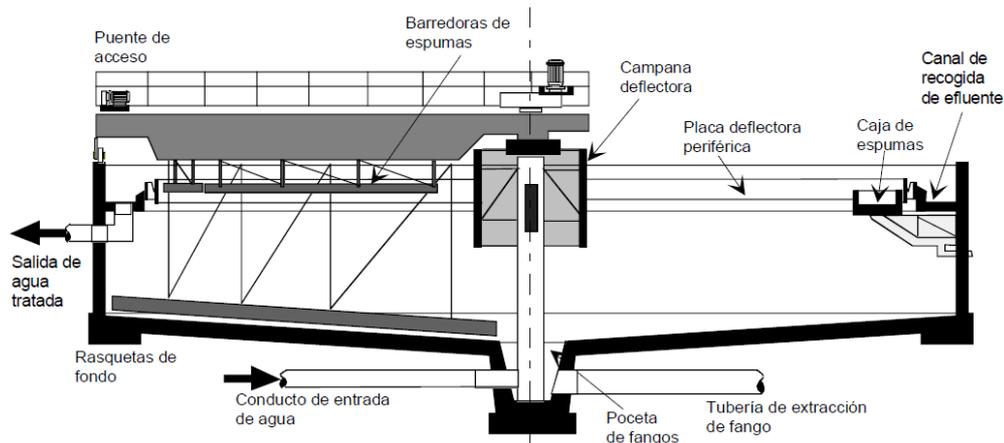


Figura 10. Esquema de un sedimentador/decantador circular [94]

#### - Tratamiento secundario (reactor biológico)

Se trata de un proceso biológico aerobio (en presencia de oxígeno) que consiste en la degradación de materia orgánica por bacterias, pertenecientes a un cultivo que se encuentra en suspensión dentro del reactor biológico [95].

Para este proceso es necesario el contacto entre el agua residual, la biomasa activa y el oxígeno. Para acelerar los procesos naturales se le suministra oxígeno gas que luego se disuelve, aumentando la capacidad de tratamiento para obtener una mejor calidad del efluente y una menor cantidad de fango [96].

Se produce un proceso metabólico, mediante el que los microorganismos transforman los contaminantes químicos en biomasa, dióxido de carbono y agua [97]. Las bacterias incorporan la materia orgánica a su metabolismo, para mantener su actividad vital y generar nuevo tejido celular. [95]. La corriente de agua se introduce en el reactor, donde se mantiene el cultivo en suspensión, con un gran número de microorganismos agrupados en flóculos. La mezcla agua-cultivo se llama licor mezcla [95]. Mediante el reactor biológico se estimula el crecimiento controlado de biomasa, integrada por un cultivo bacteriano, con el fin de degradar/oxidar contaminantes. Dependiendo de la disposición de la biomasa, existen dos tipos de reactores [98]:

- La biomasa se encuentra en suspensión (fangos activos).
- La biomasa se encuentra adherida a un soporte/relleno (procesos de biopelícula).

El proceso puede llevarse a cabo de dos formas:

- 1) Proceso de mezcla completa: existe uniformidad entre el licor del tanque.
- 2) Proceso de flujo pistón: se mantiene un gradiente de concentración en función de la distancia a la entrada del proceso, no existe mezcla.

Dentro del reactor, se dispone de un sistema de aireación que permite la correcta agitación de este licor mezcla, evitando que los flóculos sedimenten. Para modelos de mezcla completa, existen las siguientes variantes:

- a) Aireación prolongada: tanque de aireación acoplado a un sistema de turbinas, aireadores sumergibles o difusores cerámicos. Estos mantienen la biomasa en suspensión, e introducen el oxígeno necesario. Son procesos con una baja carga másica y baja producción de fangos, y se elimina nitrógeno a la vez que materia orgánica.
- b) Contacto-Estabilización: se emplean dos tanques, en el primero se mezclan el efluente con el fango recirculado; en el segundo (tanque de estabilización) se desarrolla la nueva biomasa [96].

Este licor mezcla pasa a un decantador secundario, donde se produce una separación sólido líquido, obteniendo el efluente clarificado. Parte de los flóculos separados se recircula para mantener el cultivo dentro del reactor, mientras que el restante se retira (lodos o fango secundario). El reactor biológico y el decantador suelen ser independientes, aunque existen equipos mixtos que actúan de forma alterna como reactor y decantador [95].

Entre los parámetros característicos, se encuentra el porcentaje de eliminación de la DQO, el rendimiento microbiano ( $Y$ ), y la relación entre sólidos volátiles y la DQO alimentada ( $\text{kg SV/kg DQO}$ ); los fangos generados tienen concentraciones comprendidas entre el 1-2% en masa de sólidos volátiles.

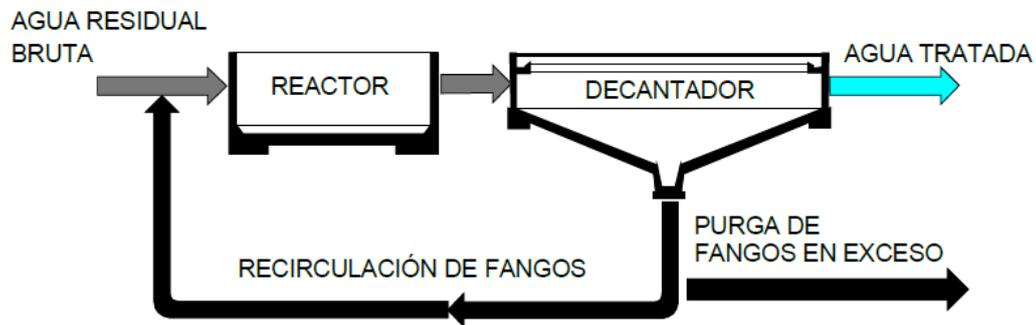


Figura 11. Elementos básicos del proceso de fangos activos[98]

**NOTA:** Después del tratamiento secundario, es posible añadir una última estación conocida como “tratamiento terciario”. Suele estar integrado por procesos de ultrafiltración y filtración con arenas, flotación con aire disuelto (DAF), procesos de membranas, etc; sin embargo, no se incluirá en este trabajo debido a que la mayoría de estaciones depuradoras no disponen de los equipos necesarios.

### Línea de fangos

Los fangos procedentes del pretratamiento los gestiona un gestor autorizado, y terminan normalmente en vertederos. Los fangos generados durante el tratamiento primario y el secundario son sometidos a una serie de procesos dentro de la propia planta, para su homogeneización y adecuación para su aprovechamiento.

#### - *Espesamiento de fangos*

El objetivo de emplear espesadores es separar las dos fases (sólido y agua) del fango de forma efectiva, aumentando las concentraciones de sólidos y reduciendo el volumen total de fangos. Se reducen así los equipos necesarios, la cantidad de calor necesaria en los digestores, o la cantidad de combustible. Se suele llevar a cabo mediante procedimientos físicos, dependiendo de las características que presenta el fango a tratar.

Depende principalmente del tamaño y la forma de las partículas sólidas, de la viscosidad, la temperatura, la carga eléctrica natural, etc. Los procesos típicos son el espesado por gravedad o por flotación, y el uso de centrifugas, filtro-tamiz de banda o filtro-tamiz de tambor rotativo [99]. La corriente de fangos se concentra hasta un 4% en masa ( $40 \text{ kg/m}^3$ ).

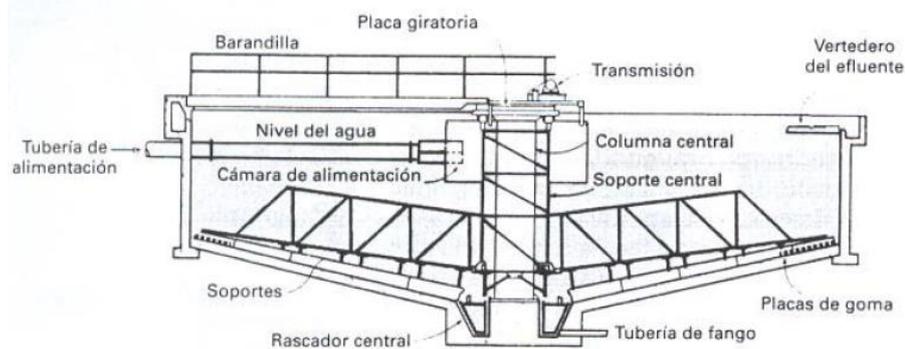


Figura 12. Esquema de un espesador por gravedad [99]

### - Digestión anaerobia

Durante el tratamiento anaerobio la materia orgánica se descompone en biogás, compuesto de metano y dióxido de carbono. Este proceso tiene lugar en tres etapas:

#### 1) Hidrólisis y acidogénesis

La materia orgánica se hidroliza en compuestos más simples y solubles. Es un proceso lento que ocurre en condiciones anaerobias. El rendimiento depende de diversos factores como la composición del sustrato empleado, del pH, de la temperatura del reactor, el tiempo de residencia, etc.

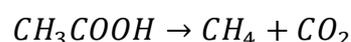
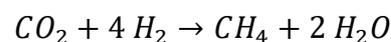
Una vez hidrolizados, los nuevos productos sufren la fermentación de las bacterias y se transforman en compuestos más simples (ácidos grasos volátiles, alcoholes, dióxido de carbono, hidrógeno, etc) [100].

#### 2) Acetogénesis

Los productos generados en la acidogénesis son oxidados por bacterias acetogénicas. Durante este proceso se produce hidrógeno, lo que hace que descienda el pH del medio. Este hidrógeno se elimina formando ácidos orgánicos, como el ácido propanoico ( $C_3H_6O_2$ ) y el ácido butírico ( $C_4H_8O_2$ )

#### 3) Metanogénesis

La metanogénesis es una forma de respiración anaeróbica, en la que unos microorganismos llamados arqueas producen metano a partir de dióxido de carbono o de ácidos orgánicos. Constituye en muchos casos el paso final del proceso de descomposición de la biomasa [101]. El carbono actúa como aceptor de electrones, y las reacciones que tienen lugar son las siguientes:



Existen diversos tipos de digestores, pero la mayoría trabaja con altas velocidades de carga orgánica, con tiempos de retención de sólidos ( $T_{RS}$ ) largos y tiempos de retención hidráulica ( $T_{RH}$ ) largos. Los más utilizados son:

- Reactor de mezcla completa
- Filtros anaerobios (FA)
- Reactor anaerobio de lecho de fangos (UASB)
- Reactor anaerobio de lecho granular expandido (EGSB)

Los parámetros de operación más importantes son el rendimiento biológico, la generación de DQO ( $F$ ), la relación entre sólidos totales y sólidos volátiles (kg SV/kg ST), la generación de metano ( $0,35 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{kg DQO}$  eliminado), y la composición de la corriente de biogás de salida.

- *Deshidratación de fangos*

Proceso físico integrado en la línea de fangos, empleado para reducir el volumen de los fangos (reduciendo el contenido de agua), para disminuir los costes de transporte hasta el punto de destino, además de facilitar su manejo. Se realiza antes de incinerar los fangos en caso de que ese sea su destino para aumentar su poder calorífico, antes del compostaje para reducir la cantidad de enmiendas y esponjantes. Para controlar la humedad y que cumpla con la normativa y condiciones sanitarias en caso de tener como destino un vertedero [102]. Para realizar una deshidratación mecánica es necesario realizar un acondicionamiento previo para mejorar así su rendimiento. Normalmente, los fangos se concentran hasta un 25% en masa.

Los sistemas de deshidratación de fangos pueden ser de dos tipos:

- Natural: conocidos como eras de secado, requiere de suficiente espacio y presenta bajos costes de mantenimiento y rendimientos elevados. No requiere de equipos específicos.

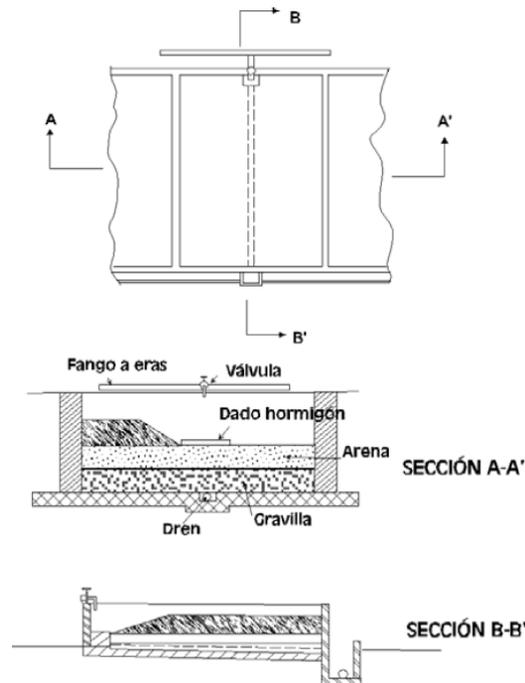


Figura 13. Croquis de un sistema natural (eras de secado) [102]

- Mecánicos: es necesario la implementación de equipos específicos para realizar el proceso de deshidratación. Los más utilizados son los filtros de banda, filtros de prensa, filtros de vacío y las centrífugas.

