

Trabajo de fin de grado

# Análisis de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales industriales. Potencial del sector para Canarias

Departamento de Ingeniería Química y Tecnología Farmacéutica.

Escuela superior de Ingeniería y Tecnología

Universidad de La Laguna

Grado en Ingeniería Química Industrial

Curso académico 2019-2020

**Autora:**

Aleida González Hernández

**Tutores:**

Enrique González Cabrera

Oliver Diaz López

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	1
Índice de gráficas.....	3
Índice de tablas .....	4
Índice de ilustraciones.....	5
Agradecimientos .....	7
1 Resumen.....	9
2 Abstract .....	11
3 Introducción .....	13
4 Marco legal.....	16
4.1 Normativas de referencia aplicables.....	16
4.1.1 Nivel comunitario .....	16
4.1.2 Nivel estatal.....	17
4.1.3 Normativa Autonómica.....	18
4.2 Límites de vertido a la red de saneamiento.....	19
5 Tratamientos convencionales .....	24
5.1 Procesos físicos .....	24
5.1.1 Desbaste .....	24
5.1.2 Sedimentación o decantación primaria .....	25
5.1.3 Filtración.....	26
5.1.4 Sacos filtrantes .....	28
5.1.5 Flotación .....	29
5.2 Procesos químicos.....	31
5.2.1 Coagulación-floculación. ....	31
5.2.2 Precipitación química .....	32
5.2.3 Procesos electroquímicos.....	33
5.2.4 Intercambio iónico .....	34
5.2.5 Adsorción.....	34
5.2.6 Desinfección .....	36
5.3 Procesos biológicos .....	38
5.3.1 Procesos biológicos aerobios .....	39
5.3.2 Procesos biológicos anaerobios .....	42
5.4 Procesos biológicos de eliminación de nutrientes.....	47
5.4.1 Tratamiento biológico de compuestos con nitrógeno.....	47

5.4.2	Eliminación biológica del fósforo .....	49
6	Tratamientos avanzados .....	51
6.1	Oxidación química.....	51
6.1.1	Ozonización con peróxido de hidrógeno ( $O_3/H_2O_2$ ) y ( $O_3/H_2O_2/OH^-$ ) .....	51
6.1.2	Métodos ozono-ultravioleta: $O_3/UV$ , $H_2O_2/UV$ .....	52
6.1.3	Peróxido de hidrógeno y catalizador ( $H_2O_2/Fe^{2+}$ ):.....	54
6.1.4	Procesos fotocatalíticos ( $O_3/TiO_2/UV$ y $H_2O_2/TiO_2/UV$ ).....	56
6.1.5	Métodos electroquímicos: .....	57
6.2	Filtración por membranas.....	58
6.2.1	Membranas densas .....	58
6.2.2	Membranas porosas.....	58
7	Análisis de patentes .....	62
8	Características generales de aguas residuales industriales. ....	65
9	Análisis del Sector Industrial en la provincia de Santa Cruz de Tenerife. ....	75
10	Caracterización de las aguas residuales de industrias agroalimentarias. ....	80
10.1	Industria láctea.....	80
10.2	Industria cárnica.....	80
10.3	Industria elaboración de zumos.....	81
11	Opciones de tratamiento de un agua residual industrial procedente de una industria agroalimentaria. ....	84
11.1	Tratamiento propuesto para la regeneración del agua residual. ....	84
11.2	Tratamiento propuesto para verter a la red de saneamiento .....	86
12	Conclusiones.....	89
13	Conclusions .....	91
14	Bibliografía .....	93

## Índice de gráficas

Gráfica 3.1 Porcentaje de agua suministrada en España por sectores (Fuente: Instituto Nacional de Estadística, 2020).....	13
Gráfica 3.2. Evolución del volumen de agua tratada en Canarias. (Fuente: Instituto Nacional de Estadística, 2020).....	14
Gráfica 7.1 Países con mayor número de patentes registradas. (Fuente: Espacenet,2020) .....	62
Gráfica 7.2 Porcentaje de países europeos en los que son registradas una serie de patentes .....	63
Gráfica 9.1 Cantidad de industrias en la provincia de Santa Cruz de Tenerife. (Fuente:Elaboración propia).....	77

## Índice de tablas

Tabla 4.1 Límites de vertido a la red de saneamiento en la isla de Tenerife. ( Fuente: Plan Hidrológico de Tenerife). .....	20
Tabla 5.1 Características de los reactivos coagulantes. (Fuente: Cánepa ,2004).....	31
Tabla 5.2 Reacciones que tienen lugar en procesos anaerobios de depuración. (Fuente: Zinder et al., 1984) .....	43
<i>Tabla 5.3. Condiciones de operación para distintos reactores anaerobios. (Fuente: Rodríguez et al., 2006).</i> .....	47
Tabla 8.1. Contaminantes inorgánicos frente a su relevancia en diversas industrias (adaptado de Rodríguez et al.,2006) .....	65
Tabla 8.2 Contaminantes orgánicos frente a su relevancia en diversas industrias. (Fuente: Rodríguez et al.,2006).....	67
Tabla 8.3 Tratamientos propuestos para los contaminantes inorgánicos planteados. ....	69
Tabla 8.4 Tratamientos propuestos para los contaminantes orgánicos planteados .....	72
Tabla 9.1 Distribución de industrias en la isla de Tenerife. ....	75
Tabla 10.1. Características del agua procedente de la industria láctea.....	80
Tabla 10.2. Características del agua residual procedente de la industria cárnica. (Fuente: Mendoza, 2005).....	81
Tabla 10.3. Características del agua residual procedente de la industria de zumos. (Fuente. Llaneza, 2012) .....	81
Tabla 12.1 Porcentaje de eliminación de un sistema de MBR no integrado. (Fuente: López, 2015).....	86

## Índice de ilustraciones

Ilustración 5.1. Rejas de gruesos. (Fuente: ECMA,2020) .....	24
Ilustración 5.2. Tamiz de finos. (Fuente:IDIM, 2020).....	25
Ilustración 5.3 Bomba diaceradora. (Fuente: Tecowash,2020).....	25
Ilustración 5.4 Decantador primario. (Fuente: basado en Procesos, 2020).....	26
Ilustración 5.5 Filtro de arena. (Fuente: Gestión, 2020) .....	27
Ilustración 5.6 Filtros de bandas. Fuente: (Potable, 2020).....	28
Ilustración 5.7 Sacos filtrantes. (Fuente: Depuradora,2020) .....	29
Ilustración 5.8 Flotación por aire disuelto. Presurización total del efluente. (Fuente: GEDAR,2020).....	30
Ilustración 5.9 Proceso de coagulación-floculación. (Fuente: adaptado de Kiraly, 2015)...	32
Ilustración 5.10 Columna que contiene carbón activado. (Fuente: adaptado de Espinosa, 2020).....	36
Ilustración 5.11Tipos de configuraciones de columnas. (En serie a la izquierda y en paralelo a la derecha). (Fuente: adaptado de Configuración,2020).....	36
Ilustración 5.12 Proceso de fangos activados. (Fuente: adaptado de Rodríguez et al.,2006). .....	39
Ilustración 5.13 Proceso de contacto estabilización. (Fuente: adaptado de Rodríguez et al., 2006).....	41
Ilustración 5.14 Proceso que tiene lugar en un filtro percolador. (Fuente: adaptado de Rodríguez et al.,2006).....	42
Ilustración 5.15 Esquema de funcionamiento de un CBR. (Fuente: adaptado de Aznar, 2020). .....	42
Ilustración 5.16 Sistema anaerobio. (Fuente: adaptado de Rodríguez et al.,2006).....	44
Ilustración 5.17 Reactor de contacto. (Fuente: adaptado de Cañizares, et al., 2006) .....	45
Ilustración 5.18. Reactor de manto de lodos y flujo ascendente. (Fuente: adaptado Rodríguez et al., 2006).....	46
Ilustración 5.19 Transformaciones de los compuestos del nitrógeno. (Fuente: adaptado de Cañizares,et al., 2006) .....	48
Ilustración 5.20. Vista aérea de un proceso de fangos activados con canales de oxidación. (Fuente: Química, 2020) .....	49
Ilustración 6.1 Configuración de un sistema Cavitación-Oxidación UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> . (Fuente: Bes Monge, 2018). .....	52
Ilustración 6.2. Configuración de un sistema UV/O <sub>3</sub> de WEDECO para agua residual con COV clorados. (Fuente: adaptado de Bes Monge,2018).....	54

Ilustración 6.3 Esquema industrial del proceso Fenton. (Fuente: adaptado de Bes Monge et al.,2018).....	56
Ilustración 6.4 Esquema de los procesos de oxidación-reducción con semiconductores. (Fuente: adaptado de Bes Monge et al.,2018). .....	57
Ilustración 6.5. Esquema de filtración en línea .....	59
Ilustración 6.6 Filtración tangencial.....	60
Ilustración 9.1 Distribución geográfica de las industrias en la provincia de Santa Cruz de Tenerife.....	78
Ilustración 12.1 Opción A de tratamiento. (Fuente: Elaboración propia).....	84
Ilustración 12.2. Opción de tratamiento B. (Fuente: Elaboración propia).....	87

## Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a mis tutores, Enrique González Cabrera y Oliver Díaz López, que me han ayudado a organizar y estructurar el TFG, pese a las circunstancias que han tenido lugar en este año tan especial.

También quiero agradecer a mi familia por apoyarme y ayudarme a completar el Grado Universitario.

Por último, pero no menos importante a mis amigas. Que han estado ahí en los momentos complicados.



---

# 1 Resumen

---

# 1 Resumen

El objetivo de este trabajo de fin de grado (TFG) es analizar las tecnologías disponibles para el tratamiento de las aguas residuales industriales originadas en la Isla de Tenerife.

En primer lugar, se ha analizado la legislación vigente aplicable a las aguas residuales industriales. A continuación, se han revisado las tecnologías convencionales y avanzadas, realizando un estudio del estado actual de la tecnología a partir de información comercial, de bibliografía científica y de patentes. En el desarrollo del TFG se han analizado las principales industrias de la isla con el fin de analizar las principales fuentes de producción de las aguas residuales industriales. Con el fin de concretar y facilitar la búsqueda de tratamientos de una forma más visual y específica, se ha elaborado un conjunto de tablas que permiten identificar las mejores técnicas aplicables para los principales contaminantes.

Los resultados revelan que las industrias agroalimentarias representan el mayor número de industrias en la provincia, por lo que se profundiza en la caracterización de las aguas de vertido de la industria láctea, cárnica y de zumos, para posteriormente proponer sistemas de tratamiento aplicada a cada una de ellas.

---

## 2 Abstract

---

## 2 Abstract

The objective of this final degree project (TFG) is to analyze the technologies available for the treatment of industrial wastewater on the Island of Tenerife.

First, the current legislation applicable to industrial wastewater has been analyzed. Next, conventional and advanced technologies have been reviewed. A study of the current state of technology based on commercial information, scientific bibliography and patents has been done. In the development of the TFG, the main industries of the island have been analyzed in order to analyze the main sources of industrial wastewater production. To specify and facilitate the search for treatments in a more visual and specific way, a set of tables has been prepared that allow the best applicable techniques to be identified for the main pollutants.

The results reveal that the agri-food industries represent the largest number of industries in the province, which is why the characterization of the wastewater from the dairy, meat and juice industries is deepened, to later propose treatment systems applied to each one of them.

---

## 3 Introducción

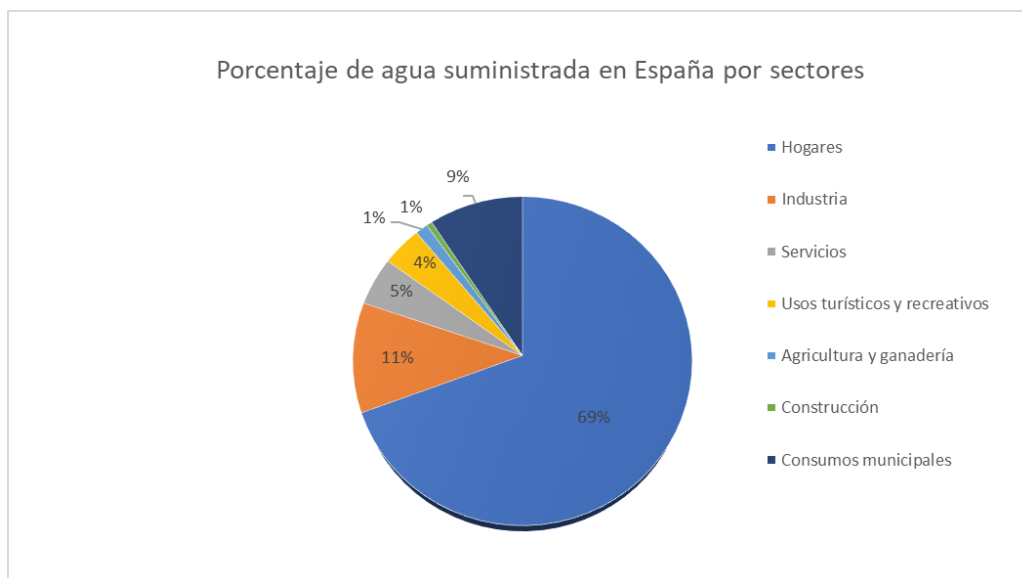
---

### 3 Introducción

En los países europeos, son extraídos anualmente alrededor de 284.000 millones de m<sup>3</sup> de agua, (media anual a largo plazo para el período 1990-2017).

En relación con los usos que a este recurso se le da, la agricultura representa alrededor del 59% del uso total de agua, seguida del 18% para la producción de energía y el 11% para las industrias manufactureras. Los hogares utilizan casi el 9% del agua total en Europa (Agencia Europea de Medio Ambiente, (AEMA) (European Environment Agency, 2020).