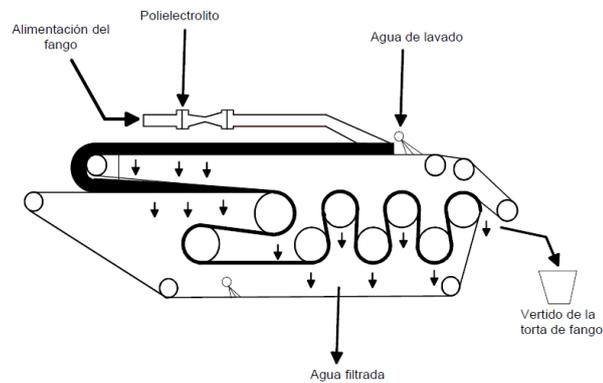


Figura 14. Esquema de un sistema mecánico (filtro de banda)[102]

## Sistema de muestreo en una EDAR urbana

Para analizar el contenido de microplásticos dentro del agua residual y controlar su concentración, es necesario tomar muestras a lo largo de todo el proceso. Dichas muestras deberán recibir un tratamiento específico para eliminar posibles interferencias y que las lecturas obtenidas sean válidas. Los procesos de recogida, tratamiento y análisis de muestras se detallan a continuación.

### Recogida de muestras

Hay diferentes formas de llevar a cabo el procedimiento de la toma de muestras en la línea de tratamiento para analizar su contenido en microplásticos:

- a) Contenedores/automuestreadores: son fáciles de instalar, pero sólo permiten recoger un volumen limitado de pocos litros de muestra [103]. Es ideal para la recogida de muestras en aguas con alto contenido en orgánicos y sólidos (por ejemplo, en la corriente afluente de la EDAR).
- b) Bombeo y filtración por separado: el volumen de muestreo aumenta hasta cientos de litros o incluso metros cúbicos, dependiendo del agua a tratar y de las mallas de los dispositivos de filtración [104]. Es uno de los métodos más empleados, pero sólo se puede utilizar cuando no hay saltos de agua.
- c) Filtración superficial: se realiza en un canal abierto, por lo que las muestras pueden estar contaminadas con aire, lo que dificulta la cuantificación [105]. Además, solamente se captan los microplásticos de baja densidad (los que flotan en la superficie del agua).



Figura 15. Sistema de toma de muestras por filtración superficial [105]

Para que los muestreos sean más representativos se procede de la siguiente manera:

- Aumento el volumen de muestreo y toma de muestras de 24 horas [106].
- Filtración de las muestras para concentrar los microplásticos, en ocasiones con pilas de tamices de distintos tamaños para obtener diferentes categorías de microplásticos.
- Separación in situ mediante una red de plancton y una red de arrastre de mantas. Este método no se utiliza en la propia EDAR [107].

Para la toma de muestras en lodos, dado que la concentración de sólidos y materia orgánica es muy elevada, no se emplea la filtración directa, si no que se introduce una pequeña muestra en un recipiente de vidrio y se lleva al laboratorio [43].

### Pretratamiento de las muestras

Debido a las altas concentraciones de materia orgánica y sólidos volátiles (especialmente en las muestras procedentes de los lodos) es necesario purificar y extraer los microplásticos de ellas, siguiendo alguno de los siguientes métodos:

- a) Eliminación de materia orgánica*
  - Peroxidación húmeda (WPO): se emplea agua oxigenada ( $H_2O_2$ ), hipoclorito de sodio ( $NaClO$ ) y reactivos de Fenton para oxidar la materia orgánica y descomponerla [108]. Se considera que la mayoría de partículas de microplásticos no sufren alteraciones durante el proceso, exceptuando el polietileno y el polipropileno.
  - Eliminación enzimática: se sumerge la muestra en una mezcla de enzimas (lipasa, amilasa, quinasa, celulasa, proteinasa, quitinasa), y se eliminan proteínas, lípidos y carbohidratos sin afectar a los microplásticos [109].
  - Métodos alternativos: tratamiento alcalino y tratamiento ácido, pero pueden causar daños en los microplásticos [104].
- b) Eliminación de materia inorgánica:* se separan por densidad con una disolución salina de cloruro de sodio ( $NaCl$ ) saturada (1,2 kg/L) [110]. Para los microplásticos de densidades más altas (PVC, PET) se emplean otras sales más densas, como el cloruro de zinc ( $ZnCl$ , 1,5 kg/L) y el yoduro de sodio ( $NaI$ , 1,6 kg/L) [104].

## Caracterización y análisis de las muestras

Dependiendo del método empleado, se pueden caracterizar según sus propiedades físicas o químicas.

### a) Caracterización física:

*Estereomicroscopio*: se emplea para medir el tamaño, morfología y enumerar el recuento de microplásticos. El resultado depende en gran medida del operador, puesto que presenta un error de hasta el 70%, que aumenta cuando disminuye el tamaño de partículas [111], debido a las dificultades para diferenciar entre fibras sintéticas y fibras de algodón, y para diferenciar los microplásticos que presentan un color similar al del fondo empleado. Se emplean placas Petri cuadrículadas con rejillas numeradas secuencialmente [105] para facilitar el recuento. En ocasiones se emplea un quemador de alcohol, puesto que las fibras sintéticas sí se funden, al contrario que las orgánicas [112], o se usan tintes para teñir las micropartículas naturales y facilitar su separación [113]. Aunque se consigue mejorar su precisión, es un método muy largo y no permite la automatización ni distinguir entre diferentes tipos de polímeros.



Figura 16. Estereomicroscopio [114]

### b) Caracterización química:

- *Técnicas destructivas*: Cromatografía de Gases acoplada a Espectroscopía de masas (GC-MS), a la que se le puede añadir pirolisis o desorción química; Cromatografía líquida (LC).

- *Técnicas no destructivas:*
  - Espectroscopía FTIR: Las partículas se exponen a radiación infrarroja, se obtiene un espectro, el cual se corresponde con un material [115]. Se emplea para ayudar a la identificación visual de muestras ambiguas [105].
  - Espectroscopía Raman: se trata de una técnica de espectroscopía vibracional basada en la dispersión de la luz. Se obtiene un espectro vibracional que permite identificar los componentes de la muestra [116]. Es necesaria la purificación de muestras previa, dado que es propensa a generar interferencias por fluorescencia [117].
- Otros métodos: Microscopía electrónica de barrido (SEM), espectroscopía de rayos X o microscopía electrónica de barrido ambiental. Son métodos en desarrollo que aún no se han empleado en EDAR's.

## Eliminación de microplásticos en una EDAR urbana

La capacidad de eliminación de los microplásticos se evalúa en función de la cantidad retenida o eliminada en cada una de las etapas del proceso de depuración. En el siguiente apartado se describe cómo influye el tratamiento aplicado a su comportamiento dentro de los equipos y los valores típicos de eliminación en cada uno de ellos.

Este valor se calcula en base a la concentración de microplásticos en la entrada (afluente) y la salida (efluente). En los procesos que no emplean tratamiento terciario, se alcanzó una eliminación de hasta el 88% de los microplásticos, mientras que cuando se utilizó tratamiento terciario este valor aumentó hasta más del 97%.

### a) Pretratamiento y tratamiento primario

- Eliminación en el pretratamiento: 35-59%
- Eliminación en el tratamiento primario: 50-98%

Principalmente, se somete a las partículas a procesos de flotación en los sedimentadores primarios (partículas ligeras) y separación por gravedad (desarenadores y sedimentadores primarios, partículas pesadas o atrapadas en otros sólidos). Durante el pretratamiento se eliminan los microplásticos de mayor tamaño; las fibras se quedan atrapadas en partículas de floculación y

sedimentadas, y las microperlas se eliminan durante el clarificado (suelen ser de PE, por lo que flotan en la superficie del agua o en las partículas de grasa, aceite, etc) [33].

b) Tratamiento secundario

- Eliminación en el tratamiento secundario: 60-90%

Durante el tratamiento biológico, se reduce la concentración de microplásticos hasta un 0,2-14%. Los microplásticos pueden quedar atrapados en los flóculos del lodo, o en caso contrario si se adicionan químicos como el sulfato de hierro, se puede lograr que se agrupen y formen flóculos y se eliminan [103]. Conforme aumenta el tiempo de contacto, mayor es el recubrimiento biológico, y las biopelículas pueden modificar las características de los microplásticos, lo que cambiaría la flotabilidad y por tanto la eliminación de microplásticos durante el clarificado y el sedimentado [48]. En el tratamiento secundario se elimina un mayor número de fragmentos que de fibras, lo que puede deberse a que gran parte de las fibras ya habían sido eliminadas en el pretratamiento y el tratamiento primario.

En cuanto a tamaños, hay diferentes resultados: mientras que en algunos casos los microplásticos de tamaño inferior a 300  $\mu\text{m}$  sólo representan el 8% después del tratamiento secundario [106]; en otros estudios se encontró que el 43% de los microplásticos presentaban tamaños comprendidos entre 500  $\mu\text{m}$  y 1000  $\mu\text{m}$  [33].

c) Tratamiento terciario

Disminución de la concentración hasta 0,2-2% respecto a la del afluente de entrada. La eficacia depende por supuesto del proceso empleado, siendo las tecnologías que emplean membranas las que ofrecen mejor rendimiento [118]. Los diferentes valores aparecen recogidos en la siguiente tabla (Tabla 2):

Tabla 2. Eficacia de eliminación de diferentes tecnologías aplicadas en el tratamiento terciario [Elaboración propia]

TRATAMIENTO	EFICACIA DE ELIMINACIÓN
FILTRO DE DISCO (DF)	40-98,5 %
FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO (DAF)	95%
FILTRACIÓN RÁPIDA CON ARENAS (RSF)	97%
BIORREACTOR DE MEMBRANA (MBR)	99%

Dado que las concentraciones a la entrada y a la salida del tratamiento terciario son muy bajas (inferiores a 1 MP/L en la mayoría de los casos), y los volúmenes de muestra son limitados (docenas de litros), los resultados podrían ser poco fiables, por lo que sería necesario utilizar volúmenes mayores para obtener resultados más sólidos. Después del lavado de los filtros, los sólidos regresan a la entrada de la EDAR, aunque poco a poco podrían eliminarse en el pretratamiento y en el tratamiento secundario.

d) Microplásticos presentes en el fango.

La mayor parte de los microplásticos que aparecen en el afluente de la EDAR quedan retenidos en los lodos de la depuradora. Según varios estudios, la concentración de microplásticos varía de 400 a 700 MP/kg (peso húmedo), y 1.500-17.000 MP/L (peso seco). Viendo esta diferencia tan grande de resultados, aún es necesario el desarrollo de métodos que permitan un muestreo más eficaz y representativo.

Los microplásticos retenidos en los lodos presentan un tamaño considerablemente mayor al obtenido en las aguas residuales, incluso después del tratamiento completo de depuración, lo que nos indica que los más grandes se eliminan con mayor facilidad [103].

De los microplásticos presentes en los lodos, cerca del 63 % eran fibras, y algunos casos hasta el 80 % [119]. Alrededor de  $4,6 \cdot 10^8$  microplásticos son vertidos a diario por una EDAR con una capacidad de 10.000 m<sup>3</sup>/d a lo que corresponde un vertido en los lodos de  $1,56 \cdot 10^{14}$  MP/año [120].

## 5. Evaluación del vertido de microplásticos en una EDAR urbana

En el siguiente apartado se van a realizar los cálculos correspondientes a una línea de tratamiento de aguas residuales urbanas, se tomará como ejemplo la EDAR de Valladolid (de la que se tienen datos suficientes sobre la corriente de entrada y sobre el tratamiento realizado) para determinar lo que ocurre con los microplásticos presentes en el agua (la cantidad eliminada en cada proceso, la corriente o corrientes donde terminan, etc).

Se realizarán balances de materia en cada uno de los equipos del proceso, aplicando en cada caso las ecuaciones y fórmulas pertinentes, y se emplearán las eficacias de eliminación comentadas en el punto anterior para cada una de las etapas de tratamiento.

Se calculará el número de microplásticos que se vierten mediante la línea de aguas diariamente, así como los que terminan en el resto de corrientes (fangos, agua de fangos).

Por último, se realizará un balance global y se establecerá un ratio de eliminación a los microplásticos.

### Escenarios/situaciones

Ya que los porcentajes de eliminación obtenidos varían mucho de un estudio a otro (por ejemplo, del 35% al 59 % [33] en el caso de las etapas de pretratamiento), a la hora de realizar los cálculos se han planteado tres escenarios posibles, dependiendo de la cantidad de microplásticos eliminada en cada una de las etapas (pretratamiento, tratamiento primario y tratamiento secundario). Partiendo de las eficacias de eliminación correspondientes, se ha establecido un escenario de “% Eliminación máxima”, uno de “% Eliminación media” y uno de “% Eliminación mínima”. Los porcentajes de eliminación de cada etapa aparecen recogidos en la siguiente tabla (Tabla 3):

Tabla 3. Eliminación de microplásticos en la línea de aguas [Elaboración propia]

% Eliminación de MP	Pretratamiento	Tratamiento primario	Tratamiento secundario
Máximo	59 %	98 %	90 %
Medio	45 %	75 %	80 %
Mínimo	35 %	50 %	60 %

## Datos de partida y condiciones de operación

El agua que llega a la depuradora es sometida a una línea de tratamiento (Figura 17), mediante el cual se elimina gran parte de los microplásticos que contiene.

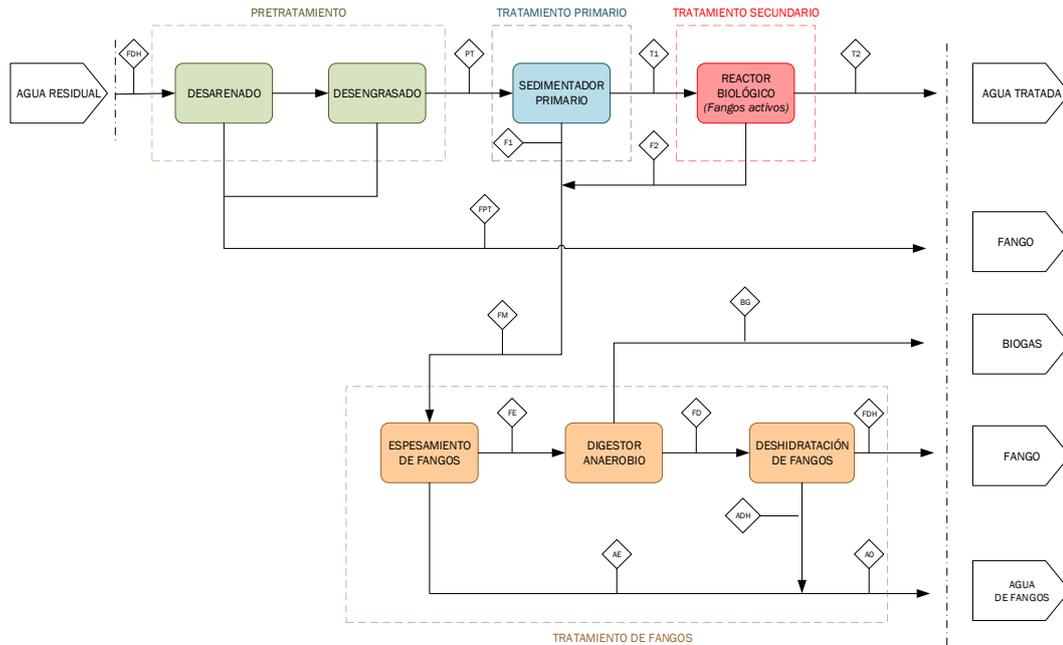


Figura 17. Diagrama de bloques del proceso [Elaboración propia]

Cada una de las corrientes que participan en el proceso aparecen recogidas en la siguiente tabla (Tabla 4):

Tabla 4. Tabla de corrientes [Elaboración propia]

CORRIENTE	LEYENDA
Aguas residuales	IN
Pretratamiento	PT
Agua procedente del tratamiento primario	T1
Agua tratada	T2
Fango pretratamiento	FPT
Fango primario	F1
Fango secundario	F2
Fango mixto	FM
Fango espesado	FE
Agua procedente del espesamiento	AE
Fango digerido	FD
Biogás	BG
Fango deshidratado	FDH
Agua procedente de la deshidratación	ADH
Salida de agua de fango	AO

Los datos de partida y las características del agua con las que se operará (obtenidos de la web de la EDAR de Valladolid) vienen recogidos en la siguiente tabla (Tabla 5):

Tabla 5. Datos de partida [121] [Elaboración propia]

Caudal de agua	259200 m <sup>3</sup> /d
Microplásticos	15,72 MP/L
DQO	526 mg/L
ST	302 mg/L
Microplásticos de entrada a la depuradora	4,08 · 10 <sup>9</sup> MP/d

El caudal de afluente se calcula en base a un caudal de tratamiento estándar (3 m<sup>3</sup>/s) de una planta depuradora. Puesto que los datos recogidos en la bibliografía son muy variables, la concentración de microplásticos de entrada se calcula de la siguiente forma: se tomará el valor de 0,25 MP/L de concentración a la salida y un porcentaje de eliminación de eliminación de microplásticos del 98,41% [122], obteniendo un valor razonable :

$$X_{MP_{IN}} = \frac{0,25 \text{ MP/L}}{0,9841} = 15,72 \text{ MP/L}$$

De esta forma se obtiene la cantidad de microplásticos que llegan a la planta:

$$MP_{IN} = X_{MP_{IN}} \cdot Q_{IN} = 15,72 \frac{\text{MP}}{\text{L}} \cdot 259200 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} = 4,08 \cdot 10^9 \text{ MP/d}$$

## Cálculos

Se recogen a continuación los cálculos que correspondientes al escenario “% *Eliminación media*”, los valores para los otros dos casos quedan recogidos al final del capítulo (*Tabla 6*).

**NOTA:** para la realización de todas las operaciones se ha desarrollado un sistema en una hoja de cálculo (*Excel*) que permite la variación de diferentes parámetros (caudal de entrada, concentración de microplásticos, porcentaje de eliminación...) permitiendo así emplearlo para los diferentes escenarios y agilizar el proceso de cálculo.

### Línea de aguas

#### - *Pretratamiento (desengrasado y desarenado)*

En primer lugar, la línea de aguas pasa por un proceso de pretratamiento, formado por un desengrasado y un desarenado (se ha considerado que los procesos de desbaste y el pozo de gruesos sólo eliminan las partículas de mayor tamaño, por lo que no afectan a los microplásticos contenidos en el agua y se omitirán del balance).

##### a) Desengrasado

Aproximadamente un 28% de los sólidos totales contenidos en la corriente de entrada de aguas residuales corresponde a las grasas, las cuales se reducen un 70% en el proceso:

$$Grasas_{FPT} = Q_{IN} \cdot X_{ST_{IN}} \cdot \%Grasas \cdot \%E_{Grasas_{FPT}}$$

$$Grasas_{FPT} = 259200 \frac{m^3}{d} \cdot 302 \frac{mg}{L} \cdot 0,28 \cdot 0,70 = 17534,44 \text{ kg grasas/d}$$

Si se toma un valor típico de concentración para un fango procedente de un pretratamiento del 4% en masa ( $40 \text{ kg/m}^3$ ), se obtiene el valor del caudal de la corriente que abandona el desengrasador:

$$Q_{Grasas_{FPT}} = \frac{Grasas_{FPT}}{X_{ST_{FPT}}}$$

$$Q_{Grasas_{FPT}} = \frac{17534,44 \text{ kg/d}}{40 \text{ kg/m}^3} = 438,36 \text{ m}^3/\text{d}$$

## b) Desarenado

Durante el proceso de desarenado, se obtendrán 50 g de arena seca por cada metro cúbico de agua tratada (PAR). Tomando una concentración del 0,5 % en masa y una densidad similar a la del agua ( $\rho \approx 1000 \text{ kg/m}^3$ ) para la corriente de agua y arena saliente del desarenador, se obtiene:

$$Arena_{PT} = Q_{IN} \cdot PAR$$

$$Arena_{PT} = 259200 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 50 \frac{\text{g arena seca}}{\text{m}^3} = 12960 \text{ kg/d}$$

$$Q_{\text{Agua-Arena}} = \frac{Arena_{PT}}{\%arena \cdot \rho}$$

$$Q_{\text{Agua-Arena}} = \frac{12960 \text{ kg/d}}{0,005 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3} = 2592 \text{ m}^3/\text{d}$$

Una vez eliminadas las arenas y las grasas, la corriente de agua que sale del pretratamiento será:

$$Q_{PT} = Q_{IN} - Q_{Grasas_{PT}} - Q_{\text{Agua-Arena}}$$

$$Q_{PT} = 259200 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} - 438,36 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} - 2592 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} = 256169,64 \text{ m}^3/\text{d}$$

Y el fango generado en el pretratamiento estará compuesto por las arenas y las grasas eliminadas:

$$Q_{FPT} = Q_{Grasas_{PT}} + Q_{\text{agua-arena}}$$

$$Q_{FPT} = 438,36 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} + 2592 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} = 3030,36 \text{ m}^3/\text{d}$$

Considerando las grasas y las arenas como sólidos suspendidos, la concentración de sólidos totales será:

$$ST_{PT} = Q_{IN} \cdot X_{ST_{IN}} - Grasas_{FPT} - Arena_{PT}$$

$$ST_{PT} = 259200 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 302 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 17534,44 \frac{\text{kg}}{\text{d}} - 12960 \frac{\text{kg}}{\text{d}} = 47784,04 \text{ kg/d}$$

$$X_{ST_{PT}} = \frac{ST_{PT}}{Q_{PT}}$$

$$X_{ST_{PT}} = \frac{47784,04 \text{ kg/d}}{256169,64 \text{ m}^3/\text{d}} = 186,53 \text{ mg/L}$$

Suponiendo una eliminación del 45% de los microplásticos presentes en el agua residual (Tabla 3), la corriente de salida tendrá la siguiente concentración:

$$MP_{PT} = Q_{IN} \cdot X_{MP_{IN}} \cdot (1 - \%E_{MP_{PT}})$$

$$MP_{PT} = 259200 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 15,72 \frac{\text{MP}}{\text{L}} \cdot (1 - 0,35) = 2,65 \cdot 10^9 \text{ MP/d}$$

$$X_{MP_{PT}} = \frac{MP_{PT}}{Q_{PT}}$$

$$X_{MP_{PT}} = \frac{2,24 \cdot 10^9 \text{ MP/d}}{256169,64 \text{ m}^3/\text{d}} = 8,75 \text{ MP/L}$$

Por tanto, la concentración de microplásticos presentes en el fango eliminado en el pretratamiento (FPT) será de:

$$MP_{FPT} = Q_{IN} \cdot X_{MP_{IN}} \cdot \%E_{MP_{PT}}$$

$$MP_{FPT} = 259200 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 15,72 \frac{\text{MP}}{\text{L}} \cdot 0,35 = 1,43 \cdot 10^9 \text{ MP/d}$$

$$X_{MP_{FPT}} = \frac{MP_{FPT}}{Q_{FPT}}$$

$$X_{MP_{FPT}} = \frac{1,83 \cdot 10^9 \text{ MP/d}}{3030,36 \text{ m}^3/\text{d}} = 6,05 \cdot 10^2 \text{ MP/L}$$

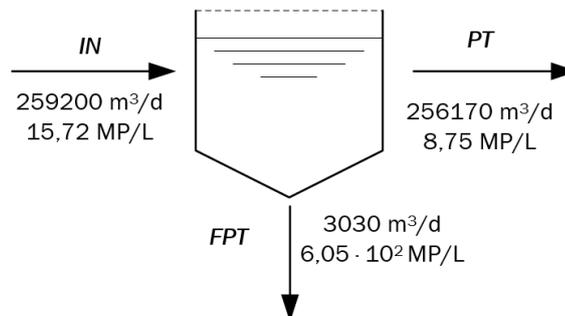


Figura 18. Diagrama de bloques del pretratamiento (desarenado y desengrasado) [Elaboración propia]

- *Tratamiento primario (sedimentador primario)*

Después del desarenado y el desengrasado, la corriente de aguas residuales (PT) se lleva a un sedimentador primario, donde se elimina el 50% de los sólidos suspendidos totales (ST).

$$ST_{F1} = Q_{PT} \cdot X_{ST_{PT}} \cdot \%E_{ST_{T1}}$$
$$ST_{F1} = 256169,64 \frac{m^3}{d} \cdot 186,53 \frac{MP}{L} \cdot 0,5 = 23892,02 \text{ kg/d}$$

Tomando como concentración de ST un valor típico de entre el 1-2% en masa (18 kg/m<sup>3</sup>) en el fango primario, se obtiene el caudal de fango primario (F1):

$$Q_{F1} = \frac{ST_{F1}}{X_{ST_{F1}}}$$
$$Q_{F1} = \frac{23892 \text{ kg/d}}{18 \text{ kg/m}^3} = 1327,33 \text{ m}^3/\text{d}$$

Y la corriente de agua una vez realizado el tratamiento primario (T1) será entonces:

$$Q_{T1} = Q_{PT} - Q_{F1}$$
$$Q_{T1} = 256169,64 \frac{m^3}{d} - 1327,33 \frac{m^3}{d} = 254842,31 \text{ m}^3/\text{d}$$