En el caso concreto de España, según los últimos datos publicados por el Instituto Nacional de Estadística, en base a datos acumulados desde el año 2006 hasta el 2016, la industria representa el segundo consumidor de agua con un 11% con respecto al total, como se puede observar en el Gráfica 3.1.

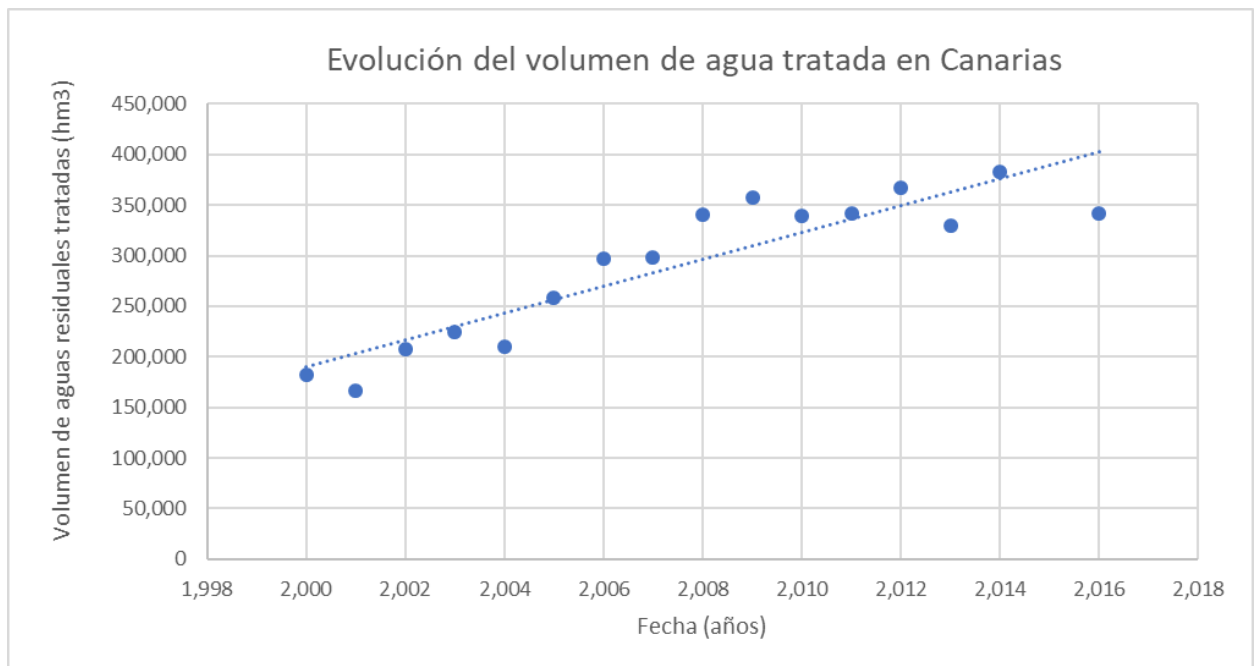


Gráfica 3.1 Porcentaje de agua suministrada en España por sectores (Fuente: Instituto Nacional de Estadística, 2020).

Los procesos industriales generalmente utilizan el agua en grandes cantidades para acciones de lavado o en la propia línea de fabricación, donde se modifican sus propiedades y composición química. Las aguas residuales industriales generalmente se vierten en las redes de alcantarillado, donde si no son tratadas previamente, pueden generar graves problemas debido a su elevada toxicidad. Por ello, es de vital importancia el tratamiento adecuado de las mismas antes de su vertido.

En los últimos años, en la Comunidad Autónoma de Canarias se ha observado una tendencia creciente en el volumen de agua residual en línea con la directiva Marco del agua,

como se puede apreciar en el Gráfico 3.2, en la que se aportan los datos en relación con el volumen de aguas tratadas en las islas desde el año 2000 hasta el 2018.



Gráfica 3.2. Evolución del volumen de agua tratada en Canarias. (Fuente: Instituto Nacional de Estadística, 2020).

En Canarias, no existen grandes industrias y es muy complicado la construcción de una planta de tratamiento por polígono industrial por la diversidad tan alta de contaminantes en las aguas. Generalmente, se emplea un tratamiento en cada industria de manera individual que permita ajustarse a la normativa vigente y el agua residual se pueda verter a la red de tratamiento urbana.

---

## 4 Marco legal

---



## 4 Marco legal

En el tratamiento de las aguas residuales industriales es clave conocer y controlar la normativa vigente y de aplicación que permitan alcanzar los rendimientos esperados en el proceso de tratamiento del agua. Además, la normativa permite diferenciar el agua residual industrial de otro tipo de aguas. Según se recoge tanto en la directiva 91/271/CEE, como en el R.D. 11/1995, las aguas residuales se diferencian en:

- 1) «Aguas residuales urbanas»: las aguas residuales domésticas o la mezcla de las mismas con aguas residuales industriales y/o aguas de correntía pluvial.
- 2) «Aguas residuales domésticas»: las aguas residuales procedentes de zonas de vivienda y de servicios y generadas principalmente por el metabolismo humano y las actividades domésticas.
- 3) «Aguas residuales industriales»: todas las aguas residuales vertidas desde locales utilizados para efectuar cualquier actividad comercial o industrial, que no sean aguas residuales domésticas ni aguas de correntía pluvial.

En los siguientes apartados se recogen las principales normativas aplicables en sus distintos niveles: comunitario, nacional y autonómico. Finalmente, se indican los valores máximos permitidos para el vertido a redes de saneamiento para algunos parámetros de referencia. Cabe destacar que cada organismo regulador requiere a la industria solicitante un informe sobre las sustancias potencialmente nocivas que se encuentran en sus efluentes. En función de ese informe, establece específicamente las limitaciones de vertido. Por tanto, no se puede establecer, con carácter general, un listado de todos los parámetros limitados por normativa, y por ello, en las siguientes secciones de este Trabajo de Fin de Grado, se analizan las diferencias industrias existentes según sectores, analizando los posibles contaminantes específicos.

### 4.1 Normativas de referencia aplicables

#### 4.1.1 Nivel comunitario

A nivel comunitario, las principales Directivas relacionadas con el tratamiento y vertido de aguas residuales de origen industrial son:

- **Directiva 2009/90/CE**, por el que se establecen especificaciones técnicas del análisis químico y del seguimiento del estado de las aguas. Además, establece criterios de funcionamiento mínimos de los métodos de análisis que se deberán

establecer en los estados miembros acerca del estado de las aguas, la sedimentación y seres vivos, además de normas enfocadas a demostrar la calidad de los resultados analíticos.

- **Directiva 2008/105/CE**, relativa a las normas de calidad ambiental en el ámbito de la política de aguas, tanto para las sustancias prioritarias como para los contaminantes, con la finalidad de conseguir un buen estado químico de las aguas superficiales.
- **Directiva 2006/11/CE**, relativa a la contaminación causada por determinadas sustancias peligrosas vertidas en el medio acuático de la Comunidad. Establece normas de protección y de prevención de la contaminación provocada por el vertido de determinadas sustancias en el medio acuático. Se aplica a las aguas interiores superficiales, a las aguas de mar territoriales y a las aguas interiores del litoral.
- **Directiva 80/68/CEE**, relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación causada por determinadas sustancias peligrosas. Por medio de esta directiva se prohíbe el vertido directo de ciertas sustancias establecidas, así como, las acciones de eliminación o depósito que puedan ocasionar un vertido indirecto de estas sustancias.
- **Directiva 91/271/CEE**, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. Pretende proteger el medio ambiente en la Unión Europea (UE) de las repercusiones negativas que producen las aguas residuales urbanas. En esta directiva se establecen normas de recogida, tratamiento y vertido de aguas residuales. Abarcando tanto aguas industriales como agroalimentarias.

#### 4.1.2 Nivel estatal

En España, la normativa aplicable a este tipo de aguas se recoge a continuación:

- **Real Decreto 1620/2007**, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. En él se incluye el régimen jurídico de la reutilización, además de las condiciones básicas y el procedimiento para la reutilización de las aguas depuradas.
- **Real Decreto Legislativo (1/2001, de 20 de julio)**, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas. En ella se evaluará principalmente la regulación del

dominio público hidráulico, del uso del agua, así como el establecimiento de las normas básicas de protección de las aguas continentales, costeras y de transición

- **Real Decreto 140/2003**, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad de agua de consumo humano, así como las instalaciones que permiten su suministro desde la captación hasta el grifo del consumidor y el control de éstas, garantizando su salubridad, calidad y limpieza, con el fin de proteger la salud de las personas de los efectos adversos derivados de cualquier tipo de contaminación de las aguas.
- **Orden SCO/1591/2005**, de 30 de mayo, sobre el Sistema de Información Nacional de Agua de Consumo. La presente disposición tiene como objeto desarrollar el Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, en lo relativo al sistema de información nacional de agua de consumo SINAC, describiendo sus características generales y las particularidades de la aplicación informática a través de Internet que le da soporte, con el fin de conocer y prevenir los posibles riesgos para la salud de la población provocados por la contaminación del agua.

#### 4.1.3 Normativa Autonómica

- **Ley 10/2010**, de modificación de la Ley 12/1990, de Aguas. En ella se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de calidad de las aguas para garantizar la protección integral de aguas superficiales continentales, las de transición, las costeras y las subterráneas.
- **Ley 2/1999**, de medidas urgentes económicas, de orden social y relativas al personal y a la organización administrativa de la Comunidad Autónoma de Canarias para el ejercicio 1999. La citada ley recoge una serie de diferentes medidas en lo referente a gestión de servicios, ejecución de obras, ayudas y subvenciones.
- **Ley 12/1990, de Aguas de Canarias**. La presente Ley tiene por objeto la regulación de las aguas terrestres superficiales y subterráneas, cualquiera que sea su origen, natural o industrial, en las Islas Canarias, así como el ejercicio de las competencias de la Comunidad Autónoma en las materias relacionadas con el dominio público hidráulico. Además, abarca acciones encaminadas a la protección y mejora de la condensación superficial de la humedad atmosférica.
- **Decreto 158/1994**, de transferencias de funciones de la Administración Pública de la Comunidad Autónoma de Canarias a los Cabildos Insulares en materia de aguas terrestres y obras hidráulicas. En este decreto se recoge la descripción de las

competencias y funciones que, en materia de aguas terrestres y obras hidráulicas, han sido transferidas a los Cabildos Insulares, así como aquéllas que han quedado reservadas a la Administración Pública de la Comunidad Autónoma de Canarias y las compartidas entre ambas Administraciones.

- **Decreto 276/1993**, de Reglamento sancionador en materia de aguas. El presente Reglamento tiene por objeto desarrollar el Título VIII de la Ley Territorial 12/1990, de 26 de julio, de Aguas, mediante la calificación de las infracciones, graduación de las sanciones y regulación del procedimiento por el que se materialice su aplicación.
- **Decreto 174/1994**, por el que se aprueba el Reglamento de Control de Vertidos para la Protección del Dominio Público Hidráulico. En él se pretende adaptar la normativa a las condiciones reales de las islas y manifiesta la importancia de la colaboración entre municipios para evitar el mal funcionamiento de servicios de alcantarillado y depuración.
- **Decreto 86/2002**, por el que se aprueba el Reglamento de Dominio Público Hidráulico. En este reglamento se indica el planteamiento para la transformación gradual del sistema tradicional al nuevo sistema en ella diseñado.

Asimismo, en las islas capitalinas de la Comunidad Autónoma de Canarias, existen algunos decretos aplicables. Concretamente, en la isla de Tenerife, cabría destacar:

- **Decreto 49/2015**, por el que se aprueba definitivamente el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de Tenerife, aprobado provisionalmente en sesión de 26 de septiembre de 2014, dando así respuesta a lo informado por la Comisión del Territorio y Medio Ambiente de Canarias de 22 de diciembre de 2014.
- **Decreto 319/1996**, por el que se aprueba el Plan Hidrológico Insular de Tenerife.
- **Decreto 115/1992**, de 9 de julio, por el que se aprueba el Estatuto del Consejo Insular de Aguas de Tenerife. En el que se asume, en régimen de descentralización y participación, la dirección, ordenación, planificación y gestión unitaria de las aguas en los términos que se establecen para esta isla.

## 4.2 Límites de vertido a la red de saneamiento

La Comunidad Autónoma de Canarias establece que cada Consejo Insular de Aguas establecerá mediante su Plan Hidrológico los límites de vertido a la red de saneamiento. En

el caso concreto de Tenerife, se establecen concentraciones máximas de parámetros habituales en la depuración de aguas residuales y que se recogen en la Tabla 4.1.

*Tabla 4.1 Límites de vertido a la red de saneamiento en la isla de Tenerife. (Fuente: Plan Hidrológico de Tenerife).*

Parámetro	Unidades	Concentración máxima
Demanda Bioquímica de oxígeno	mg/L	1.000
Demanda Química de oxígeno	mg/L	1.600
Temperatura	°C	45
Sólidos en suspensión	mg/L	1.200
Aceites y/o grasas	mg/L	500
Aceites minerales	mg/L	50

Además, el organismo regulador insular establece en el Plan Hidrológico de Tenerife que si alguna instalación vertiera productos no incluidos en la Tabla 4.1 y que puedan alterar los procesos de tratamiento o fueran potencialmente contaminantes, se fijarían límites y condiciones de vertido específicos en la autorización de vertido tal y como se explicó anteriormente.

No obstante, el Plan Hidrológico establece que no se pueden verter a las redes de saneamiento ninguno de los siguientes contaminantes.