Tomando el 75% de eliminación de microplásticos (Tabla 3), la concentración de microplásticos en la corriente de salida (T1) y en la corriente de fangos primarios (F1) será la siguiente:

$$MP_{T1} = Q_{PT} \cdot X_{MP_{PT}} \cdot (1 - \%E_{MP_{T1}})$$
$$X_{MP_{T1}} = \frac{MP_{T1}}{Q_{T1}}$$
$$MP_{T1} = 256169,64 \frac{m^3}{d} \cdot 8,75 \frac{MP}{L} \cdot (1 - 0,75) = 5,60 \cdot 10^8 \text{ MP/d}$$

$$X_{MP_{T1}} = \frac{5,60 \cdot 10^8 \text{ MP/d}}{254842,31 \text{ m}^3/\text{d}} = 2,20 \text{ MP/L}$$

$$MP_{F1} = Q_{PT} \cdot X_{MP_{PT}} \cdot \%E_{MP_{T1}}$$

$$X_{MP_{F1}} = \frac{MP_{F1}}{Q_{F1}}$$

$$MP_{F1} = 256169,64 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 8,75 \frac{\text{MP}}{\text{L}} \cdot 0,75 = 1,68 \cdot 10^9 \text{ MP/d}$$

$$X_{MP_{F1}} = \frac{1,68 \cdot 10^9 \text{ MP/d}}{1327,33 \text{ m}^3/\text{d}} = 1,27 \cdot 10^3 \text{ MP/L}$$

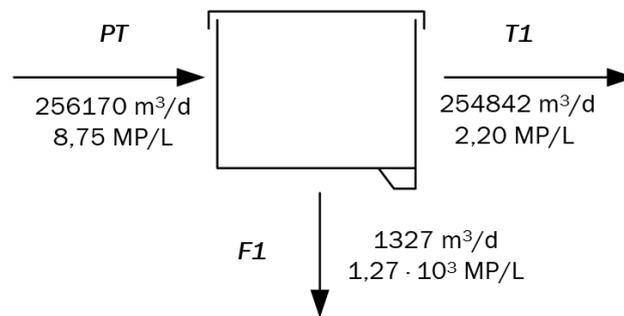


Figura 19. Diagrama de flujo del tratamiento primario (sedimentador) [Elaboración propia]

- *Tratamiento secundario (reactor biológico)*

Después de someterse al tratamiento primario (sedimentador), las aguas residuales pasan a un reactor biológico, donde se lleva a cabo el proceso de fangos activos.

Durante el pretratamiento y el tratamiento primario se elimina parte de la DQO, en ambos casos se ha supuesto un valor del 10%. Operando con un rendimiento de eliminación de la DQO del 85%, y un rendimiento microbiano (Y) de 0,45, la producción microbiana ( $P_x$ ) será la siguiente:

$$Y = 0,45 \frac{\text{kg SV generados}}{\text{kg DQO alimentada}}$$

$$P_x = Y \cdot Q_{T1} \cdot DQO_{T1} \cdot \%E_{DQO}$$

$$P_x = 0,45 \frac{\text{kg SV}}{\text{kg DQO}} \cdot 254842,31 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 526 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \cdot 0,85 = 42241,3 \text{ kg SSV/d}$$

Suponiendo una concentración típica en sólidos volátiles (SV) de entre el 1% y el 2% ( $13 \text{ kg/m}^3$ ), se calcula el caudal correspondiente al fango secundario ( $F_2$ ) generado:

$$Q_{F_2} = \frac{P_x}{X_{SVF_2}}$$
$$Q_{F_2} = \frac{42241,3 \text{ kg/d}}{13 \text{ kg/m}^3} = 3249,33 \text{ m}^3/\text{d}$$

Para el cálculo de la corriente de agua tratada que sale del reactor ( $T_2$ ) y de los microplásticos que contiene, se procede igual que en los dos anteriores casos, con una eliminación esta vez del 80% de los microplásticos (Tabla 3):

$$Q_{T_2} = Q_{T_1} - Q_{F_2}$$
$$Q_{T_2} = 254842,31 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} - 3249,33 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} = 251593 \text{ m}^3/\text{d}$$
$$MP_{T_2} = Q_{T_1} \cdot X_{MP_{T_1}} \cdot (1 - \%Elim_{MP_{T_2}})$$
$$MP_{T_2} = 254842,31 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 2,20 \frac{\text{MP}}{\text{L}} \cdot (1 - 0,80) = 1,12 \cdot 10^8 \text{ MP/d}$$
$$X_{MP_{T_2}} = \frac{MP_{T_2}}{Q_{T_2}}$$
$$X_{MP_{T_2}} = \frac{1,12 \cdot 10^8 \text{ MP/d}}{251593 \text{ m}^3/\text{d}} = 0,45 \text{ MP/L}$$

En la corriente de fango secundario quedan retenidos entonces:

$$MP_{F_2} = Q_{T_1} \cdot X_{MP_{T_1}} \cdot \%Elim_{MP_{T_2}}$$
$$MP_{F_2} = 254842,31 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 2,20 \frac{\text{MP}}{\text{L}} \cdot 0,80 = 4,48 \cdot 10^8 \text{ MP/d}$$
$$X_{MP_{F_2}} = \frac{MP_{F_2}}{Q_{F_2}}$$
$$X_{MP_{F_2}} = \frac{4,48 \cdot 10^8 \text{ MP/d}}{3249,33 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}} = 1,38 \cdot 10^2 \text{ MP/L}$$

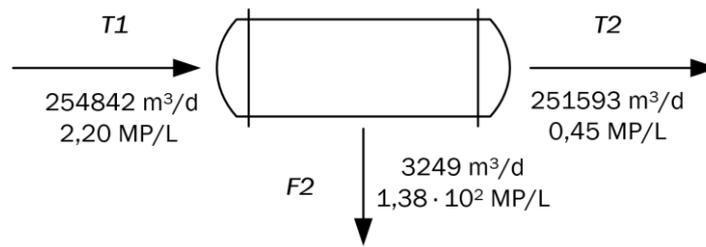


Figura 20. Diagrama de flujo del tratamiento secundario (reactor biológico y sedimentador) [Elaboración propia]

Los cálculos se repiten para los tres escenarios posibles (Tabla 3). En la siguiente tabla (Tabla 6) quedan recogidos la cantidad de microplásticos contenidos en el agua tratada, dependiendo del escenario de eliminación en el que se trabaje, incluyendo el ratio de eliminación global respecto a los microplásticos que entran en el proceso:

Tabla 6. Características del agua tratada [Elaboración propia]

	% Eliminación mínimo	% Eliminación medio	% Eliminación máximo
Caudal de agua de entrada (m <sup>3</sup> /d)	259.200	259.200	259.200
Microplásticos a las entrada (MP/L)	15,72	15,72	15,72
Caudal de agua a la salida (m <sup>3</sup> /d)	251.593	251.593	251.593
Microplásticos a la salida (MP/L)	2,11	0,45	0,01
Ratio de eliminación global (%)	87,00	97,25	99,92
Descarga total de microplásticos (MP/d)	$5,30 \cdot 10^8$	$1,12 \cdot 10^8$	$3,34 \cdot 10^6$

## Línea de fangos

Se procede a continuación con el cálculo de los valores de las corrientes pertenecientes a la línea de fangos generados durante los tratamientos primario y secundario.

### - *Espesamiento de fangos*

Las dos corrientes de fangos procedentes del sedimentador primario ( $F_1$ ) y del reactor biológico ( $F_2$ ) se juntan para formar una única corriente denominada “fangos mixtos” ( $FM$ ), que presenta las siguientes características:

$$Q_{FM} = Q_{F1} + Q_{F2}$$

$$ST_{FM} = ST_{F1} + ST_{F2}$$

$$MP_{FM} = MP_{F1} + MP_{F2}$$

$$X_{MP_{FM}} = \frac{MP_{FM}}{Q_{FM}}$$

$$X_{ST_{FM}} = \frac{ST_{FM}}{Q_{FM}}$$

$$Q_{FM} = 1327,33 \frac{m^3}{d} + 3249,33 \frac{m^3}{d} = 4576,66 \frac{m^3}{d}$$

$$ST_{FM} = 23892,02 \frac{kg}{d} + 42241,29 \frac{kg}{d} = 66133,31 \frac{kg}{d}$$

$$MP_{FM} = 1,68 \cdot 10^9 \frac{MP}{d} + 4,48 \cdot 10^8 \frac{MP}{d} = 2,13 \cdot 10^9 \frac{MP}{d}$$

$$X_{MP_{FM}} = \frac{2,13 \cdot 10^9 \frac{MP}{d}}{4576,66 \frac{m^3}{d}} = 4,65 \cdot 10^2 \frac{MP}{L}$$

$$X_{ST_{FM}} = \frac{66133,31 \frac{kg}{d}}{4576,66 \frac{m^3}{d}} = 14,45 \frac{kg}{m^3}$$

Durante el proceso de espesamiento, se concentran los fangos hasta un 4% en masa. Puesto que la cantidad de ST no varía, la nueva corriente será:

$$ST_{FM} = ST_{FE} = 66133,31 \frac{kg}{d}$$

$$Q_{FE} = \frac{ST_{FE}}{X_{ST_{FE}}}$$

$$Q_{FE} = \frac{66133,31 \frac{kg}{d}}{40 \frac{kg}{m^3}} = 1653,33 \frac{m^3}{d}$$

Y la corriente de agua saliente entonces:

$$Q_{AE} = Q_{FM} - Q_{FE}$$

$$Q_{AE} = 4576,66 \frac{m^3}{d} - 1653,33 \frac{m^3}{d} = 2923,33 \frac{m^3}{d}$$

Dado el pequeño tamaño de los microplásticos, se reparten por igual entre la fase líquida y la fase sólida, por lo que la concentración es la misma en las corrientes de entrada y en las corrientes de salida del espesamiento (FE y AE):

$$X_{MP_{FM}} = X_{MP_{FE}} = X_{MP_{AE}} = 4,65 \cdot 10^2 \text{ MP/L}$$

El contenido en microplásticos de las corrientes de agua y fangos será entonces:

$$MP_{FE} = Q_{FE} \cdot X_{MP_{FE}}$$

$$MP_{AE} = Q_{AE} \cdot X_{MP_{AE}}$$

$$MP_{FE} = 1653,33 \frac{m^3}{d} \cdot 4,65 \cdot 10^2 \frac{MP}{L} = 7,69 \cdot 10^8 \text{ MP/d}$$

$$MP_{AE} = 2923,33 \frac{m^3}{d} \cdot 4,65 \cdot 10^2 \frac{MP}{L} = 1,36 \cdot 10^9 \text{ MP/d}$$

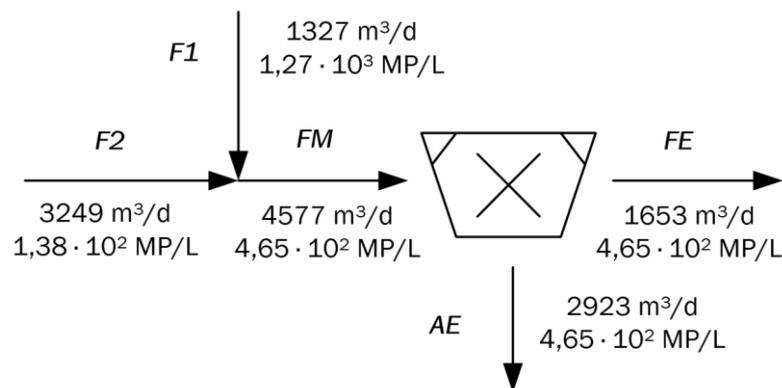


Figura 21. Diagrama de flujo del espesamiento de fangos [Elaboración propia]

#### - Digestión anaerobia

Después de reducir su contenido en agua los fangos pasan a un digestor anaerobio, donde se someten a un proceso de metanogénesis mediante el que los sólidos volátiles se transforman en metano (CH<sub>4</sub>). Los datos de partida son los siguientes:

Tabla 7. Datos de partida de la digestión anaerobia [Elaboración propia]

Relación SV/ST	0,7 kg SV/kg ST
$\rho$ fangos	1000 kg/m <sup>3</sup>
Rendimiento biológico (eliminación de DQO)	45 %
F (relación DQO/SV)	1,42 kg DQO/kg SV
Generación de CH <sub>4</sub>	0,35 Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg DQO eliminado
%CH <sub>4</sub> en el biogás	70 %

$$SV_{FE} = ST_{FE} \cdot 0,7 \frac{kg\ SV}{kg\ ST}$$

$$Q_{CH_4} = SV_{FE} \cdot F \cdot R_{Biológico} \cdot G_{CH_4}$$

$$Q_{BG} = \frac{Q_{CH_4}}{X_{CH_4}}$$

$$SV_{FE} = 66133,31 \frac{kg\ ST}{d} \cdot 0,7 \frac{kg\ SV}{kg\ ST} = 46293,32\ kg\ SV/d$$

$$Q_{CH_4} = 46293,32 \frac{kg\ SV}{d} \cdot 1,42 \frac{kg\ DQO}{kg\ SV\ elim} \cdot 0,45 \frac{kg\ SV\ elim}{kg\ SV\ alim} \cdot 0,35 \frac{Nm^3\ CH_4}{kg\ DQO\ elim} = 10353,5\ Nm^3/d$$

$$Q_{BG} = \frac{10353,5\ Nm^3/d}{0,7} = 14790,72\ Nm^3/d$$

La concentración de sólidos en los fangos digeridos (FD) se calcula de la siguiente forma:

$$SI_{FE} = ST_{FE} - SV_{FE}$$

$$SI_{FD} = SI_{FE}$$

$$SV_{FD} = SV_{FE} \cdot (1 - R_{Biológico})$$

$$ST_{FD} = SV_{FD} + SI_{FD}$$

$$SI_{FD} = SI_{FE} = 66133,31 \frac{kg}{d} - 46293,32 \frac{kg}{d} = 19840\ kg/d$$

$$SV_{FD} = 46293,32 \frac{kg}{d} \cdot (1 - 0,45) = 25461,32\ kg/d$$

$$ST_{FD} = 25461,32 \frac{kg}{d} + 19840 \frac{kg}{d} = 45301,32\ kg/d$$

Suponiendo una densidad de los fangos similar a la del agua ( $\rho \approx 1000 \text{ kg/m}^3$ ):

$$\dot{m}_{FE} = Q_{FE} \cdot \rho$$

$$\dot{m}_{Agua} = \dot{m}_{FE} - ST_{FE}$$

$$\dot{m}_{FD} = ST_{FD} + \dot{m}_{Agua}$$

$$Q_{FD} = \frac{\dot{m}_{FD}}{\rho}$$

$$\dot{m}_{FE} = 1653,33 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1653333 \text{ kg/d}$$

$$\dot{m}_{Agua} = 1653333 \frac{\text{kg}}{\text{d}} - 66133,31 \frac{\text{kg}}{\text{d}} = 1587199,48 \text{ kg/d}$$

$$\dot{m}_{FD} = 45301,32 \frac{\text{kg}}{\text{d}} + 1587199,48 \frac{\text{kg}}{\text{d}} = 1632500,8 \text{ kg/d}$$

$$Q_{FD} = \frac{1632500,8 \text{ kg/d}}{1000 \text{ kg/m}^3} = 1632,5 \text{ m}^3/\text{d}$$

La concentración de microplásticos (los cuales no acceden a la corriente de biogás, por lo que se encuentran todos en la corriente de fangos  $FD$ ) y de  $ST$  será:

$$MP_{FD} = MP_{FE} = Q_{FE} \cdot X_{MP_{FE}}$$

$$X_{ST_{FD}} = \frac{ST_{FD}}{Q_{FD}}$$

$$X_{MP_{FD}} = \frac{MP_{FD}}{Q_{FD}}$$

$$MP_{FD} = MP_{FE} = 1653,33 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 4,65 \cdot 10^2 \frac{\text{MP}}{\text{L}} = 7,69 \cdot 10^8 \text{ MP/d}$$

$$X_{ST_{FD}} = \frac{45301,32 \text{ kg/d}}{1632,5 \text{ m}^3/\text{d}} = 27,75 \text{ kg/m}^3$$

$$X_{MP_{FD}} = \frac{7,69 \cdot 10^8 \text{ MP/d}}{1632,5 \text{ m}^3/\text{d}} = 4,71 \cdot 10^2 \text{ MP/L}$$

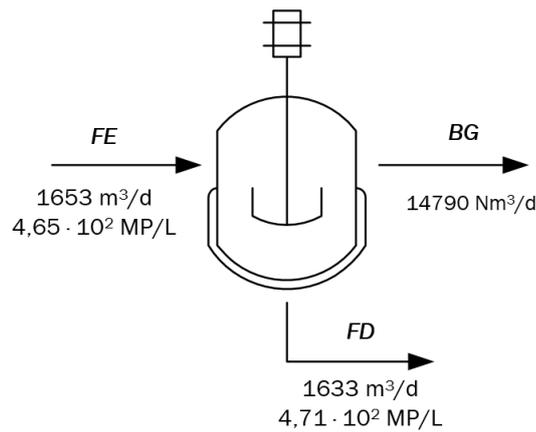


Figura 22. Diagrama de flujo del digestor anaerobio [Elaboración propia]

- Deshidratación de fangos

Una vez digeridos, los fangos se someten a un proceso de deshidratación para concentrarlos y eliminar la mayor cantidad de agua posible. El factor determinante es la sequedad del fango, que se define como:

$$\%S = \frac{kg\ ST}{kg\ fango}$$

El fango digerido presenta una sequedad del 3%, y mediante la deshidratación se concentra hasta un 25% (valor típico):

$$\dot{m}_{FDH} = \frac{ST_{FD}}{\%S} \cdot 100$$

$$Q_{FDH} = \frac{\dot{m}_{FDH}}{\rho}$$

$$\dot{m}_{FDH} = \frac{45301,32\ kg/d}{0,25} = 181205\ kg/d$$

$$Q_{FDH} = \frac{181205\ kg/d}{1000\ kg/m^3} = 181,205\ m^3/d$$

Y la corriente de agua procedente de la deshidratación (ADH) entonces será:

$$\dot{m}_{Agua_{ADH}} = \dot{m}_{FD} - \dot{m}_{FDH}$$

$$Q_{ADH} = \frac{\dot{m}_{Agua_{ADH}}}{\rho}$$

$$\dot{m}_{\text{Agua}_{ADH}} = 1632500,8 \frac{kg}{d} - 181205 \frac{kg}{d} = 1451296 \text{ kg/d}$$

$$Q_{ADH} = \frac{1451296 \text{ kg/d}}{1000 \text{ kg/m}^3} = 1451,296 \text{ m}^3/\text{d}$$

Al igual que en el caso del espesamiento, se conserva la concentración de microplásticos en ambas corrientes:

$$X_{MP_{FD}} = X_{MP_{FDH}} = X_{MP_{ADH}} = 4,71 \cdot 10^2 \text{ MP/L}$$

$$MP_{FDH} = Q_{FDH} \cdot X_{MP_{FDH}}$$

$$MP_{ADH} = Q_{ADH} \cdot X_{MP_{ADH}}$$

$$MP_{FDH} = 181,205 \frac{\text{m}^3}{d} \cdot 4,71 \cdot 10^2 \frac{\text{MP}}{\text{L}} = 8,54 \cdot 10^7 \text{ MP/d}$$

$$MP_{ADH} = 1451,296 \frac{\text{m}^3}{d} \cdot 4,71 \cdot 10^2 \frac{\text{MP}}{\text{L}} = 6,48 \cdot 10^8 \text{ MP/d}$$

La corriente de agua procedente del espesamiento (AE) y la corriente de agua procedente de la deshidratación (ADH) se unen en una única corriente de salida (AO):

$$Q_{AO} = Q_{AE} + Q_{ADH}$$

$$MP_{AO} = MP_{AE} + MP_{ADH}$$

$$X_{MP_{AO}} = \frac{MP_{AO}}{Q_{AO}}$$

$$Q_{AO} = 2923,33 \frac{\text{m}^3}{d} + 1451,30 \frac{\text{m}^3}{d} = 4374,63 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$MP_{AO} = 1,36 \cdot 10^9 \frac{\text{MP}}{d} + 6,48 \cdot 10^8 \frac{\text{MP}}{d} = 2,04 \cdot 10^9 \text{ MP/d}$$

$$X_{MP_{AO}} = \frac{2,04 \cdot 10^9 \text{ MP/d}}{4374,63 \text{ m}^3/\text{d}} = 4,67 \cdot 10^2 \text{ MP/L}$$

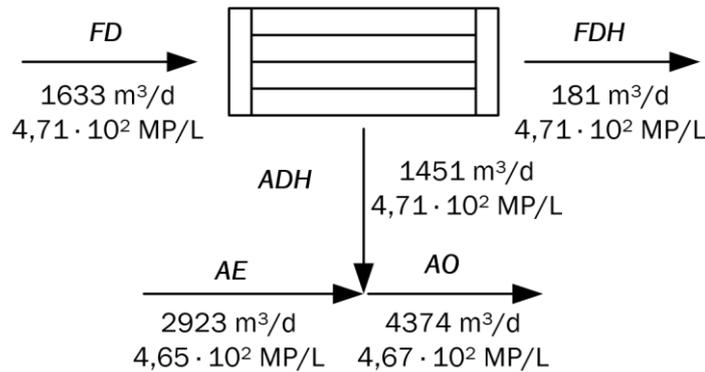


Figura 23. Diagrama de flujo de la deshidratación de fangos [Elaboración propia]

Al igual que en la línea de aguas, los escenarios de eliminación posibles (Tabla 3) determinan la cantidad de microplásticos presentes en las corrientes de la línea de fangos. En la siguiente tabla resumen (Tabla 8) se recogen los microplásticos contenidos en el fango procedente del pretratamiento (FPT), en el fango mixto digerido y deshidratado procedente de los tratamientos primario y secundario (FDH) y en el agua procedente del espesamiento y la deshidratación del fango (AO); además se ha incluido el total de microplásticos retirados de la corriente de aguas en cada escenario:

Tabla 8. Contenido de microplásticos en la línea de fangos y microplásticos retirados, en MP/d [Elaboración propia]

	% Eliminación mínimo	% Eliminación medio	% Eliminación máximo
Fango de pretratamiento (FPT)	$1,43 \cdot 10^9$	$1,83 \cdot 10^9$	$2,40 \cdot 10^9$
Agua de fangos (AO)	$8,50 \cdot 10^7$	$8,54 \cdot 10^7$	$6,69 \cdot 10^7$
Fango mixto digerido y deshidratado (FDH)	$2,03 \cdot 10^9$	$2,04 \cdot 10^9$	$5,36 \cdot 10^8$
Microplásticos totales retirados	$3,55 \cdot 10^9$	$3,69 \cdot 10^9$	$4,07 \cdot 10^9$

NOTA: Para el escenario “% Eliminación media”, la corriente de agua de fangos (AO) tiene un total de  $2,04 \cdot 10^9$  MP/d. Dado que su caudal ( $4374,63 \text{ m}^3/\text{d}$ ) tan sólo representa un 1,7 % respecto al caudal de entrada ( $259.200 \text{ m}^3/\text{d}$ ), y que contiene aproximadamente un 50% de los microplásticos iniciales, la recirculación a cabezas supondría la reentrada al sistema de una gran cantidad de microplásticos. Para evitar una acumulación dentro de los equipos es necesario realizar una purga de estos microplásticos. Se ha decidido eliminar la corriente de recirculación del balance de materia.

## Balance total de microplásticos en una EDAR

Durante el tratamiento se eliminan gran parte de los microplásticos contenidos en el agua residual, que terminan en la línea de fangos. En el siguiente gráfico aparece representado el flujo de microplásticos que se libera al día en cada una de las corrientes de salida del proceso dependiendo del porcentaje de eliminación con el que se trabaje (*Figura 24*):