- Gasolina, benceno, nafta, fuelóleo, petróleo, aceites volátiles, tolueno, xileno, o cualquier otro tipo de sólidos, líquidos o gases inflamables o explosivos.
- Carburo de calcio, bromato, cloratos, hidruros, percloratos, peróxidos, etc., y toda sustancia sólida, líquida o gaseosa de naturaleza inorgánica potencialmente peligrosa.
- Gases procedentes de motores de explosión o cualquier otro componente que pueda dar lugar a mezclas tóxicas, inflamables o explosivas con el aire. A tal efecto, las medidas efectuadas mediante explosímetro, en el punto de descarga de vertido a la red de alcantarillado público, deberán dar siempre valores inferiores al 10% del límite inferior de explosividad.
- Sólidos, líquidos o gases, tóxicos o venenosos, bien puros o mezclados con otros residuos que pueden constituir peligro para el personal encargado de la red u ocasionar una molestia pública.

- Cenizas, carbonillas, arena, plumas plástico, madera, sangre, estiércol, desperdicios de animales, pelos vísceras, y otros cuerpos que puedan causar obstrucciones u obstaculizar los trabajos de conservación y limpieza.
- Disolventes orgánicos, pinturas y colorantes en cualquier proporción.
- Aceites y/o grasa de naturaleza mineral, vegetal o animal.
- Fármacos desechables procedentes de industrias farmacéuticas o centros sanitarios que puedan producir alteraciones en estaciones depuradoras.
- Sólidos procedentes de trituradoras de residuos, tanto domésticos como industriales.
- Salmuera o agua de rechazo procedentes de plantas desaladoras o desalinizadoras, independientemente del sistema de tratamiento adoptado, así como de agua de mar o salobre procedente de piscinas, sótanos u obras de intrusión marina, al igual que las aguas salinas procedentes del retrolavado de filtros, sistemas de ablandamiento de aguas (descalcificadores) o el subproducto de la recuperación de resinas de intercambio iónico.
- Vertidos industriales de líquidos concentrados desechables cuyo tratamiento correspondía a la planta específica para estos vertidos o a planta centralizada.
- Vertidos líquidos que, cumpliendo con la limitación de temperatura, pudieran adquirir consistencia pastosa o sólida en el rango de temperatura que se pudiera dar en la red de alcantarillado público o planta depuradora.
- Vertidos discontinuos procedentes de limpieza de tanques de almacenamiento de combustibles, reactivos o materias primas. Estas limpiezas se realizarán de forma que la evacuación no sea la red de alcantarillado público.
- Vertido de agua de cualquier procedencia que no cumpla las limitaciones que se detallan en la Ordenanza Municipal, o en su defecto, en la Ordenanza Básica supletoria establecida por el CIATF.

Por otra parte, según normativa autonómica (Decreto 174/1994), se prohíbe el vertido de las siguientes sustancias:

- Óxido de mercurio.
- Cloruro mercurioso.

- Mercurio.
- Clorano.
- Hexaclorociclohexano.
- Heptacloro.
- 1,2 dibromoetano.
- 1,2 dicloroetano.
- Óxido de etileno.
- Aldrin.
- Dieldrin.
- Endrin.
- DDT (diclorodifeniltricloroetano)

---

## 5 Tratamientos convencionales

---



## 5 Tratamientos convencionales

A continuación, se detallan los principales tratamientos convencionales para el tratamiento de aguas residuales industriales.

### 5.1 Procesos físicos

#### 5.1.1 Desbaste

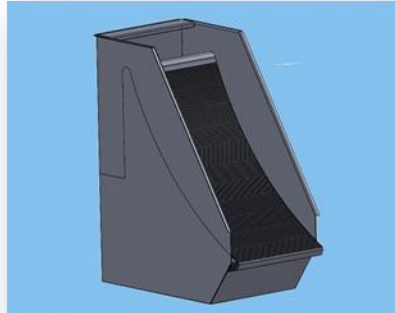
Operación en la que se proceden a eliminar sólidos de gran tamaño que son arrastrados por el agua residual por retención de superficies. Este tratamiento suele emplearse cerca de los colectores de entrada, previo a cualquier otro, evitando así que los sólidos en suspensión pudieran llegar a estropear equipos de los demás tratamientos. Generalmente, los elementos empleados para ello son rejas, tamices y bombas diaceradoras.

- **Rejas.** Las rejas en función del material a separar llevan el nombre de rejas de gruesos o rejas de finos. Las primeras retienen elementos sólidos entre 5 y 10 cm de diámetro y las segundas, tienen como función complementar la retención de las anteriores, con una separación entre barras de entre 2 y 5 cm (Muñoz, 2020).



*Ilustración 5.1. Rejas de gruesos. (Fuente: ECMA, 2020)*

- **Tamiz.** Su función es la separación de partículas de tamaño entre 2 mm y 0,25 mm (Muñoz, 2020). Puede ser empleado tanto en el tratamiento primario como en el secundario, para separar los sólidos en suspensión.



*Ilustración 5.2. Tamiz de finos. (Fuente:IDIM, 2020)*

- **Bombas diaceradoras.** Se encargan de triturar pequeños materiales, reduciendo así su tamaño. El principal problema que presenta es la necesidad de separación posterior a través de sedimentación u alguna operación similar, así como un aumento en la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), ocasionando la necesidad de aumentar los procesos posteriores (Muñoz, 2020; Rodríguez et al.,2006).



*Ilustración 5.3 Bomba diaceradora. (Fuente: Tecowash,2020)*

### 5.1.2 Sedimentación o decantación primaria

La sedimentación consiste en la separación de los componentes del agua en 2 fases, una sólida, (fango) y otra líquida, (agua y otras sustancias disueltas) bajo la acción de la gravedad. La disminución de la velocidad ascensional del líquido, menor que la de caída del sólido, permite que la materia sedimentable se deposite en el fondo del equipo. El tamaño y la densidad de las partículas a separar condicionará la velocidad de sedimentación (Temprano et al, 2020).

En el caso de las aguas industriales, las partículas grandes y densas no suelen aparecer. Generalmente las partículas son poco densas, por ello es necesario realizar una

coagulación-floculación previa (Rodríguez et al., 2006). El proceso de coagulación-floculación se desarrolla en profundidad en el apartado de procesos químicos.

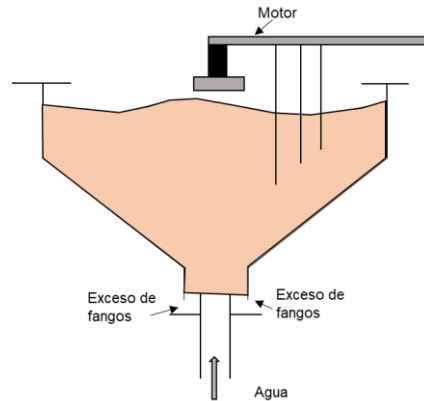


Ilustración 5.4 Decantador primario. (Fuente: basado en Procesos, 2020)

### 5.1.3 Filtración

Operación en la que tiene lugar la eliminación de sólidos en suspensión, al hacer pasar el agua residual través de un medio poroso, generalmente un lecho de arena. El lecho puede ser de altura variable, con una serie de capas de distinto tamaño de partícula. Principalmente son utilizadas tanto en el tratamiento de aguas potables como para eliminar la materia en suspensión que no hubiera sido eliminada previamente en tratamientos para la reutilización de aguas residuales.

En aguas industriales el material filtrante más utilizado son las tierras diatomeas. Además, con el fin de mejorar la eficacia se realiza una coagulación-floculación previa. A continuación, se detallan brevemente, los diferentes tipos de filtración aplicables (Rodríguez et al., 2006).

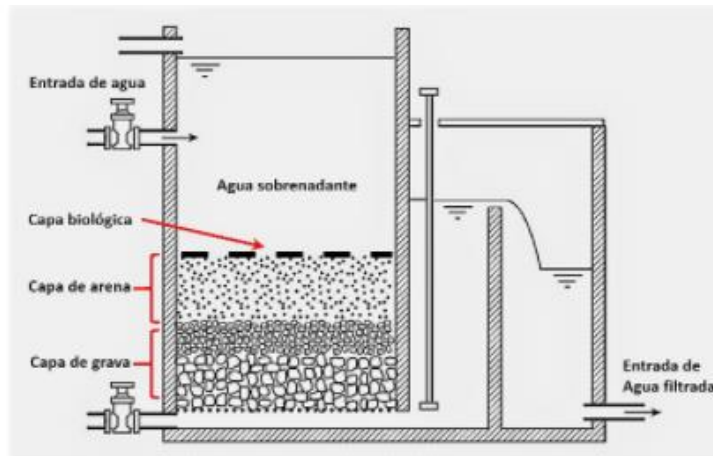
#### 5.1.3.1 Filtración por gravedad

Por la acción de la gravedad, el agua circula verticalmente y en descenso a través del filtro; quedando asentadas y retenidas partículas mucho menores que el espacio intersticial. Por este motivo, es un sistema muy utilizado para el tratamiento de aguas potables. En relación con la forma de operar se diferencian una filtración lenta, y una filtración rápida.

- **Filtración lenta:** Proceso de tratamiento físico, químico y biológico. Al hacer circular el agua cruda a través de un manto poroso de arena, las impurezas entran en contacto con la superficie de las partículas del medio filtrante y son retenidas. De

esta manera se desarrollan adicionalmente procesos de degradación química y biológica que reducen a la materia retenida a formas más simples (Cánepa,2020).

- **Filtración rápida:** Proceso de tratamiento exclusivamente físico. Según circula el agua a través de varias capas de arena y grava gruesa, las partículas de mayor tamaño son retenidas (Bruni et al,2020.).



*Ilustración 5.5 Filtro de arena. (Fuente: Gestión, 2020)*

### 5.1.3.2 Filtración por presión

El agua se suministra a través del filtro a través de una válvula, para poder llevar a cabo la deshidratación por la aplicación de presión en un medio filtrante. Los materiales más utilizados como medio filtrante son: arena verde, carbón activado, y tierra extrafina son usados habitualmente (Toscano, 2012). De la misma manera que el apartado anterior, se pueden diferenciar una filtración lenta y otra rápida:

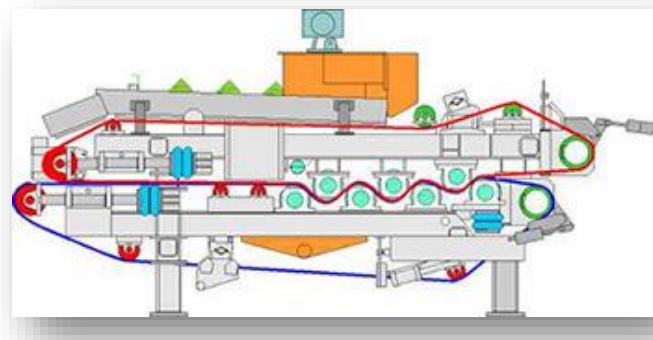
- **Filtración lenta.** Filtración en la que una torta filtrante es desarrollada en la superficie del filtro, a través de la cual tiene lugar la filtración.
- **Filtración rápida.** Proceso que tiene lugar cuando la mayor parte de espesor de medio filtrante está activo para el proceso de filtración y la calidad del filtrado mejora con la profundidad.

La filtración a presión consigue superar el 45-50% de sequedad. Por ello, es común su utilización en plantas industriales (Rodríguez et al.,2006).

### 5.1.3.3 Filtros de bandas

Los filtros de bandas consisten en dos bandas de tela filtrante continuas entre las cuales se introduce el fango. El fluido se hace pasar a través de ellos mediante la combinación de fuerzas de la gravedad y presión.

Es preciso que tenga lugar la floculación del fango antes de la entrada al filtro, donde es repartido en la banda superior, teniendo lugar una deshidratación por gravedad. Seguidamente, por la acción de la gravedad los fangos caen sobre la banda inferior. En este punto, queda retenido entre las dos bandas y tiene lugar la deshidratación por compresión. A continuación, las dos bandas hacen un recorrido a través de un conjunto de rodillos de tal manera que aumenta la presión del filtrado, y tiene lugar un efecto de cizallamiento de la masa del fango, que facilita la evacuación del agua retenida en el mismo. Al final del filtro las dos bandas se separan, desprendiendo el fango deshidratado mediante un rascador (Nuevo, 2020).



*Ilustración 5.6 Filtros de bandas. Fuente: (Potable, 2020)*

### 5.1.4 Sacos filtrantes

Son una alternativa de utilización para plantas de tratamiento pequeñas, donde la producción de fangos es mínima. Consisten en bolsas de material poroso y sintético, en las que el lodo es introducido. El lodo queda retenido y el agua es escurrida. La principal desventaja que presenta es que la sequedad obtenida es baja (Nuevo, 2020).



Ilustración 5.7 Sacos filtrantes. (Fuente: Depuradora,2020)

### 5.1.5 Flotación

Consiste en separar tanto partículas sólidas como líquidas del agua residual, para ello se hace disolver burbujas de aire en aguas residuales a presión. Estas se asociarán a las partículas presentes en el agua y a continuación, el aire es liberado a presión atmosférica en una cuba de tanque a flotación. De esta manera la materia en suspensión termina flotando en la superficie del agua, donde será eliminada por un dispositivo de desnatado (Vázquez, 2020) Este proceso será útil para sólidos y líquidos con una densidad inferior a la del agua. Como, por ejemplo, una dispersión de gotas de un líquido inmisible (aceites y grasas). La densidad de estos líquidos es generalmente menor a la de agua y, además, las burbujas de aire ayudan a “flotar” más rápidamente estas gotas.

Gracias a que se ha conseguido una mejora considerable en la generación de burbujas adecuadas y la utilización de reactivos para favorecer la operación, actualmente es posible el empleo de esta operación para la separación de partículas más densas del agua. Un ejemplo podría ser el tratamiento de aguas procedentes de refinerías, industria alimentaria o pinturas.