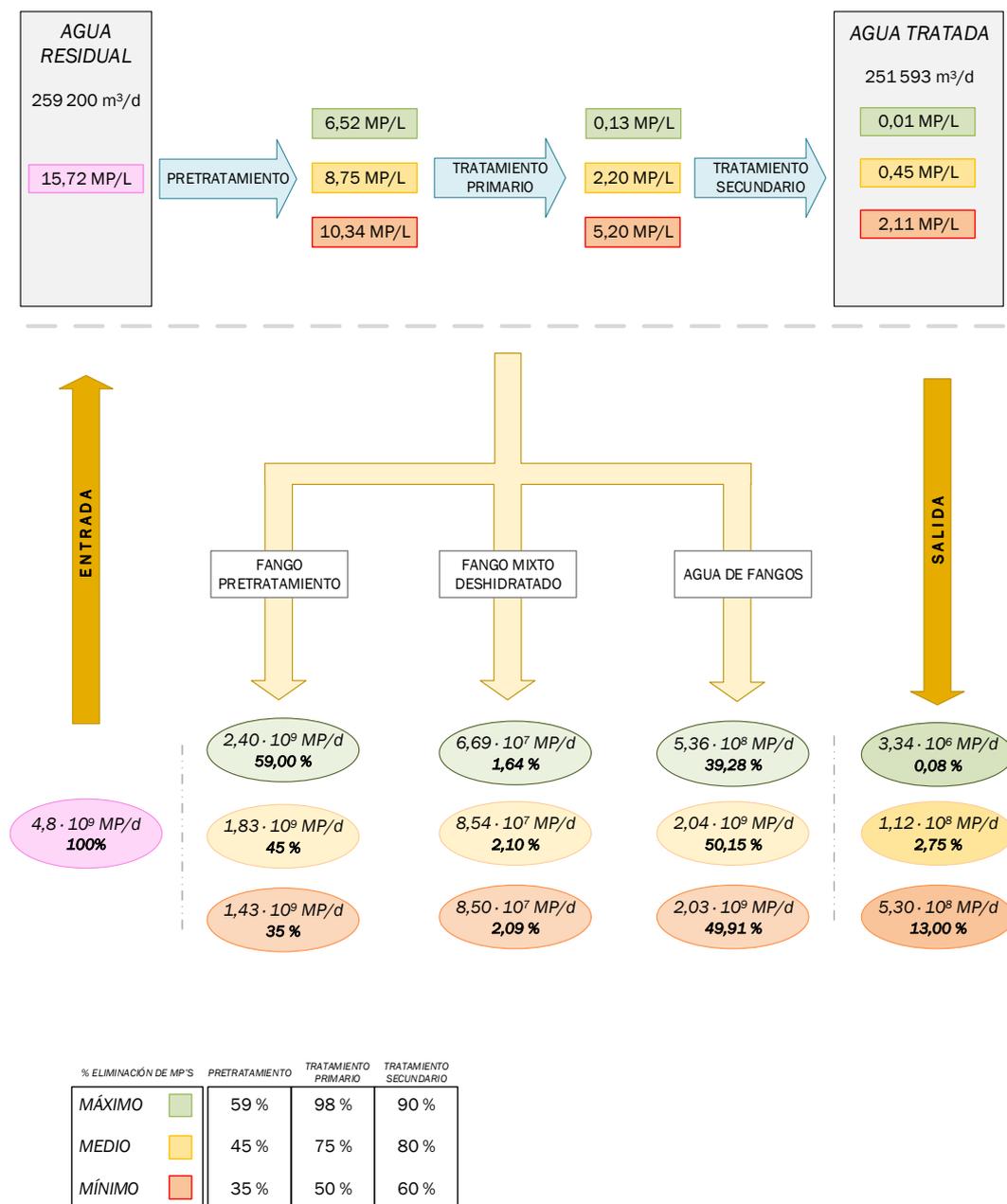


Figura 24. Balance total de microplásticos en una EDAR urbana [Elaboración propia]



En la *Figura 24* se describe la evolución de la concentración de microplásticos a lo largo de todo el proceso de tratamiento de la EDAR urbana. Existen tres escenarios posibles, cada uno de un color, dependiendo del porcentaje de eliminación con el que se trabaje. El contenido de microplásticos se reduce hasta en tres órdenes de magnitud, pasando de una concentración inicial de  $4,08 \cdot 10^9$  MP/d a una final de  $3,34 \cdot 10^6$  MP/d en el caso de eliminación máxima (se produce una reducción del contenido en microplásticos del 99%). En los tres casos, el pretratamiento es la etapa donde se elimina la mayor cantidad de microplásticos, quedando retenidos en la corriente de fangos (*FPT*) entre un 59% (en el caso de máxima eliminación) y un 35% (en el caso de mínima eliminación). Después del tratamiento secundario, en la corriente de agua de fangos (*AO*) quedan retenidos prácticamente el resto (entre un 39% y un 50%, respectivamente). La gran mayoría de los microplásticos (entre un 77% y un 99%) desaparecen de la corriente de agua tratada, pero terminan en el fango o en el agua procedente del fango mixto.



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

## 6. Conclusiones

El problema de los microplásticos sigue siendo un campo por explorar y del que la información disponible es limitada. A día de hoy, millones de toneladas de plásticos terminan en el mar, donde se degradan y descomponen en microplásticos, que se dispersan por todo el planeta.

A lo largo de este trabajo se han estudiado los tipos de microplásticos que se pueden encontrar en el medio ambiente, los métodos por los que se degradan, los mecanismos de transporte que los llevan de un lugar a otro por tierra, agua y aire, así como los métodos de detección y los posibles daños que puede causar su interacción con los organismos vivos.

Dado que todavía son escasos los estudios que hablan sobre la problemática que representan, los datos de los que se dispone son experimentales y no representan con fidelidad la complejidad del problema. La dificultad que supone su detección, y al no conocer con exactitud los efectos a medio y largo plazo sobre el organismo no permiten valorar en su totalidad el riesgo que suponen.

Una de las principales fuentes de microplásticos al ambiente son las plantas depuradoras de aguas (EDAR). La simulación realizada en una planta depuradora de aguas urbanas muestra la importancia de estas en el vertido de microplásticos al medio ambiente, siendo posible la eliminación de una gran cantidad de partículas en las primeras unidades de tratamiento. Sin embargo, el problema no desaparece, dado que los microplásticos abandonan la corriente de aguas principal para depositarse en los fangos generados durante el proceso y en el agua procedente de estos fangos, que posteriormente se llevará a vertederos, se empleará para actividades agrícolas y ganaderas, etc.

Hasta ahora las tecnologías para la eliminación de microplásticos se encuentran en fase de desarrollo, y se reducen a estudios experimentales en pequeñas plantas de tratamiento, sin haberse aún desarrollado tecnologías que permitan su eliminación por completo. Además, las políticas y las medidas implantadas por los gobiernos no solucionan el problema por completo y buscan resultados a medio y largo plazo. Serán necesarios estudios futuros que aborden este tema, o que busquen darles un segundo uso y eviten que se desechen.



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**



## 7. Líneas futuras

Como se ha recogido en el balance a la EDAR, los sumideros principales de microplásticos son la corriente de agua de fangos (AO) y la corriente de fango mixto deshidratado (FDH). Será necesario trabajar en la forma de retirar estos microplásticos de estas corrientes, y una vez retirados ver si es posible reutilizarlos con otro fin o encontrar la manera de eliminarlos y evitar así su acumulación.

Debido a su pequeño tamaño, el principal problema que suponen los microplásticos es su eliminación. Hasta la fecha, sólo se puede evitar que acaben en el medio ambiente reduciendo la producción global de plástico dado que no es posible reciclarlos.

A pesar de eso, existen algunos estudios centrados en este tema, en los cuales se han barajado alternativas como la incineración de plásticos, teniendo resultados negativos al encontrar microplásticos en las cenizas como residuos sólidos [123]; o la eliminación fotocatalítica, donde mediante luz visible se emplearon sustratos de fibra de vidrio para atrapar microplásticos de baja densidad, y las partículas generadas como subproductos no se consideraban tóxicas [124].

Se trata de un campo en desarrollo, y son necesario nuevos métodos y nuevos estudios que permitan aplicar las tecnologías a gran escala.



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

## 8. Bibliografía

- [1] D. Huang *et al.*, “Microplastics and nanoplastics in the environment: Macroscopic transport and effects on creatures,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 407, no. October 2020, p. 124399, 2021, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124399.
- [2] S. L. Wright and F. J. Kelly, “Plastic and Human Health: A Micro Issue?,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 51, no. 12, pp. 6634–6647, 2017, doi: 10.1021/acs.est.7b00423.
- [3] A. Jahnke *et al.*, “Reducing Uncertainty and Confronting Ignorance about the Possible Impacts of Weathering Plastic in the Marine Environment,” *Environ. Sci. Technol. Lett.*, vol. 4, no. 3, pp. 85–90, 2017, doi: 10.1021/acs.estlett.7b00008.
- [4] C. Wang, J. Zhao, and B. Xing, “Environmental source, fate, and toxicity of microplastics,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 407, no. May 2020, p. 124357, 2021, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124357.
- [5] “Contaminación: Más de 140 millones de toneladas de plásticos contaminan ya los ríos, océanos y lagos del planeta | Clima y Medio Ambiente | EL PAÍS.” <https://elpais.com/clima-y-medio-ambiente/2022-02-22/mas-de-140-millones-de-toneladas-de-plasticos-contaminan-ya-los-rios-oceanos-y-lagos-del-planeta.html> (accessed Mar. 01, 2022).
- [6] “Microplástico : HUESKER.” <https://www.huesker.es/empresa/sostenibilidad/microplastico/> (accessed Nov. 05, 2021).
- [7] K. Duis and A. Coors, “Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects,” *Environ. Sci. Eur.*, vol. 28, no. 2, 2016, doi: 10.1186/s12302-015-0069-y.
- [8] “Microplásticos: pequeños fragmentos, gran problemática | Anellides.” <https://anellides.com/es/blog/microplasticos-pequenos-fragmentos-gran-problematica/> (accessed Jun. 23, 2021).
- [9] T. S. M. Amelia, W. M. A. W. M. Khalik, M. C. Ong, Y. T. Shao, H. J. Pan, and K. Bhubalan, “Marine microplastics as vectors of major ocean pollutants and its hazards to the marine ecosystem and humans,” *Prog. Earth Planet. Sci.*, vol. 8, no. 1, 2021, doi: 10.1186/s40645-020-00405-4.
- [10] L. Hermabessiere *et al.*, “Occurrence and effects of plastic additives on marine environments and organisms: A review,” *Chemosphere*, vol. 182, pp. 781–793, Sep. 2017, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2017.05.096.
- [11] A. ter Halle, L. Ladirat, M. Martignac, A. F. Mingotaud, O. Boyron, and E. Perez, “To what extent are microplastics from the open ocean weathered?,” *Environ. Pollut.*, vol. 227, pp. 167–174, Aug. 2017, doi: 10.1016/J.ENVPOL.2017.04.051.
- [12] L. W. McKeen, “Introduction to the Physical, Mechanical, and Thermal Properties of Plastics and Elastomers,” *Eff. Long Term Therm. Expo. Plast. Elastomers*, pp. 43–71, Jan. 2014, doi: 10.1016/B978-0-323-22108-5.00003-5.
- [13] K. Zhang *et al.*, “Understanding plastic degradation and microplastic formation in the environment: A review,” *Environ. Pollut.*, vol. 274, 2021, doi: 10.1016/j.envpol.2021.116554.
- [14] K. Balani, “Surface engineering and modification for biomedical applications. Biosurfaces.” John Wiley & Sons, Inc, pp. 201–238. Available from: <http://dx.doi.org/10.1002/9781118444444.ch10>, 2014.
- [15] L. Cai, D. Wu, J. Xia, H. Shi, and H. Kim, “Influence of physicochemical surface properties on the adhesion of bacteria onto four types of plastics,” *Sci. Total*



- Environ.*, vol. 671, pp. 1101–1107, Jun. 2019, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2019.03.434.
- [16] M. Arhant, M. Le Gall, P. Y. Le Gac, and P. Davies, “Impact of hydrolytic degradation on mechanical properties of PET - Towards an understanding of microplastics formation,” *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 161, pp. 175–182, Mar. 2019, doi: 10.1016/J.POLYMDEGRADSTAB.2019.01.021.
- [17] F. Petersen and J. A. Hubbart, “The occurrence and transport of microplastics: The state of the science,” *Sci. Total Environ.*, vol. 758, p. 143936, 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143936.
- [18] K. Liu et al., “Vapour-liquid equilibrium measurements and extractive distillation process design for separation of azeotropic mixture (dimethyl carbonate + ethanol),” *J. Chem. Thermodyn.*, vol. 133, pp. 10–18, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.jct.2019.01.027.
- [19] A. Fairbrother et al., “Temperature and light intensity effects on photodegradation of high-density polyethylene,” *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 165, pp. 153–160, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2019.05.002.
- [20] H. Yang, M. Ma, J. R. Thompson, and R. J. Flower, “Waste management, informal recycling, environmental pollution and public health,” *J Epidemiol Community Heal.*, vol. 72, no. 3, pp. 237–243, Mar. 2018, doi: 10.1136/JECH-2016-208597.
- [21] M. Kumar et al., “Microplastics as pollutants in agricultural soils,” *Environ. Pollut.*, vol. 265, p. 114980, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114980>.
- [22] C. B. Crawford and B. Quinn, “4 - Physicochemical properties and degradation,” C. B. Crawford and B. B. T.-M. P. Quinn, Eds. Elsevier, 2017, pp. 57–100.
- [23] A. Rudin and P. Choi, “Chapter 4 - Mechanical Properties of Polymer Solids and Liquids,” A. Rudin and P. B. T.-T. E. of P. S. & E. (Third E. Choi, Eds. Boston: Academic Press, 2013, pp. 149–229.
- [24] T. Kotoyori, “Activation energy for the oxidative thermal degradation of plastics,” *Thermochim. Acta*, vol. 5, no. 1, pp. 51–58, 1972, doi: [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(72\)80018-2](https://doi.org/10.1016/0040-6031(72)80018-2).
- [25] F. fei Liu, G. zhou Liu, Z. lin Zhu, S. chun Wang, and F. fei Zhao, “Interactions between microplastics and phthalate esters as affected by microplastics characteristics and solution chemistry,” *Chemosphere*, vol. 214, pp. 688–694, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.09.174.
- [26] P. Pal, J. P. Pandey, and G. Sen, “Chapter 5 - Synthesis and Application as Programmable Water Soluble Adhesive of Polyacrylamide Grafted Gum Tragacanth (GT-g-PAM),” V. K. B. T.-B. G. Thakur, Ed. Elsevier, 2018, pp. 153–203.
- [27] F. S. Cesa, A. Turra, H. H. Checon, B. Leonardi, and J. Baruque-Ramos, “Laundering and textile parameters influence fibers release in household washings,” *Environ. Pollut.*, vol. 257, p. 113553, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113553>.
- [28] S. Wagner, T. Hüffer, P. Klöckner, M. Wehrhahn, T. Hofmann, and T. Reemtsma, “Tire wear particles in the aquatic environment - A review on generation, analysis, occurrence, fate and effects,” *Water Res.*, vol. 139, pp. 83–100, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.03.051>.
- [29] T. J. Battin, K. Besemer, M. M. Bengtsson, A. M. Romani, and A. I. Packmann, “The ecology and biogeochemistry of stream biofilms,” *Nat. Rev. Microbiol.*, vol. 14, no. 4, pp. 251–263, 2016, doi: 10.1038/nrmicro.2016.15.
- [30] J.-D. Gu, “Microbiological deterioration and degradation of synthetic polymeric materials: recent research advances,” *Int. Biodeterior. Biodegradation*, vol. 52, no. 2, pp. 69–91, 2003, doi: [74](https://doi.org/10.1016/S0964-</a></p></div><div data-bbox=)