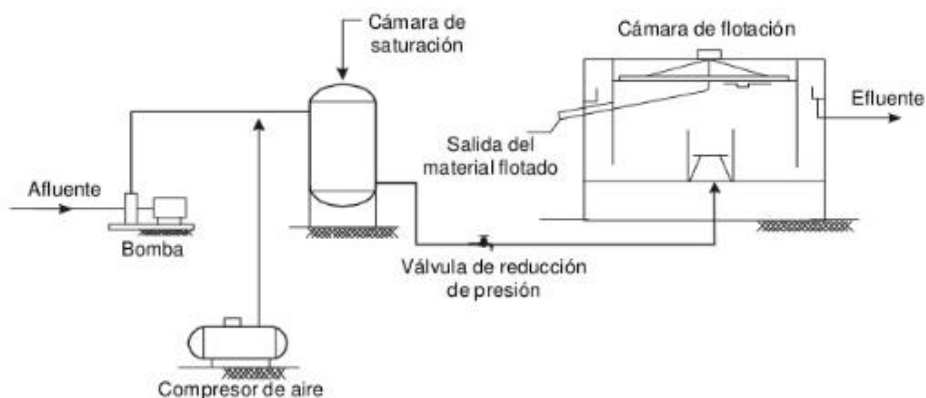
En esta operación hay un parámetro importante a la hora del diseño: la relación aire/sólidos, expresada como ml/l de aire liberados en el sistema por cada mg/l de concentración de sólidos en suspensión en el agua a tratar. Es un dato que normalmente se determina experimentalmente, pero suele tener un valor óptimo comprendido entre 0,005 y 0,06 (Rodríguez et al.,2006).

. En el tratamiento de aguas se utiliza principalmente para:

- La separación de grasas, aceites y fibras y otros sólidos de baja densidad de las aguas residuales.
- Espesado de los procedentes de lodos activos.
- Espesamiento de lodos floculados químicamente resultado de coagulación química.

Generalmente se emplea aire como agente de flotación, y en función de cómo se introduzca en el líquido, se tienen dos sistemas:

- **Flotación por aire disuelto (DAF).** El aire es introducido en el agua residual bajo una presión de varias atmósferas, de esta manera se consiguen formar microburbujas que permiten la flotación del material suspendido presente en el agua a tratar. Por lo general, los elementos presentes en estos equipos son la bomba de presurización, el equipo de inyección de aire, el tanque de retención o saturador y la unidad de flotación propiamente dicha, donde tiene lugar la reducción brusca de la presión, por lo que el aire disuelto se libera, formando multitud de microburbujas de aire. (Cyclus,2020).
- **Flotación por aire inducido.** En este caso, la generación de burbujas se realiza a través de difusores de aire, normalmente situados en la parte inferior del equipo de flotación, o bien inducidas por rotores o agitadores. En este caso el tamaño de las burbujas inducidas es mayor que en el caso anterior (Cyclus,2020).



*Ilustración 5.8 Flotación por aire disuelto. Presurización total del efluente. (Fuente: GEDAR,2020)*

## 5.2 Procesos químicos

### 5.2.1 Coagulación-floculación.

Parte de la materia en suspensión puede estar formada por partículas de muy pequeño tamaño ( $10^{-6}$  –  $10^{-9}$  m) que conforman una suspensión coloidal. La carga superficial de los coloides hace que la repulsión electrostática sea superior a las fuerzas de atracción de Van der Waals, dotando al coloide de su estabilidad. El proceso de coagulación consiste en neutralizar esa carga por adición de sales inorgánicas (normalmente de hierro o aluminio) o polielectrolitos. En la Tabla 5.1 se recogen algunos de los coagulantes más utilizados.

Tabla 5.1 Características de los reactivos coagulantes. (Fuente: Cánepa ,2004)

Coagulante	Dosis (mg/L)	pH óptimo
Cal	150-500	9-11
$Al_2(SO_4)_3$	75-250	4,5-7
$FeCl_3$	35-150	4-7
$FeCl_2$	70-200	4-7
Polímero catiónico	2-5	-
Polímero aniónico y neutro		0,25-1,0

Habitualmente se utilizan sales con cationes de alta relación carga/masa ( $Fe^{3+}$ ,  $Al^{3+}$ ) junto con polielectrolitos orgánicos, como coagulante, cuyo objetivo también debe ser favorecer la floculación:

- **Sales de  $Fe^{3+}$ :** Pueden ser  $FeCl_3$  o  $Fe_2(SO_4)_3$ . Se emplean tanto en disolución como en estado sólido. Elegir entre uno u otro vendrá en función del anión. En el caso del primero desprenderá cloruros y el segundo sulfuros, por lo tanto, esto se deberá tomar en cuenta a la hora de su elección.
- **Sales de  $Al^{3+}$ :** Suele ser  $Al_2(SO_4)_3$  o policloruro de aluminio. El primero se emplea en disolución, mientras que el segundo suele utilizarse en estado sólido.
- **Polielectrolitos:** Pueden ser polímeros naturales o sintéticos, no iónicos (poliacrilamidas) aniónicos (ácidos poliacrílicos) o catiónicos (polivinilaminas). Las cantidades para dosificar son mucho menores que para las sales, pero tanto la eficacia como el coste es mucho mayor (Rodríguez et al.,2006).



Otra forma de llevar a cabo el proceso es a través de la electrocoagulación, siendo un método muy utilizado en el tratamiento de aguas industriales. Consiste en la generación de reactivos de inmediato mediante la utilización de una célula electrolítica. El ánodo suele ser de aluminio, formándose cationes de  $Al^{3+}$ , mientras en el cátodo se genera  $H_2$ . Este proceso será de gran utilidad si la separación posterior de la materia es por flotación (Khemis, et al; 2006).

Para decidir entre la eficacia de un coagulante u otro no existe ninguna regla. Por lo general para el caso particular de un tipo de aguas se emplea un experimento “ensayo de jarras” en el que se analiza la eficacia de las diferentes alternativas, el pH y la dosificación adecuada.

Los equipos en los que se lleva a cabo este proceso suelen constar de dos partes bien diferenciadas. En la primera se adicionan los reactivos, y el agua es sometida a una fuerte agitación, durante un corto periodo de tiempo, para lograr la mezcla correcta de reactivos y coloides y conseguir así que se lleve a cabo la coagulación. En la segunda parte, se hace pasar a una zona en la que la agitación es de menor intensidad y aquí el agua permanecerá más tiempo, con el fin de que se produzca la floculación (Khemis, et al; 2006). En la Ilustración 5.9, se muestra esquematizado el proceso.

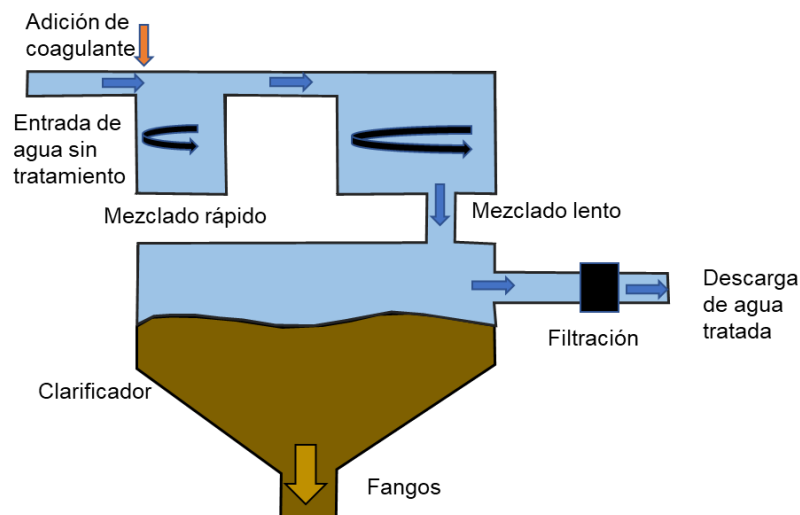


Ilustración 5.9 Proceso de coagulación-floculación. (Fuente: adaptado de Kiraly, 2015)

### 5.2.2 Precipitación química

Proceso en el que se altera el estado físico de los sólidos en suspensión, mediante la adición de químicos en el efluente a tratar. De esta manera se facilita la eliminación de una sustancia

disuelta indeseable, por cualquiera de los métodos descritos en la eliminación de la materia en suspensión.

En ciertos casos, este método podría alcanzar una eliminación del 80 al 90% de los sólidos en suspensión, del 40 al 70% de la DBO, del 30 al 60% de la demanda química de oxígeno (DQO), y del 80 al 90% de las bacterias (Sans, 1999).

El  $\text{Ca}^{2+}$  es un reactivo que se utiliza con frecuencia en este proceso por la gran cantidad de sales insolubles que genera. Además, posee cierta capacidad coagulante, lo que hace su uso masivo en aguas residuales urbanas y muchas industriales de características parecidas (Rodríguez et al., 2006).

### 5.2.3 Procesos electroquímicos

Están basados en la utilización de técnicas electroquímicas, en las que se hace pasar una corriente eléctrica a través del agua (que necesariamente ha de contener un electrolito) y provocando reacciones de oxidación-reducción tanto en el cátodo como en el ánodo. Con estos tratamientos se logra eliminar tanto contaminantes orgánicos, como inorgánicos de aguas residuales de diferente origen (Cañizares et al., 2006). Una de las principales ventajas de este procedimiento es la versatilidad de los equipos, la ausencia tanto de la utilización de reactivos como de la presencia de fangos y la selectividad, ya que al controlar el potencial de electrodo se consigue seleccionar la reacción electroquímica dominante deseada (Rodríguez et al., 2006).

Con la finalidad de aumentar la eficacia se ha planteado un tratamiento combinado electroquímico y de irradiación para aguas residuales industriales altamente contaminadas y con gran cantidad de color, señalando que las mejores eficiencias de remoción se obtienen con la oxidación electroquímica, eliminando el 86% de color y 78% de DQO y 99,9% de coliformes fecales (Barrera et al, 2003).

- **Oxidación en ánodo.** Los compuestos tanto de tipo inorgánico como orgánico que requieran ser eliminados, podrán serlo a través de la oxidación de los mismos en el ánodo. Bien directamente por una transferencia de electrones en la superficie del ánodo o por la generación de un agente oxidante. En este último caso se evita manipular agentes oxidantes. La oxidación directa se utiliza con frecuencia para tratar cianuros, colorantes, compuestos orgánicos tóxico, incluso la oxidación de Cr

(III) a Cr (VI), más tóxico, pero que de esta forma puede ser reutilizado (Rodríguez et al., 2006).

- **Reducción en cátodo.** La primera etapa del proceso consiste en la deposición del metal sobre la superficie del cátodo, para seguidamente mediante raspado o disolución en otra fase conseguir eliminarlo. Principalmente se emplea en la reducción de metales tóxicos.

El reactor electroquímico utilizado suele ser de tipo filtro-prensa, semejante a las pilas de combustible. Este sistema permite trabajar de manera modular (Rodríguez et al., 2006).

#### 5.2.4 Intercambio iónico

En esta operación se logran retener de forma selectiva los iones disueltos en el agua a través de un material, una resina de intercambio iónico, para posteriormente cederlos a una disolución de regeneración.

El intercambio iónico es un proceso de carácter reversible, que permite la separación de especies iónicas disueltas a través de la transferencia desde la fase líquida a un material intercambiador sólido, en el que sustituyen a otros iones del mismo signo eléctrico, que a su vez pasan a la fase líquida.

La importancia de este tratamiento en las aguas residuales recae en que se logra la eliminación de componentes iónicos disueltos en un efluente antes de su vertido final o de su reutilización, permitiendo asegurar la calidad requerida al agua en ambos casos. Los componentes susceptibles para eliminar suelen ser: aniones inorgánicos, cationes metálicos y formas ionizadas de numerosas moléculas orgánicas (entre los que cabe destacar los colorantes solubles en agua) (Sánchez, 2015)

Existen sustancias de origen natural que tienen capacidad de intercambio, (humus, arcillas y zeolitas) (Sánchez, 2015), pero en las industrias se emplean resinas de intercambio con materiales sintéticos. Estas, mediante una solución regenerante, (no se producen transformaciones químicas ni en las especies iónicas ni en el material intercambiador) pueden recuperar su capacidad de intercambio inicial (Evitech,2020).

#### 5.2.5 Adsorción

La adsorción consiste en la captación de sustancias solubles, (adsorbatos), en la superficie de un sólido, (adsorbente)define la propiedad de ciertos materiales (adsorbentes) de fijar en su superficie moléculas orgánicas extraídas de la fase líquida en la que se encuentran.

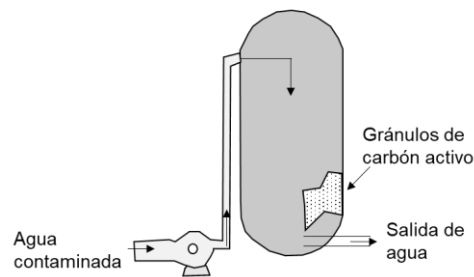
Este proceso es de gran utilidad para tratar fenoles, fenoles, hidrocarburos aromáticos nitrados, derivados clorados, eliminar olor, color y sabor, entre otros. El adsorbente más utilizado en el tratamiento de aguas es el carbón activo (Cyclus, 2020).

Es considerado un tratamiento de afino, por lo que suele tener lugar tras tratamiento biológico.

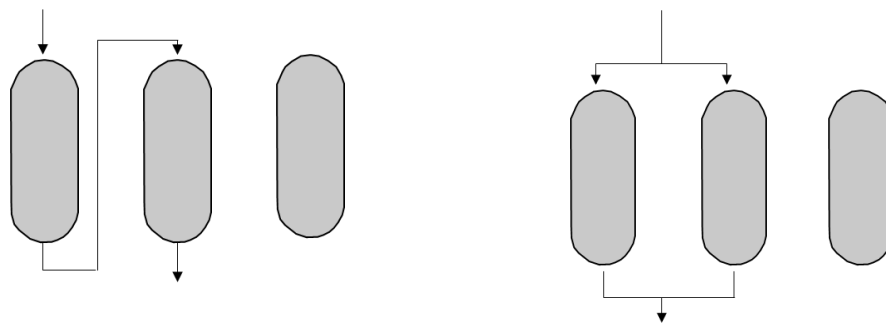
Los factores que generalmente afectan a la adsorción son: la solubilidad, la estructura molecular, la concentración, el peso molecular, polaridad, pH del agua y grado de saturación (Rodríguez et al., 2006).

Como se mencionó anteriormente, el carbón activo es el adsorbente más utilizado en el tratamiento de aguas residuales. Pese a ello, se están desarrollando otros materiales sólidos. Algunos compuestos con alta probabilidad de ser adsorbidos por carbón activo en agua son: cloro, hexano, pentaclorofenol, ozono, etilbenceno, xileno, ciclohexano, nitrobenceno, DDT, lindano, clorobenceno, hipoclorito de calcio (Lenntech, 2020). Principalmente, hay dos formas clásicas de utilización de carbón activo, con propiedades diferentes y utilizado en diferentes aplicaciones:

- **Carbón activado granular (GAC).** Como medio de contacto entre e agua a tratar y el carbón activo, en los países en desarrollo, se suele utilizar una columna. El agua es introducida por la parte superior de la misma y extraída por la inferior. Un sistema de drenaje en la parte inferior se encarga de soportar al carbón activo. Un ejemplo del esquema de funcionamiento se puede apreciar en la Ilustración 5.10. Para reducir las pérdidas de carga producidas por la retención del material, se precisa de un sistema de lavado a contracorriente. Las columnas de lecho fijo se suelen emplear individualmente o conectadas en serie o en paralelo (Ilustración 5.11) (Grupo TAR, 2020). Principalmente es de gran utilidad para eliminar elementos traza, especialmente orgánicos, que pueden estar presentes en el agua, y que habitualmente han resistido un tratamiento biológico. Son elementos, que, a pesar de su pequeña concentración, en muchas ocasiones proporcionan mal olor, color o sabor al agua (Rodríguez et al., 2006).



*Ilustración 5.10 Columna que contiene carbón activado. (Fuente: adaptado de Espinosa, 2020).*



*Ilustración 5.11 Tipos de configuraciones de columnas. (En serie a la izquierda y en paralelo a la derecha). (Fuente: adaptado de Configuración, 2020).*

- **Carbón activo en polvo (CAP).** Se suele añadir al agua a tratar, directamente en las unidades de tratamiento o formando parte de procesos fisicoquímicos. Se ha de verter el agua residual sobre un tanque de contacto, se somete a agitación y se establece un tiempo, en el que las partículas sedimentan. Puesto que el carbón es muy fino, para favorecer y facilitar la eliminación de las partículas de carbón, puede ser necesario emplear un coagulante o llevar a cabo un proceso rápido de filtración en arena (Grupo TAR, 2020).

## 5.2.6 Desinfección

La desinfección del agua consiste en la extracción, desactivación o eliminación de los microorganismos patógenos existentes en el agua y causantes de diversas enfermedades en el cuerpo humano. (Lenntech, 2020). En este aspecto es de gran importancia diferenciar

entre desinfección y esterilización, la primera se refiere a la destrucción de organismos que al ser ingeridos por animales pueden causar enfermedades y la segunda a la destrucción total de los organismos. En el caso de aguas residuales industriales si lo que se pretende es reutilizar el agua, el objetivo no es solo eliminar patógenos, sino cualquier otro organismo vivo.

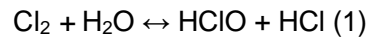
La desinfección se consigue a través de componentes químicos, físicos, medios mecánicos o la filtración. Entre los agentes químicos destacan: Cloro ( $\text{Cl}_2$ ), Dióxido de Cloro ( $\text{ClO}_2$ ), Hipoclorito ( $\text{OCl}^-$ ), Ozono ( $\text{O}_3$ ), Halógenos: Bromo ( $\text{Br}_2$ ), Iodo ( $\text{I}$ ), Cloruro de Bromo ( $\text{BrCl}$ ), Metales: cobre ( $\text{Cu}_2^+$ ), plata ( $\text{Ag}^+$ ), Permanganato potásico ( $\text{KMnO}_4$ ), Fenoles, Alcoholes, Jabones y detergentes, Sales de amonio, Peróxido de Hidrogeno Y distintos ácidos y bases. Los agentes físicos son: la luz ultravioleta (UV), la radiación electrónica, los rayos Gamma y el calor. (Lenntech, 2020).

El cloro es el reactivo más usado para desinfectar el agua, puesto que posee un gran poder oxidante, que favorece la destrucción de las materias orgánicas.

La naturaleza y concentración de organismos a destruir, las sustancias disueltas o en suspensión en el agua, así como la concentración de cloro y el tiempo de contacto utilizado, son una serie de factores que influyen en el proceso de desinfección. Así, por ejemplo, en presencia de sustancias orgánicas y el poder desinfectante es menor, el hierro y manganeso aumentan la demanda de cloro. Es por ello que es importante realizar un estudio de la demanda del cloro (*breakpoint*) para determinar la dosis correcta para cada tipo de agua. También es importante el tiempo de contacto, de manera que el parámetro a utilizar es la expresión C·t: Concentración de desinfectante final en mg/l (C) y tiempo de exposición mínimo en minutos (t). Normalmente la expresión utilizada es  $C_n \cdot t = \text{constante}$ , que para el cloro adopta valores entre 0,5 y 1,5. Sin embargo, una de las principales desventajas de la utilización del cloro como desinfectante es la posibilidad de formación, aunque en cantidades muy reducidas, de compuestos como los trihalometanos (causantes de enfermedades como el cáncer).

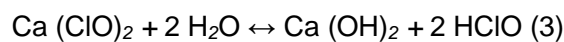
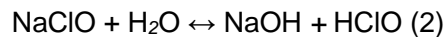
Existen diversas hipótesis acerca de cómo ocurre de destrucción de microorganismo por parte de los desinfectantes, la más aceptada se centra en las alteraciones físicas químicas y bioquímicas sobre la membrana o pared celular y de las enzimas. Cuando se ha destruido esta barrera protectora, se acaban las funciones vitales de la célula, y se produce su muerte.

Al añadir cloro en forma de  $\text{Cl}_2$  se producen dos reacciones químicas: la reacción de hidrólisis y reacción de disociación (Tecpa, 2018). La reacción de hidrólisis se puede definir del modo:



Cuando el  $\text{Cl}_2$  se disuelve en agua, se hidroliza rápidamente para generar ácido hipocloroso (HClO) y ácido clorhídrico (HCl).

En el caso de los hipocloritos, se produce la disociación de ambas sales de acuerdo con las ecuaciones:



En ambos casos se termina formando ácido hipocloroso, que es la especie desinfectante. No obstante, el ácido hipocloroso HClO es un ácido débil que se disocia parcialmente en el agua:



El equilibrio está regido por la siguiente constante  $K_a$ , que presenta un valor aproximado de  $K_a = 3,2 \cdot 10^{-8}$ .

El sentido de desplazamiento de estas reacciones de equilibrio depende del pH del medio. De modo que si el  $\text{pH} < 2$  todo el cloro se encuentra en forma molecular, por lo que no ejerce poder desinfectante en el agua. En cambio, si el  $\text{pH} = 5$ , el cloro molecular ha desaparecido y se encuentra en forma de ácido hipocloroso (HClO). Finalmente, si el  $\text{pH} = 10$  el cloro se encuentra combinado en forma de iones hipoclorito ( $\text{ClO}^-$ ) (Tecpa, 2018).

### 5.3 Procesos biológicos

Se componen de una serie de procesos de tratamiento mediante la utilización de microorganismos para llevar a cabo la eliminación de componentes indeseables en el agua. En un principio su principal objetivo era la eliminación de la materia orgánica de las aguas residuales, y posteriormente, han tenido otros usos, como pueden ser, la oxidación del nitrógeno amoniacal (nitrificación), la eliminación de nitrógeno de las aguas residuales mediante la conversión de las formas oxidadas en  $\text{N}_2$  (desnitrificación) o la eliminación del fósforo (Ferrer, 2018). Se pueden distinguir dos casos: aerobios y anaerobios.

### 5.3.1 Procesos biológicos aerobios

Los sistemas aerobios ocurren en presencia de oxígeno. En este procedimiento se consiguen altos rendimientos y a causa del gran crecimiento de bacterias se generan gran cantidad de fangos. Se diferencian principalmente:

- **Cultivos en suspensión.** El sistema más usado es el de lodos activados. Se consigue estabilizar la materia orgánica presente en el agua residual, mediante la suspensión de microorganismos activados por oxígeno.
- **Cultivos fijos.** Estos se caracterizan por presentar la masa adherida a una superficie, por donde circula el agua residual. La masa microbiana toma el oxígeno dl ambiente y los nutrientes del agua. Destacando los filtros percoladores y los biodiscos o filtros rotatorios de contacto (Muñoz, 2009).

#### 5.3.1.1 Fangos activados: proceso básico

En el proceso, los microorganismos oxidan la materia orgánica produciendo CO<sub>2</sub> y nueva estructura celular. En la Ilustración 5.12. se muestra un esquema del proceso. Durante el mismo, se aporta oxígeno y se recirculan parte de los fangos del clarificador para mantener una concentración adecuada de biomasa suspendida. En el decantador secundario se produce la separación de la biomasa por un lado y del agua depurada por otro. Los diferentes procesos se diferencian fundamentalmente en la edad del fango, es decir, el tiempo que los microorganismos permanecen en el tratamiento. El menor o mayor grado de depuración se debe a un menor o mayor tiempo de permanencia en el reactor (Iglesia, 2016).

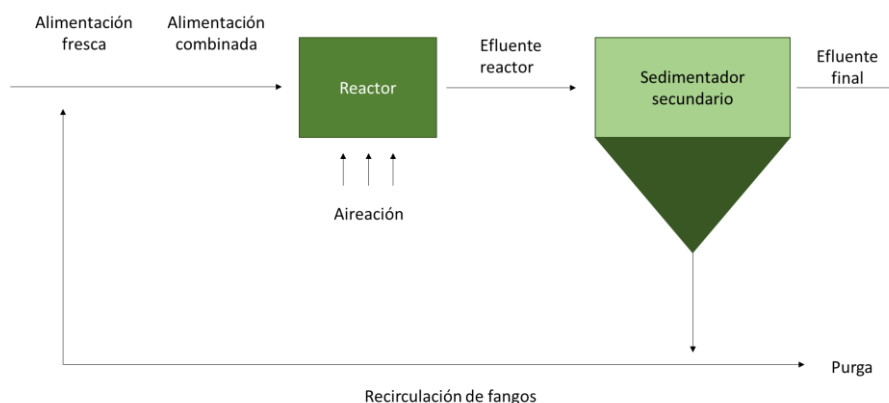


Ilustración 5.12 Proceso de fangos activados. (Fuente: adaptado de Rodríguez et al.,2006).

La aireación es un parámetro importante en el funcionamiento. La solubilidad del oxígeno en el agua es pequeña (en torno a 8-9 mg O<sub>2</sub>/l dependiendo de presión y temperatura) por lo que es preciso asegurar el suministro a los microorganismos, utilizando aireadores



superficiales o difusores. El valor mínimo de operación aconsejable de concentración de oxígeno disuelto es de 2 mg/l. El consumo eléctrico en esta operación será importante dentro de los costes de operación del proceso. La relación A/M (carga orgánica alimentada frente a cantidad de microorganismos), con unidades kg DBO<sub>5</sub>/kg SSV·día., consigue un valor óptimo entre 0,3-0,6 para las condiciones más convencionales de funcionamiento. Otro parámetro importante es la “edad celular”, es decir, el tiempo medio que permanecen los fangos en el interior del sistema. Normalmente suele ser de 5-8 días en condiciones convencionales de operación (Rodríguez et gal.,2006).

### 5.3.1.2 Fangos activados: Modificaciones del proceso básico

Son procesos de fangos activados que han sido modificados como se describe a continuación.

- **Aumento del tiempo de residencia.** La variación de esta característica implica un aumento en el volumen del reactor con respecto al proceso básico. Los tipos más comunes para este tipo de proceso son: reactor tipo Orbal, carrusel, CCAS (sistema de aireación a contracorriente), Biolac, etc. Siendo destacable el de tipo carrusel con difusores de burbuja fina y turbinas conductoras de flujo. Se suele trabajar con relaciones A/M más pequeñas, consiguiendo mayores rendimientos en la degradación de materia orgánica. Además, genera menos cantidad de fangos. Es de gran utilidad cuando se requiera eliminar compuestos con nitrógeno de manera simultánea con la materia orgánica.
- **Contacto estabilización.** El proceso se desarrolla en dos tanques. En primer lugar, en el reactor de contacto se mezclan el efluente con el fango recirculado, en el existe aireación y mezcla completa. Seguidamente el afluente pasará al sedimentador y el fango será recirculado al reactor de estabilización. En el tanque de estabilización se desarrolla la nueva biomasa, que es enviada al tanque de contacto y así iniciar de nuevo el ciclo (Cyclus, 2020). En el reactor de aireación se suele trabajar con menores tiempos de residencia (sobre una hora) pretendiendo que se lleve a cabo solo la adsorción de la materia orgánica en los flóculos. Esta alternativa es útil cuando buena parte de la materia orgánica a degradar se encuentra como materia en suspensión (Ilustración 5.13).

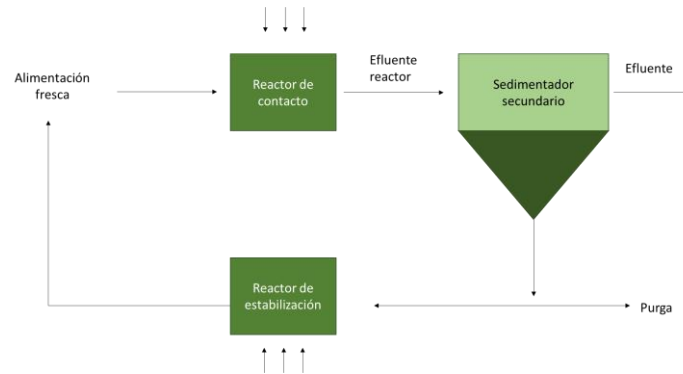


Ilustración 5.13 Proceso de contacto estabilización. (Fuente: adaptado de Rodríguez et al., 2006).