- 8305(02)00177-4.
- [31] R. Dris, J. Gasperi, M. Saad, C. Mirande, and B. Tassin, "Synthetic fibers in atmospheric fallout: A source of microplastics in the environment?," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 104, no. 1, pp. 290–293, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.01.006>.
- [32] K. Bourzac, "Microplastics catch an atmospheric ride to the oceans and the Arctic," *Chemical & Engineering News*, 2020. [https://cen.acs.org/environment/atmospheric-chemistry/Microplastics-catch-atmospheric-ride-oceans/98/web/2020/07?utm\\_source=Newsletter&utm\\_medium=Newsletter&utm\\_campaign=CEN](https://cen.acs.org/environment/atmospheric-chemistry/Microplastics-catch-atmospheric-ride-oceans/98/web/2020/07?utm_source=Newsletter&utm_medium=Newsletter&utm_campaign=CEN) (accessed Nov. 11, 2021).
- [33] R. Dris, J. Gasperi, V. Rocher, M. Saad, N. Renault, and B. Tassin, "Microplastic contamination in an urban area: a case study in Greater Paris," *Environ. Chem.*, vol. 12, no. 5, pp. 592–599, 2015, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1071/EN14167>.
- [34] R. Dris et al., "A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments," *Environ. Pollut.*, vol. 221, pp. 453–458, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.013>.
- [35] J. C. Prata, "Airborne microplastics: Consequences to human health?," *Environ. Pollut.*, vol. 234, pp. 115–126, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.043>.
- [36] L. Nizzetto, M. Futter, and S. Langaas, "Are Agricultural Soils Dumps for Microplastics of Urban Origin?," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 50, no. 20, pp. 10777–10779, Oct. 2016, doi: [10.1021/acs.est.6b04140](https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04140).
- [37] X.-D. Sun et al., "Differentially charged nanoplastics demonstrate distinct accumulation in *Arabidopsis thaliana*," *Nat. Nanotechnol.*, vol. 15, no. 9, pp. 755–760, 2020, doi: [10.1038/s41565-020-0707-4](https://doi.org/10.1038/s41565-020-0707-4).
- [38] Y. Chae and Y.-J. An, "Current research trends on plastic pollution and ecological impacts on the soil ecosystem: A review," *Environ. Pollut.*, vol. 240, pp. 387–395, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.05.008>.
- [39] L. Li et al., "Effective uptake of submicrometre plastics by crop plants via a crack-entry mode," *Nat. Sustain.*, vol. 3, no. 11, pp. 929–937, 2020, doi: [10.1038/s41893-020-0567-9](https://doi.org/10.1038/s41893-020-0567-9).
- [40] A. A. Horton, C. Svendsen, R. J. Williams, D. J. Spurgeon, and E. Lahive, "Large microplastic particles in sediments of tributaries of the River Thames, UK – Abundance, sources and methods for effective quantification," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 114, no. 1, pp. 218–226, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.09.004>.
- [41] A. A. Horton, A. Walton, D. J. Spurgeon, E. Lahive, and C. Svendsen, "Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities," *Sci. Total Environ.*, vol. 586, pp. 127–141, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.190>.
- [42] T. J. Hoellein, A. J. Shogren, J. L. Tank, P. Risteca, and J. J. Kelly, "Microplastic deposition velocity in streams follows patterns for naturally occurring allochthonous particles," *Sci. Rep.*, vol. 9, no. 1, 2019, doi: [10.1038/s41598-019-40126-3](https://doi.org/10.1038/s41598-019-40126-3).
- [43] J. Sun, X. Dai, Q. Wang, M. C. M. van Loosdrecht, and B. J. Ni, "Microplastics in wastewater treatment plants: Detection, occurrence and removal," *Water Research*, vol. 152. Elsevier Ltd, pp. 21–37, Apr. 01, 2019, doi: [10.1016/j.watres.2018.12.050](https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.12.050).
- [44] W. C. Li, H. F. TSE, and L. FOK, "Plastic waste in the marine environment: A review of sources, occurrence and effects," *Sci. Total Environ.*, vol. 566–567,



- pp. 333–349, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.084>.
- [45] M. Cole, P. Lindeque, C. Halsband, and T. S. Galloway, “Microplastics as contaminants in the marine environment: A review,” *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 62, no. 12, pp. 2588–2597, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.025>.
- [46] L. C. M. Lebreton, J. Van Der Zwet, J. Damsteeg, B. Slat, A. Andrady, and J. Reisser, “River plastic emissions to the world ’ s oceans,” *Nat. Commun.*, vol. 8, pp. 1–10, 2017, doi: [10.1038/ncomms15611](https://doi.org/10.1038/ncomms15611).
- [47] J. Boucher and D. Friot, *Primary microplastics in the oceans: A global evaluation of sources*. IUCN International Union for Conservation of Nature, 2017.
- [48] C. D. Rummel, A. Jahnke, E. Gorokhova, D. Kühnel, and M. Schmitt-Jansen, “Impacts of Biofilm Formation on the Fate and Potential Effects of Microplastic in the Aquatic Environment,” *Environ. Sci. Technol. Lett.*, vol. 4, no. 7, pp. 258–267, Jul. 2017, doi: [10.1021/acs.estlett.7b00164](https://doi.org/10.1021/acs.estlett.7b00164).
- [49] L. D. K. Kanhai, K. Gardfeldt, T. Krumpfen, R. C. Thompson, and I. O’Connor, “Microplastics in sea ice and seawater beneath ice floes from the Arctic Ocean,” *Sci. Rep.*, vol. 10, no. 1, p. 5004, 2020, doi: [10.1038/s41598-020-61948-6](https://doi.org/10.1038/s41598-020-61948-6).
- [50] A. Rahman, A. Sarkar, O. P. Yadav, G. Achari, and J. Slobodnik, “Potential human health risks due to environmental exposure to nano- and microplastics and knowledge gaps: A scoping review,” *Sci. Total Environ.*, vol. 757, p. 143872, 2021, doi: [10.1016/j.scitotenv.2020.143872](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143872).
- [51] K. D. Cox, G. A. Covernton, H. L. Davies, J. F. Dower, F. Juanes, and S. E. Dudas, “Human Consumption of Microplastics,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 53, no. 12, pp. 7068–7074, Jun. 2019, doi: [10.1021/acs.est.9b01517](https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01517).
- [52] A. Karami, A. Golieskardi, C. Keong Choo, V. Larat, T. S. Galloway, and B. Salamatinia, “The presence of microplastics in commercial salts from different countries,” *Sci. Rep.*, vol. 7, no. 1, p. 46173, 2017, doi: [10.1038/srep46173](https://doi.org/10.1038/srep46173).
- [53] D. Yang, H. Shi, L. Li, J. Li, K. Jabeen, and P. Kollandhasamy, “Microplastic Pollution in Table Salts from China,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 49, no. 22, pp. 13622–13627, Nov. 2015, doi: [10.1021/acs.est.5b03163](https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03163).
- [54] Y. Jin, L. Lu, W. Tu, T. Luo, and Z. Fu, “Impacts of polystyrene microplastic on the gut barrier, microbiota and metabolism of mice,” *Sci. Total Environ.*, vol. 649, pp. 308–317, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.353>.
- [55] S. Rist, B. Carney Almroth, N. B. Hartmann, and T. M. Karlsson, “A critical perspective on early communications concerning human health aspects of microplastics,” *Sci. Total Environ.*, vol. 626, pp. 720–726, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.092>.
- [56] A. D. Vethaak and H. A. Leslie, “Plastic Debris Is a Human Health Issue,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 50, no. 13, pp. 6825–6826, Jul. 2016, doi: [10.1021/acs.est.6b02569](https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02569).
- [57] M. Revel, A. Châtel, and C. Mouneyrac, “Micro(nano)plastics: A threat to human health?,” *Curr. Opin. Environ. Sci. Heal.*, vol. 1, pp. 17–23, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.10.003>.
- [58] G. F. Schirinzi, I. Pérez-Pomeda, J. Sanchís, C. Rossini, M. Farré, and D. Barceló, “Cytotoxic effects of commonly used nanomaterials and microplastics on cerebral and epithelial human cells,” *Environ. Res.*, vol. 159, pp. 579–587, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.08.043>.
- [59] I. Inkielewicz-Stepniak et al., “The Role of Mucin in the Toxicological Impact of Polystyrene Nanoparticles,” *Materials*, vol. 11, no. 5, 2018, doi: [10.3390/ma11050724](https://doi.org/10.3390/ma11050724).
- [60] S. Gina, O. D. R., and P. Hiren, “Post-Implantation Alterations of Polypropylene in the Human,” *J. Urol.*, vol. 188, no. 1, pp. 27–32, Jul. 2012, doi: [10.1016/j.juro.2012.02.2559](https://doi.org/10.1016/j.juro.2012.02.2559).

- [61] I. Brandts *et al.*, “Effects of polymethylmethacrylate nanoplastics on *Dicentrarchus labrax*,” *Genomics*, vol. 110, no. 6, pp. 435–441, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ygeno.2018.10.006>.
- [62] J. C. Prata, J. P. da Costa, I. Lopes, A. C. Duarte, and T. Rocha-Santos, “Environmental exposure to microplastics: An overview on possible human health effects,” *Sci. Total Environ.*, vol. 702, p. 134455, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134455>.
- [63] C. Campanale, C. Massarelli, I. Savino, V. Locaputo, and V. F. Uricchio, “A Detailed Review Study on Potential Effects of Microplastics and Additives of Concern on Human Health,” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 17, no. 4. 2020, doi: 10.3390/ijerph17041212.
- [64] J. Hwang, D. Choi, S. Han, J. Choi, and J. Hong, “An assessment of the toxicity of polypropylene microplastics in human derived cells,” *Sci. Total Environ.*, vol. 684, pp. 657–669, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.071>.
- [65] D. M. Monti *et al.*, “Biocompatibility, uptake and endocytosis pathways of polystyrene nanoparticles in primary human renal epithelial cells,” *J. Biotechnol.*, vol. 193, pp. 3–10, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2014.11.004>.
- [66] S. M. J. MohanKumar, A. Campbell, M. Block, and B. Veronesi, “Particulate matter, oxidative stress and neurotoxicity,” *Neurotoxicology*, vol. 29, no. 3, pp. 479–488, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2007.12.004>.
- [67] Y. Deng, Y. Zhang, B. Lemos, and H. Ren, “Tissue accumulation of microplastics in mice and biomarker responses suggest widespread health risks of exposure,” *Sci. Rep.*, vol. 7, no. 1, p. 46687, 2017, doi: 10.1038/srep46687.
- [68] M. Qu, K. Xu, Y. Li, G. Wong, and D. Wang, “Using *acs-22* mutant *Caenorhabditis elegans* to detect the toxicity of nanopolystyrene particles,” *Sci. Total Environ.*, vol. 643, pp. 119–126, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.173>.
- [69] R. Sussarellu *et al.*, “Oyster reproduction is affected by exposure to polystyrene microplastics,” *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 113, no. 9, pp. 2430 LP – 2435, Mar. 2016, doi: 10.1073/pnas.1519019113.
- [70] E. Besseling, J. T. K. Quik, M. Sun, and A. A. Koelmans, “Fate of nano- and microplastic in freshwater systems: A modeling study,” *Environ. Pollut.*, vol. 220, pp. 540–548, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.10.001>.
- [71] G. Kalčíková, “Aquatic vascular plants – A forgotten piece of nature in microplastic research,” *Environ. Pollut.*, vol. 262, p. 114354, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114354>.
- [72] A. Mateos-Cárdenas, D. T. Scott, G. Seitmaganbetova, van P. Frank N.A.M., O. John, and J. Marcel A.K., “Polyethylene microplastics adhere to *Lemna minor* (L.), yet have no effects on plant growth or feeding by *Gammarus duebeni* (Lillj.),” *Sci. Total Environ.*, vol. 689, pp. 413–421, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.359>.
- [73] T.-J. Park, S.-H. Lee, M.-S. Lee, J.-K. Lee, S.-H. Lee, and K.-D. Zoh, “Occurrence of microplastics in the Han River and riverine fish in South Korea,” *Sci. Total Environ.*, vol. 708, p. 134535, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134535>.
- [74] Y. Tang *et al.*, “A review: Research progress on microplastic pollutants in aquatic environments,” *Sci. Total Environ.*, vol. 766, p. 142572, 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142572.
- [75] S.-L. Liu, M.-F. Jian, L.-Y. Zhou, W.-H. Li, X.-E. Wu, and D. Rao, “[Pollution Characteristics of Microplastics in Migratory Bird Habitats Located Within Poyang Lake Wetlands].,” *Huan jing ke xue= Huanjing kexue*, vol. 40, no. 6, pp.