- **Reactores discontinuos secuenciales.** El proceso se basa en un sistema de llenado, reacción, sedimentación y vaciado. Todas estas operaciones tienen lugar en un mismo reactor. La configuración del ciclo depende de las características del agua residual y los requisitos legales a cumplir (Muñoz, 2014)

### 5.3.1.3 Procesos aerobios con biomasa soportada

Se basan en la formación de biomasa en suspensión en el seno del agua residual, se caracterizan porque la mayor parte de la biomasa se encuentra formando flóculos, con la adición de materia orgánica y biomasa. Gracias a este método, se evitan posibles problemas en la sedimentación y recirculación de fangos, pero sigue siendo crucial el aporte adecuado de oxígeno (Lluis, 2008).

- **Filtros percoladores.** Son los sistemas aerobios de biomasa inmovilizada más antiguos y extendidos en la historia. Son lechos fijos de gran diámetro, rellenos con rocas o piezas de plástico o cerámica, que sirven de soporte para la formación de la capa fina de biomasa, por la que se dispersa el agua residual a tratar. Además, debe quedar un espacio por el que cicla el aire que asciende de forma natural. Será necesaria una sedimentación posterior para lograr la separación de los microorganismos del efluente (Ilustración, 5.14). También se suele realizar una recirculación de parte del efluente líquido una vez que ha tenido lugar la segregación (Lluis, 2008).

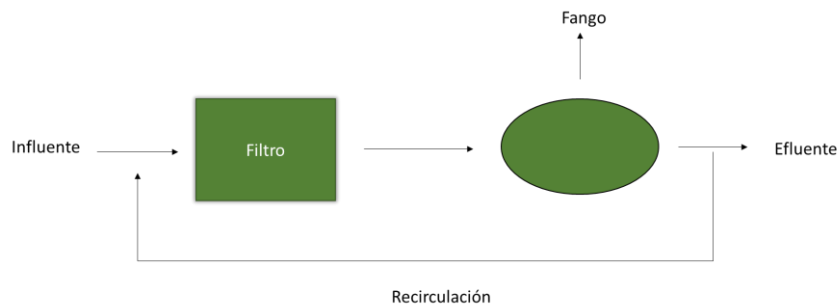


Ilustración 5.14 Proceso que tiene lugar en un filtro percolador. (Fuente: adaptado de Rodríguez et al.,2006).

- **Reactor biológico rotativo de contacto (CBR):** Son un conjunto de discos de plástico generalmente unidos axialmente por un eje de rotación lenta y parcialmente sumergidos en un tanque (40%) con el agua residual. Los discos están fabricados de material corrugado, sobre el que crece la biopelícula, que sucesivamente, se “moja” y entra en contacto con el aire, produciéndose la degradación de la materia orgánica. Son fáciles de manejar y convenientes cuando se trata de pequeños caudales (Aznar, 2020).

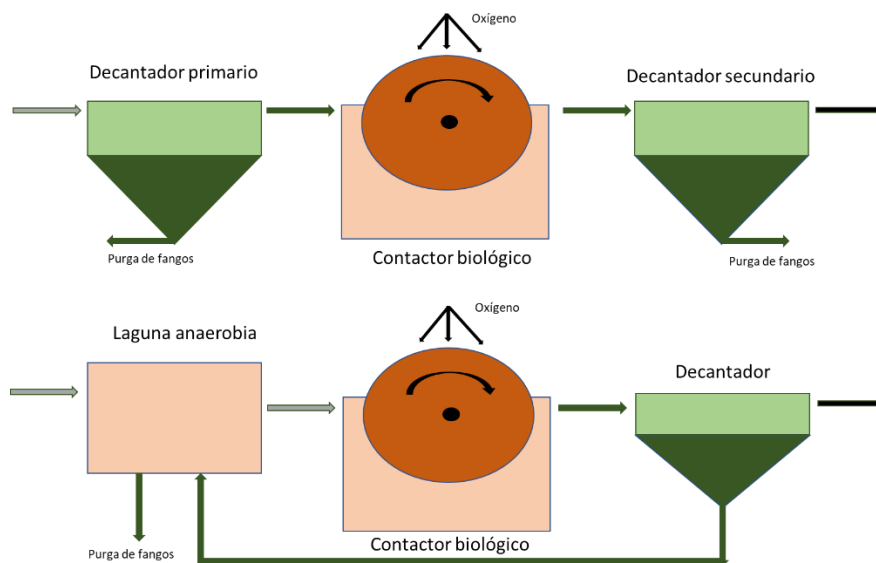


Ilustración 5.15 Esquema de funcionamiento de un CBR. (Fuente: adaptado de Aznar, 2020).

### 5.3.2 Procesos biológicos anaerobios

Los sistemas anaerobios ocurren en ausencia de oxígeno. Es ampliamente utilizado en el tratamiento de aguas residuales, sobre todo cuando estas tienen una alta carga orgánica, para evitar el aporte de grandes cantidades de oxígeno. En su proceso se obtiene biogás,

conformado por metano (60-80%) y dióxido de carbono (40-20%) y con la posibilidad de ser utilizado como combustible para la generación de energía térmica y/o eléctrica. Además, solo una pequeña parte de la DQO tratada (5-10%) se utiliza para formar nuevas bacterias, frente al 50-70% de un proceso aerobio. No obstante, uno de los principales inconvenientes que presenta es que es un proceso con altos tiempos de residencia, por lo cual requiere del empleo de reactores o digestores con alta concentración de microorganismos.

Se diferencian las siguientes etapas (Ilustración 5.16):

- **Hidrólisis.** En la que se encuentran bacterias hidrolíticas. La hidrólisis es la ruptura de moléculas grandes, (polisacáridos, proteínas y lípidos), en moléculas de menor tamaño, (azúcares, aminoácidos, alcoholes, ácidos grasos), que pueden ser transportadas dentro de las células y metabolizadas.
- **Acidogénesis.** Donde están las bacterias fermentativas, que se encargan de fermentar las moléculas de menor tamaño hasta convertirlos en ácidos grasos con bajo número de carbono, como los ácidos fórmico, acético, propiónico y butírico.
- **Acetogénesis.** Los productos fermentados son convertidos a acetato, hidrógeno y dióxido de carbono por la acción de bacterias acetogénicas. Estas bacterias son altamente resistentes a variaciones en las condiciones ambientales. Por ejemplo, aunque el pH óptimo para el desarrollo de su actividad metabólica es 5-6, los procesos anaerobios generalmente son conducidos a pH 7, y aún en estas condiciones su actividad metabólica no decae.
- **Metanogénesis:** Donde se convierte el acetato a metano y CO<sub>2</sub>, se reduce el CO<sub>2</sub> a metano, por la acción de las bacterias acetogénicas (Rodríguez, 2020).

En la Tabla 5.2. se resumen de las reacciones que tienen lugar.

*Tabla 5.2 Reacciones que tienen lugar en procesos anaerobios de depuración. (Fuente: Zinder et al., 1984)*

Tipo de reacción	Ecuación
Fermentación de glucosa a acetato	$\text{Glucosa} + 4\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + 4\text{H}^+ + 4\text{H}$
Fermentación de glucosa a butirato	$\text{Glucosa} + 2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{C}_4\text{H}_7\text{O}_2 + 2\text{HCO}_3^- + 3\text{H}^+ + 2\text{H}_2$
Fermentación de butirato a acetato e h <sub>2</sub>	$\text{Butirato} + 2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 2\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + \text{H}_2$
Fermentación del propionato a acetato	$\text{Propionato} + 3\text{H}_2 \longrightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + \text{H}_2$
Acetogenesis a partir de H <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub>	$\text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + 4\text{H}_2 \longrightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + 2\text{H}_2\text{O}$
Metanogénesis a partir del CO <sub>2</sub> e H <sub>2</sub>	$\text{HCO}_3^- + 4\text{H}_2 \longrightarrow \text{CH}_4 + 3\text{H}_2\text{O}$
Metanogénesis a partir del acetato	$\text{Acetato} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{CH}_4 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$

Seguidamente, en la Ilustración 5.16 se explica de forma esquemática el proceso llevado a cabo en un sistema anaerobio.

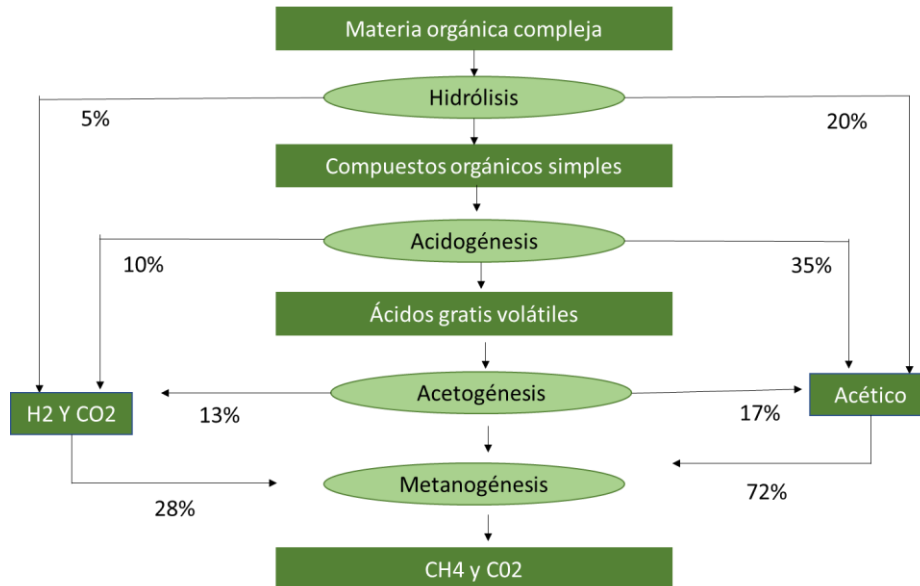


Ilustración 5.16 Sistema anaerobio. (Fuente: adaptado de Rodríguez et al.,2006).

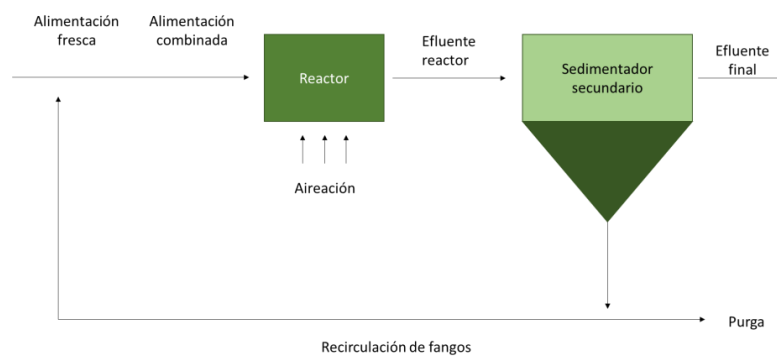
Los sistemas anaerobios presentan una alta eficacia, un bajo consumo de energía, pequeña producción de fangos y la posibilidad de grandes periodos de parada sin alteración significativa en la población bacteriana. Sin embargo, presenta baja efectividad en la eliminación de nutrientes y patógenos, genera malos olores y la necesidad de un post-tratamiento, generalmente aerobio, para alcanzar los niveles de depuración demandados, así como los generalmente largos periodos de puesta en marcha.

El reactor donde tiene lugar el proceso se ha ido desarrollando a la par que se ha investigado acerca del tratamiento anaerobio. Debido al bajo crecimiento de las bacterias metanogénicas y la lentitud con la que llevan a cabo la formación de metano, para no tener que utilizar reactores de gran tamaño, es necesario desarrollar diseños en los que se consiga una alta concentración de microorganismos (sólidos suspendidos volátiles, SSV) en su interior. Para conseguirlo, habitualmente es necesario que el tiempo de retención hidráulico (TRH) sea inferior al tiempo de retención de sólidos (TRS). A todos estos reactores se les denomina de alta carga, dado que son los únicos que pueden tratar aguas con elevada carga orgánica de una forma viable. De entre los más utilizados, cabe destacar los que se describen en los apartados siguientes.

### 5.3.2.1 Reactor de contacto (mezcla completa con recirculación de biomasa).

Cuenta con un tanque cerrado con un agitador. Éste tiene una entrada para el agua residual y dos salidas, una para el biogás generado y otra para la salida del efluente (Ilustración

5.17). Este último se lleva a un decantador donde es recirculada la biomasa de la parte inferior del decantador al reactor, para evitar la pérdida de ésta (Rodríguez et al.,2006).



*Ilustración 5.17 Reactor de contacto. (Fuente: adaptado de Cañizares, et al., 2006)*

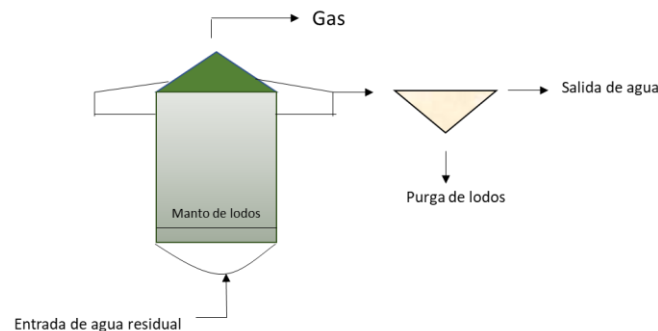
### 5.3.2.2 Reactor de manto de lodos y flujo ascendente (UASB).