- 2639–2646, Jun. 2019, doi: 10.13227/j.hjcx.201812111.
- [76] Q. Q. Zhang, “Emission Estimation, Multimedia Fate Modeling and Risk Assessment of Typical Emerging Pollutants at River Basin Scale in China.” Ph. D. Thesis, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of ..., 2015.
- [77] J. Li, K. Zhang, and H. Zhang, “Adsorption of antibiotics on microplastics,” *Environ. Pollut.*, vol. 237, pp. 460–467, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.02.050>.
- [78] X. Li et al., “Responses of microalgae *Coelastrella* sp. to stress of cupric ions in treatment of anaerobically digested swine wastewater,” *Bioresour. Technol.*, vol. 251, pp. 274–279, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.12.058>.
- [79] C. Muller-Karanassos, A. Turner, W. Arundel, T. Vance, P. K. Lindeque, and M. Cole, “Antifouling paint particles in intertidal estuarine sediments from southwest England and their ingestion by the harbour ragworm, *Hediste diversicolor*,” *Environ. Pollut.*, vol. 249, pp. 163–170, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.009>.
- [80] D. Brennecke, B. Duarte, F. Paiva, I. Caçador, and J. Canning-Clode, “Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment,” *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, vol. 178, pp. 189–195, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.12.003>.
- [81] G. Roland, J. J. R., and L. K. Lavender, “Production, use, and fate of all plastics ever made,” *Sci. Adv.*, vol. 3, no. 7, p. e1700782, Nov. 2021, doi: 10.1126/sciadv.1700782.
- [82] “Aesan - Agencia Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición.” [https://www.aesan.gob.es/AECOSAN/web/seguridad\\_alimentaria/ampliacion/microplasticos\\_nanoplasticos.htm](https://www.aesan.gob.es/AECOSAN/web/seguridad_alimentaria/ampliacion/microplasticos_nanoplasticos.htm) (accessed Nov. 30, 2021).
- [83] “Normativa europea sobre plásticos: impacto ambiental y reducción del consumo - Macsa ID.” <https://www.macsa.com/blog/normativa-europea-sobre-plasticos-impacto-ambiental-y-reduccion-del-consumo/> (accessed Nov. 30, 2021).
- [84] “Reglamentos Relativos a Plásticos de Un Solo Uso y Microplásticos - CRITICAL CATALYST.” <https://criticalcatalyst.com/es/reglamentos-relativos-a-plasticos-de-un-solo-uso-y-microplasticos/> (accessed Nov. 30, 2021).
- [85] B. D. L. C. Generales, “121/000056 Proyecto de Ley de residuos y suelos contaminados. Boletín Oficial de las Cortes Generales. Congreso de los Diputados, XIV Legislatura,” *VIII Legís. Ser. A ...*, pp. 1–100, 2021, [Online]. Available: [http://www.comunidad-tdah.com/contenido/images/tdah\\_proposicion\\_pp.pdf](http://www.comunidad-tdah.com/contenido/images/tdah_proposicion_pp.pdf).
- [86] A. Valdivieso, “¿Qué es una EDAR? | iAgua.” <https://www.iagua.es/respuestas/estacion-depuradora-aguas-residuales> (accessed Jan. 08, 2022).
- [87] “Estación depuradora de aguas residuales (EDAR).” <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/saneamiento-depuracion/sistemas/edar/default.aspx> (accessed Jan. 08, 2022).
- [88] “Línea de aguas - EDAR - Gestión de aguas y control de vertidos.” <https://www.aulafacil.com/cursos/medio-ambiente/gestion-de-aguas-y-control-de-vertidos/linea-de-aguas-edar-l11046> (accessed Mar. 07, 2022).
- [89] “Línea de agua.” <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/saneamiento-depuracion/sistemas/edar/linea-agua/default.aspx> (accessed Mar. 07, 2022).
- [90] “EDAR: Estación Depuradora de Aguas Residuales. Tratamientos que se aplican a las aguas - Vasos Comunicantes.” <https://bibliozacut.wordpress.com/2017/07/14/edar-estacion-depuradora-de-aguas-residuales-tratamientos-que-se-aplican-a-las-aguas/> (accessed Jan.

- 09, 2022).
- [91] A. HERNÁNDEZ, A. HERNÁNDEZ, and P. GALÁN, “Desarenado / Desengrasado,” *CIDTAUSAL*, 2015, [Online]. Available: <https://www.emolatina.es/tecnología-y-productos-emo-france/desarenado-desengrasado/>.
- [92] Joaquín Suárez López, A. J. Burgos, and P. U. Rodríguez, “Fichas Técnicas De Etapas De Proceso De Plantas De Tratamiento De Aguas Residuales,” vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2014.
- [93] “Decantación primaria en EDAR | Formación de ingenieros.” <https://www.tecpa.es/decantacion-primaria-en-una-edar/> (accessed Jan. 09, 2022).
- [94] J. López, A. Jácome, and P. Ures, “Decantación primaria convencional,” *Ft-Pri-002*, p. 31, 2013, [Online]. Available: <https://www.wateractionplan.com/documents/177327/558161/Decantación+primaria+convencional.pdf/40f134f4-529a-d6ec-eafa-3eff20f8ad5d>.
- [95] “Fangos activos - GEDAR - Tratamiento de Aguas.” <https://www.gedar.com/residuales/tratamiento-biologico-aerobio/fangos-activos.htm> (accessed Jan. 10, 2022).
- [96] “Fangos Activos | Cyclus ID.” <https://www.cyclusid.com/tecnologias-aguas-residuales/tratamiento-aguas/tratamiento-secundario/fangos-activos/> (accessed Jan. 10, 2022).
- [97] “Qué es el proceso de lodos activados - Soluciones Medioambientales y Aguas, S.A.” <http://www.smasa.net/proceso-lodos-activados/> (accessed Jan. 10, 2022).
- [98] P. Jácome, A. Suárez, J. Ures, “Fangos Activos,” *Ft-Bio*, vol. 001, 2014.
- [99] J. Suárez, A. Jácome, and P. Ures, “Tecnologías De Espesamiento,” 2015, [Online]. Available: <https://www.wateractionplan.com/documents/177327/558161/Tecnologías+de+espesamiento.pdf/5937d248-06a9-c654-cd44-4583aca5acdb>.
- [100] M. del C. V. Barbazán, “Ficha técnica informativa para el tratamiento de efluentes en plantas de la industria textil - Digestión anaerobia,” *Water Environ. Eng. Gr.*, pp. 1–14, 2015.
- [101] “Metanogénesis.” <https://www.quimica.es/enciclopedia/Metanogénesis.html> (accessed Mar. 07, 2022).
- [102] J. Suárez, A. Jácome, and P. Ures, “Tecnologías de deshidratación de fangos,” pp. 1–28, 2015.
- [103] F. Murphy, C. Ewins, F. Carbonnier, and B. Quinn, “Wastewater Treatment Works (WwTW) as a Source of Microplastics in the Aquatic Environment,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 50, no. 11, pp. 5800–5808, 2016, doi: 10.1021/acs.est.5b05416.
- [104] S. Ziajahromi, P. A. Neale, L. Rintoul, and F. D. L. Leusch, “Wastewater treatment plants as a pathway for microplastics: Development of a new approach to sample wastewater-based microplastics,” *Water Res.*, vol. 112, pp. 93–99, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.01.042>.
- [105] S. A. Carr, J. Liu, and A. G. Tesoro, “Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants,” *Water Res.*, vol. 91, pp. 174–182, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.01.002>.
- [106] J. Talvitie, A. Mikola, O. Setälä, M. Heinonen, and A. Koistinen, “How well is microlitter purified from wastewater? – A detailed study on the stepwise removal of microlitter in a tertiary level wastewater treatment plant,” *Water Res.*, vol. 109, pp. 164–172, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.11.046>.
- [107] J. C. Prata, J. P. da Costa, A. C. Duarte, and T. Rocha-Santos, “Methods for sampling and detection of microplastics in water and sediment: A critical

- review,” *TrAC Trends Anal. Chem.*, vol. 110, pp. 150–159, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.10.029>.
- [108] A. S. Tagg *et al.*, “Fenton’s reagent for the rapid and efficient isolation of microplastics from wastewater,” *Chem. Commun.*, vol. 53, no. 2, pp. 372–375, 2017, doi: 10.1039/C6CC08798A.
- [109] M. G. J. Löder, M. Kuczera, S. Mintenig, C. Lorenz, and G. Gerdt, “Focal plane array detector-based micro-Fourier-transform infrared imaging for the analysis of microplastics in environmental samples,” *Environ. Chem.*, vol. 12, no. 5, pp. 563–581, 2015, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1071/EN14205>.
- [110] J. Li, H. Liu, and J. Paul Chen, “Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection,” *Water Res.*, vol. 137, pp. 362–374, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.056>.
- [111] V. Hidalgo-Ruz, L. Gutow, R. C. Thompson, and M. Thiel, “Microplastics in the marine environment: A review of the methods used for identification and quantification,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 46, no. 6, pp. 3060–3075, 2012, doi: 10.1021/es2031505.
- [112] K. Magnusson and F. Norén, “Screening of microplastic particles in and downstream a wastewater treatment plant,” *IVL Swedish Environ. Res. Inst.*, vol. C 55, no. C, p. 22, 2014.
- [113] G. Liebezeit and E. Liebezeit, “Synthetic particles as contaminants in German beers,” *Food Addit. Contam. Part A*, vol. 31, no. 9, pp. 1574–1578, Sep. 2014, doi: 10.1080/19440049.2014.945099.
- [114] “Estereomicroscopio - Wikipedia, la enciclopedia libre.” <https://es.wikipedia.org/wiki/Estereomicroscopio> (accessed Jan. 08, 2022).
- [115] T. Rocha-Santos and A. C. Duarte, “A critical overview of the analytical approaches to the occurrence, the fate and the behavior of microplastics in the environment,” *TrAC Trends Anal. Chem.*, vol. 65, pp. 47–53, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2014.10.011>.
- [116] D. Schymanski, C. Goldbeck, H.-U. Humpf, and P. Fürst, “Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: Release of plastic particles from different packaging into mineral water,” *Water Res.*, vol. 129, pp. 154–162, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.11.011>.
- [117] A. M. Elert *et al.*, “Comparison of different methods for MP detection: What can we learn from them, and why asking the right question before measurements matters?,” *Environ. Pollut.*, vol. 231, pp. 1256–1264, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.074>.
- [118] J. Talvitie, A. Mikola, A. Koistinen, and O. Setälä, “Solutions to microplastic pollution – Removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies,” *Water Res.*, vol. 123, pp. 401–407, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.07.005>.
- [119] X. Li *et al.*, “Microplastics in sewage sludge from the wastewater treatment plants in China,” *Water Res.*, vol. 142, pp. 75–85, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.034>.
- [120] M. Lares, M. C. Ncibi, M. Sillanpää, and M. Sillanpää, “Occurrence, identification and removal of microplastic particles and fibers in conventional activated sludge process and advanced MBR technology,” *Water Res.*, vol. 133, pp. 236–246, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.01.049>.
- [121] “Resultados Análisis EDAR – AQUAVALL.” <https://aquavall.es/resultados-analisis-edar/> (accessed Mar. 08, 2022).
- [122] M. B. Ahmed *et al.*, “Microplastic particles in the aquatic environment: A systematic review,” *Sci. Total Environ.*, vol. 775, p. 145793, 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145793.



- [123] Y. Wang *et al.*, “The uptake and elimination of polystyrene microplastics by the brine shrimp, *Artemia parthenogenetica*, and its impact on its feeding behavior and intestinal histology,” *Chemosphere*, vol. 234, pp. 123–131, 2019, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.05.267.
- [124] A. Uheida, H. G. Mejía, M. Abdel-Rehim, W. Hamd, and J. Dutta, “Visible light photocatalytic degradation of polypropylene microplastics in a continuous water flow system,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 406, no. September 2020, p. 124299, 2021, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124299.



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**