Se desarrolló en Holanda a principios de los años 70. Es un reactor cuyo lecho está formado por gránulos de biomasa. Estos gránulos son porosos y con una densidad poco mayor que la del líquido, con lo que se consigue un buen contacto de éste con la biomasa. En algunos casos, la calidad de la biomasa que debe ser desarrollada en el sistema depende de una rutina de operación apropiada y de la estabilidad y eficacia del proceso de tratamiento. El diseño de los reactores UASB es muy simple y no necesita la instalación de ningún equipamiento sofisticado ni medio de relleno para la retención de la biomasa (Veiga, 2015). Los reactores suelen tener en su parte superior un sistema de separación gas-sólido-líquido, puesto que se acumula biogás alrededor de las partículas, y éstas manifiestan una tendencia a ascender separándose con estos dispositivos. Se consigue una alta concentración de biomasa dentro del reactor, que conlleva una elevada velocidad de eliminación de materia orgánica con rendimientos elevados de depuración. El agua residual se introduce por la parte inferior, homogéneamente repartida y ascendiendo lentamente a través del manto de lodo (Ilustración 5.18) (Rodríguez et al., 2006). En general, un reactor UASB presenta las siguientes características:

- Sistema compacto, con bajos requerimientos de espacio.
- Bajos costes de construcción y operación.

- Baja producción de lodos.
- Bajo consumo energético (solamente para el bombeo del influente, si es necesario).
- Buenas eficacias de eliminación de materia orgánica, entre el 65 y 75%.
- El lodo en exceso presenta una concentración elevada y buenas características de deshidratación.

Por otro lado, algunas de las desventajas y limitaciones que presenta son el tiempo necesario para la puesta en marcha del sistema elevado y la necesidad de una etapa de postratamiento.



*Ilustración 5.18. Reactor de manto de lodos y flujo ascendente. (Fuente: adaptado Rodríguez et al., 2006).*

### 5.3.2.3 Filtro anaerobio (FA).

Es un proceso que consta de un tanque, relleno con un material filtrante de alto rendimiento, formada por los microorganismos anaerobios que se desarrollan sobre la superficie del sólido, que consigue la eliminación efectiva de la materia contaminante disuelta en el agua residual. Son sistemas tradicionalmente utilizados en muchas depuradoras de aguas residuales industriales con alta carga orgánica. Resisten muy bien alteraciones de carga en el influente, pero no aceptan gran cantidad de sólidos en suspensión con el influente. El rango típico de cargas tratadas está en 5-55 Kg DQO/m<sup>3</sup>·día (Rodríguez et al., 2006).

### 5.3.2.4 Reactor anaerobio de lecho fluidizado (RALF).

Los lechos fluidizados son reactores biopelícula que contienen pequeñas partículas que actúan como soporte para el crecimiento adherido de la biocenosis (conjunto de organismos que viven y se reproducen en determinadas condiciones de un medio). En el interior de los mismos existe un flujo vertical ascendente que facilita que las partículas permanezcan en suspensión, sin llegar a ser transportadas por el flujo. Presenta una alta capacidad de

eliminación de bajas cargas, alcanzando a depurar concentraciones de DQO inferiores a 1000mg/L (Seghezzo et al., 1998) En lo que respecta a las aplicaciones, es adecuado para ser integrado en tratamiento biológico aerobio, anóxico y aerobio. Siendo destacable la digestión anaerobia, oxidación de materia orgánica, nitrificación y desnitrificación de aguas residuales industriales y urbanas (Jácome, 2014)

En la Tabla 5.3. se muestran las características de las diferentes configuraciones de reactores.

*Tabla 5.3. Condiciones de operación para distintos reactores anaerobios. (Fuente: Rodríguez et al., 2006).*

Reactor	DQO entrada (mg/l)	TRH (h)	Carga (kg DQO/m <sup>3</sup> día)	Eliminación de DQO (%)
De contacto	1.500-5.000	2-10	0,5-2,5	75-90
EGSB	5.000-15.000	4-12	15,0-25,0	75-85
FA	10.000-20.000	24-48	5,0-55,0	75-85
RALF	5.000-10.000	05-10	5,0-10-0	80-85

## 5.4 Procesos biológicos de eliminación de nutrientes

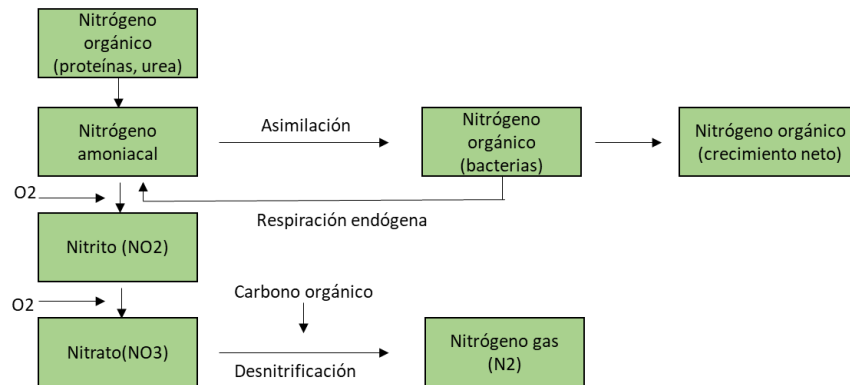
### 5.4.1 Tratamiento biológico de compuestos con nitrógeno.

El nitrógeno está presente en las aguas residuales fundamentalmente en forma reducida, como nitrógeno amoniacal y nitrógeno orgánico: urea, aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos y algunos compuestos heterocíclicos nitrogenados. En el proceso de la oxidación biológica del carbono orgánico gran parte del nitrógeno orgánico es convertido en nitrógeno amoniacal (Arnaiz et al, 2000). Dos grupos especializados de bacterias autótrofas (Nitrosomas y Nitrobacter) son los encargados de convertir amoniaco en nitrato en aguas residuales. Pese a que hasta hace muy poco se asumía que las bacterias autótrofas son estrictamente aerobias, recientemente se ha descubierto que el proceso puede darse en reactores biológicos con algunas horas de anoxia o anaerobiosis. Resultando ser un proceso de cierta complejidad (Arnaiz et al, 2000).

Acto seguido, otra serie de bacterias desnitrificantes llevan a cabo la eliminación de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, en un sistema anóxico, donde el nitrógeno combinado se elimina del agua, liberándose N<sub>2</sub> gaseoso a la atmósfera y el propio nitrato actúa de aceptor de electrones, siendo en este caso bacterias heterótrofas, es decir su fuente de carbono es materia orgánica. Este proceso en su conjunto es conocido como nitrificación-desnitrificación.



Para el procedimiento industrial se llevará a cabo el proceso previamente descrito, en dos reactores consecutivos. Primero un reactor aerobio seguido de otro con condiciones anóxicas, pero en el que será necesario adicionar fuente de carbono para el desarrollo de las bacterias desnitrificantes. El sistema en su conjunto suele ser semejante al proceso de fangos activados (Rodríguez et al.,2006).



*Ilustración 5.19 Transformaciones de los compuestos del nitrógeno. (Fuente: adaptado de Cañizares, et al., 2006)*

Con frecuencia, la materia nitrogenada se encuentra mezclada con materia orgánica y se busca la eliminación de ambas de manera simultánea, por lo que no se puede seguir la secuencia anterior. En el primer reactor de nitrificación la materia orgánica inactivaría las bacterias nitrificantes, y en el segundo, se necesitaría materia orgánica. Para evitar estos problemas, es necesario iniciar el proceso con un reactor anóxico, donde la materia orgánica del agua residual actúa como fuente de carbono, pero sería necesario recircular parte de la suspensión del segundo reactor de nitrificación: en este reactor se producirán nitratos, y sería un reactor aerobio (Rodríguez et al., 2006).

Otra alternativa para abordar la eliminación conjunta de materia orgánica y nitrógeno es mediante el uso de "canales de oxidación". Una modificación del proceso de fangos activados con elevados tiempos de retención de sólidos y de retención hidráulica.



*Ilustración 5.20. Vista aérea de un proceso de fangos activados con canales de oxidación.  
(Fuente: Química, 2020)*

#### **5.4.2 Eliminación biológica del fósforo**

En Europa los métodos generales para la remoción de fósforo han sido procesos fisicoquímicos mediante la adición de sales de hierro o de aluminio, y en menor medida, de calcio. Con la utilización de estas sales se obtienen formaciones de precipitados mixtos de hidróxidos y fosfatos que decantan rápidamente (Suárez et al, 2020). En la actualidad se han desarrollado métodos para su eliminación biológica. Inicialmente una masa bacteriana es sometida en un ambiente anaerobio, donde los microorganismos tienen tendencia a no consumir fósforo para el crecimiento debido a la presencia de ácido acético. Seguidamente son tratadas a través de un sistema aerobio, en el que consumen fósforo, momento en el que se sedimentan y separan. Para la eliminación conjunta de fósforo y materia orgánica se han desarrollado una serie de procesos como pueden ser *PhoStrip* o *Bardenpho*. En todos ellos el reactor suele ser una balsa alargada, compartimentada de forma que en cada zona se somete a la masa microbiana en el ambiente adecuado (anaerobio, anóxico, aerobio), y se realizan las pertinentes recirculaciones entre las diferentes secciones.

---

## 6 Tratamientos avanzados

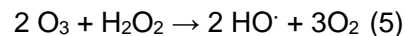
---

## 6 Tratamientos avanzados

### 6.1 Oxidación química

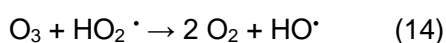
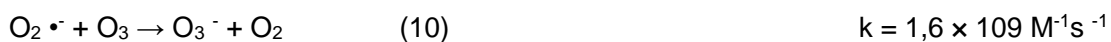
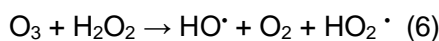
#### 6.1.1 Ozonización con peróxido de hidrógeno ( $O_3/H_2O_2$ ) y ( $O_3/H_2O_2/OH^\cdot$ )

La ozonización transforma los contaminantes en compuestos más simples. La combinación de peróxido de hidrogeno combinado y ozono origina un ciclo de descomposición (Hoigné, 1982). El  $H_2O_2$  es un ácido débil, un poderoso oxidante y un compuesto inestable.



Al utilizar dos o más oxidantes combinados se consigue aprovechar los efectos sinérgicos entre ambos, alcanzando así la destrucción total de la carga orgánica. Para determinar los agentes oxidantes a oxidar y las cantidades a aplicar será determinado mediante ensayos de laboratorio en los que se estudiará el rendimiento de la reacción. La combinación peróxido de hidrógeno y ozono es la más usada. El proceso pretende combinar la oxidación directa y selectiva del ozono con la reacción rápida y poco selectiva de los radicales  $HO^\cdot$  con los compuestos orgánicos. El  $H_2O_2$  puede iniciar la descomposición de  $O_3$  por transferencia de electrones (Huang, 1993).

La reacción genera  $HO^\cdot$  consumiendo  $H_2O_2$  y  $O_3$ , mediante un mecanismo en cadena que se muestra a continuación.



Las reacciones (7) y (8) son pre-equilibrios del proceso en los que este es transformado a pH alcalino. Su constante de equilibrio ( $k_a$ ), viene indicada a la derecha de las mismas.

El proceso es caro pero rápido, y puede tratar contaminantes orgánicos presentes en muy bajas concentraciones, a pH entre 7 y 8.

El tratamiento es excelente para el postratamiento con cloro o dióxido de cloro. Uno de los principales campos de aplicación es la degradación de plaguicidas presentes en aguas (Beltrán, 1884)

### 6.1.2 Métodos ozono-ultravioleta: O<sub>3</sub>/UV, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV

La fotooxidación directa con radiación UV permite la degradación de contaminantes orgánicos que sean capaces de absorber dicha reacción.

Generalmente la absorbancia de la mayoría de los contaminantes orgánicos es baja y las reacciones fotoquímicas que se originan tienden a generar mezclas complejas de productos intermedios en lugar de la mineralización del contaminante. La adición al medio de ozono, peróxido de hidrógeno u ambos puede incrementar la velocidad de las reacciones fotoquímicas. Esto sucede debido a que son con puestos que se descomponen y forman radicales al absorber luz ultravioleta.

No obstante, otra condición que se ha de tener en cuenta es que el propio compuesto orgánico a degradar también absorba radiación ultravioleta.

**H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV.** La fotólisis del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> se realiza casi siempre utilizando lámparas de vapor de mercurio de baja o media presión. La eficiencia del procedimiento se mejorará si los contaminantes se fotolizan directamente. El proceso fotoquímico es más eficiente en medio alcalino, ya que la base conjugada del peróxido de hidrógeno (HO<sub>2</sub><sup>-</sup>) tiene una absorptividad mayor ( $\epsilon_{254} = 240 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ). En la Ilustración 6.1 se puede apreciar el diseño de la configuración de un sistema Cavitación-Oxidación UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, aplicable en la industria.

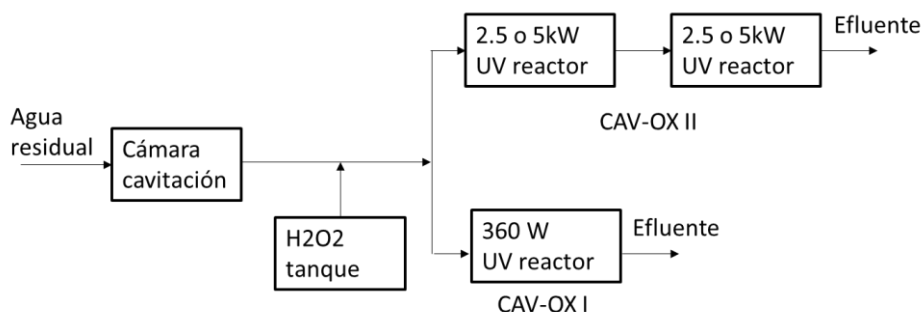
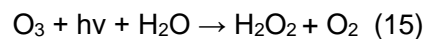


Ilustración 6.1 Configuración de un sistema Cavitación-Oxidación UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. (Fuente: Bes Monge, 2018).

El uso de UV/peróxido ofrece grandes ventajas, entre las que cabe destacar que el oxidante es económico, estable térmicamente y permite ser almacenado. Presenta solubilidad infinita en el agua, por ello no existen problemas de transferencia de masa asociada a gases. Sin embargo, dada la baja sección eficaz de absorción de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a 254 nm se necesitan altas concentraciones del oxidante. El método no es efectivo para degradar alcanos fluorados o clorados, que no son atacados por HO<sup>•</sup>, y tiene baja eficiencia para tratar aguas de alta absorbancia a  $\lambda < 300$  nm. Se debe determinar en cada caso la cantidad óptima de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, para evitar un exceso que podría retardar la degradación. El método UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ha sido empleado con éxito en la eliminación de contaminantes presentes en aguas y efluentes industriales, incluyendo organoclorados alifáticos, aromáticos, fenoles (clorados y sustituidos) y plaguicidas (Legrini, 1993).

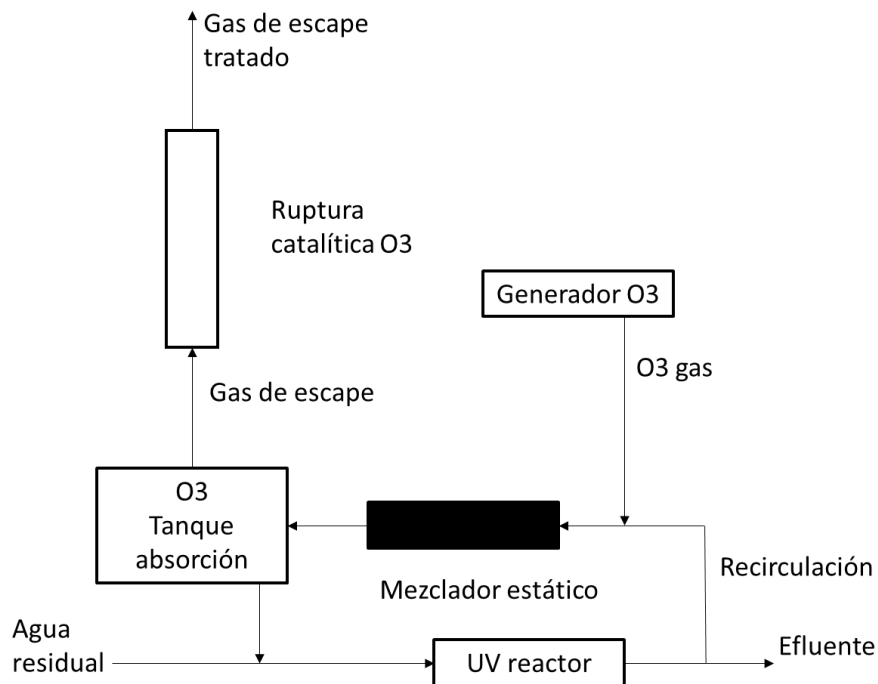
**UV/O<sub>3</sub>.** La irradiación del ozono en agua produce H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en forma cuantitativa:



Este método podría considerarse como una forma cara de generar H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y luego HO<sup>•</sup>.

En la práctica, presenta la ventaja añadida de que el ozono posee una absorptividad molar mayor que el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y puede usarse, para tratar aguas que pueden absorber altos niveles de UV.

En la Ilustración 6.2 se aprecia el diseño de la configuración del sistema UV/O<sub>3</sub> para el tratamiento de agua residual a nivel industrial.



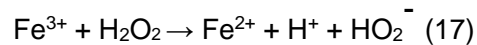
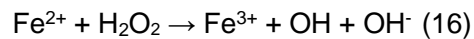
*Ilustración 6.2. Configuración de un sistema UV/O<sub>3</sub> de WEDECO para agua residual con COV clorados. (Fuente: adaptado de Bes Monge, 2018).*

Este proceso es de gran utilidad para la potabilización de aguas, en el tratamiento de aguas residuales altamente contaminadas, en desinfección, en decoloración de aguas de la industria del papel y en la degradación de hidrocarburos alifáticos clorados (saturados e insaturados). Además de ser el mejor método para el tratamiento de los policlorobifenilos (Domenech, 2004).

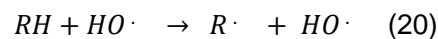
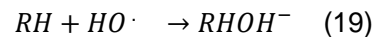
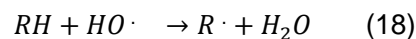
También puede utilizarse la combinación UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>, que acelera el proceso térmico. La adición de luz al proceso H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub> produce un aumento neto de la eficiencia. Las técnicas UV/O<sub>3</sub> y UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> están comercialmente disponibles. Los tres procesos UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, UV/O<sub>3</sub> y UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub> han mostrado ser muy efectivos para la descontaminación de aguas subterráneas y remediación de suelos. (Huang et al., 1993)

### 6.1.3 Peróxido de hidrógeno y catalizador (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/Fe<sup>2+</sup>):

En este proceso, que es catalítico homogéneo, una sal de hierro (FeSO<sub>4</sub> por lo general), genera radicales debido a la interacción del peróxido de hidrógeno con la forma reducida Fe<sup>2+</sup>. A la combinación de sales de hierro en presencia de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y sales de hierro se denomina reactivo Fenton. Los conocidos ensayos del reactivo Fenton de finales del siglo XIX demostraron que estas combinaciones eran capaces de oxidar los ácidos tartárico y málico, y otros compuestos orgánicos (Fenton, 1894). El mecanismo es el siguiente:



Como se puede observar, se pueden generar tanto radicales  $\text{OH}^-$  como radicales perhidroxilo ( $\text{HO}_2^-$ ). Ambos serán los encargados de generar la reacción en cadena para eliminar la materia oxidable. Aunque bien es cierto que los radicales  $\text{OH}^-$  presentan un mayor poder de oxidación. Los principales mecanismos de reacción llevados a cabo son abstracción de hidrogeno, adición a la estructura contaminante o transferencia de carga, (Domenech et al, 2004).



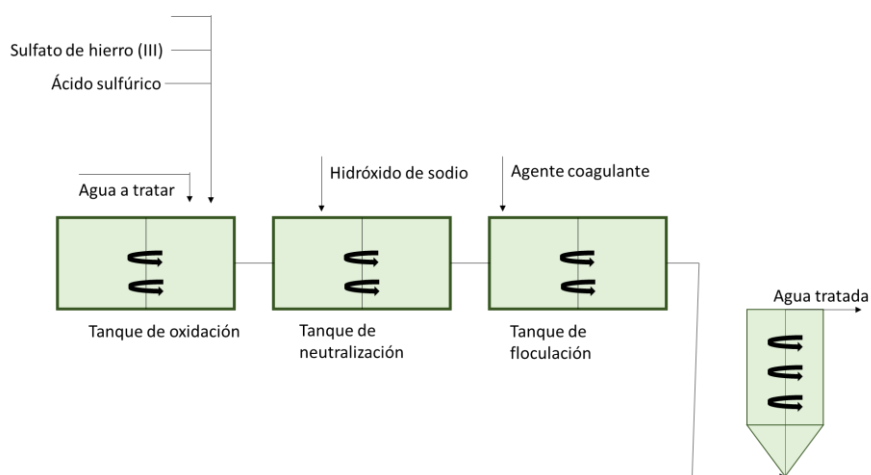
La velocidad de reacción del  $\text{Fe}^{2+}$  con  $\text{H}_2\text{O}_2$ , es condicionada por la concentración de hierro. Por lo general la relación aplicable es 1-10%. Otra incidencia relacionada con el sistema Fenton es la posibilidad de que los productos de reacción (ácidos orgánicos) secuestren el hierro sacándolo del ciclo catalítico. El rango de aplicabilidad de la técnica está limitado también por el pH del medio. El pH óptimo es ácido y la temperatura ha de ser moderada. (Bes Monge et al.,2018).

La acetona, el ácido acético, el ácido oxálico, las parafinas y los compuestos organoclorados son de los pocos compuestos que nos son atacados por este reactivo (Bigda, 1995). Es un buen oxidante de herbicidas y otros contaminantes de suelos tales como hexadecano o Dieldrin. Puede descomponer solventes para limpieza a seco y decolorar aguas residuales con distintos tipos de colorantes y otros residuos industriales, reduciendo su DQO También se ha aplicado exitosamente el reactivo de Fenton en la reducción de DQO de aguas municipales y subterráneas y en el tratamiento de lixiviados. Es útil como pretratamiento de compuestos no biodegradables (Safarzadeh-Amiri, 1996) y para el tratamiento de suelos y la pérdida de eficacia en medio.

Para el procedimiento industrial, se suele disponer de un reactor principal donde ocurre el proceso de Fenton en modo discontinuo, normalmente en tanque no presurizado, en condiciones atmosféricas, que dispone de una serie de bombas externas para poder adicionar el agente para el ajuste del pH (ya sea ácido o base), y dosificar el sulfato de hierro y el peróxido de hidrógeno (35-50%) en disolución. Tras llenar el tanque de oxidación con el agua residual, la adición de los reactivos se lleva a cabo como se puede observar se lleva a cabo siguiendo los siguientes pasos:



1. Añadir el ácido o la base para ajustar el pH hasta 2,5-4 (2,8 idealmente).
2. Añadir los reactivos poco a poco para que no ocurran cambios bruscos de pH o la temperatura.
3. Añadir el sulfato de hierro (II) y después el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.
4. Se pasa a un tanque de neutralización para adicionar una base.
5. Precipitar el hidróxido de hierro en la forma de lodo.
6. Coagular el lodo en un tanque de floculación. (Bes Monge et al.,2018).



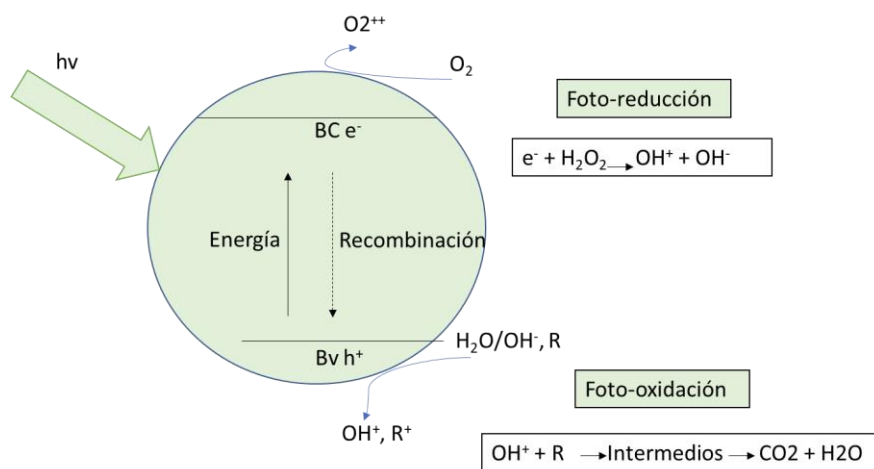
*Ilustración 6.3 Esquema industrial del proceso Fenton. (Fuente: adaptado de Bes Monge et al.,2018).*

#### 6.1.4 Procesos fotocatalíticos (O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub>/UV y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>/UV)

La fotocatalisis heterogénea es un proceso que se basa en la absorción directa o indirecta de energía radiante (visible o UV) por un sólido (el fotocatalizador heterogéneo, que normalmente es un semiconductor de banda ancha). En la región interfacial entre el sólido excitado y la solución tienen lugar las reacciones de destrucción o de remoción de los contaminantes que ocurren en la región entre el sólido excitado y la solución. La excitación del semiconductor puede tener lugar de dos formas:

- Por excitación directa del semiconductor, de manera que éste es el que absorbe los fotones usados en el proceso. Este es el caso de aplicación general.
- Por excitación inicial de moléculas adsorbidas en la superficie del catalizador, que a su vez son capaces de inyectar cargas (electrones) en el semiconductor.

El principal fotocatalizador es el dióxido de titanio, tanto en forma de rutilo como de anatasa. El dióxido de titanio puede ser activado mediante radiación ultravioleta hasta 380 nm, lo que permite su funcionamiento como fotocatalizador solar, ya que la irradiación solar comienza a longitudes de onda de unos 300 nm. La mayoría de los compuestos orgánicos contaminantes se pueden tratar mediante fotocatalisis, incluyendo moléculas cloradas como clorofenoles y dioxinas, que resultan mineralizados hasta CO<sub>2</sub> y HCl. El pH condiciona el estado de la superficie y la adsorción de los contaminantes. Los mejores resultados se obtienen para pH ligeramente ácidos y en combinación con otros generadores de hidroxilos, como el ozono o el peróxido de hidrógeno (Rodríguez et al.,2006).



*Ilustración 6.4 Esquema de los procesos de oxidación-reducción con semiconductores. (Fuente: adaptado de Bes Monge et al.,2018).*

### 6.1.5 Métodos electroquímicos:

Los procesos electroquímicos para la oxidación de contaminantes orgánicos se basan en la utilización de energía eléctrica (2-20 A) (Brillas, 1998), para romper los enlaces de las moléculas.

Este proceso evita la introducción de reactivos en la disolución. En la oxidación anódica, los compuestos orgánicos se oxidan mediante los radicales hidroxilos generados en un ánodo a partir de la oxidación de moléculas de agua, mientras que, en la oxidación electroquímica, los compuestos orgánicos reaccionan con oxidantes moleculares generados electroquímicamente, como el peróxido de hidrógeno que se produce en cátodos.

La eficiencia del proceso puede mejorarse por el método electro-Fenton, es decir, con la adición de Fe (II). Si además se emplea un ánodo de sacrificio de Fe, que provee cantidades

estequiométricas de Fe para la reacción de Fenton, el proceso se conoce como Peroxicoagulación.

Un ejemplo podría ser la degradación por oxidación anódica de una solución de anilina mediante una corriente de 20 A, que conduce a un 18 % de eliminación del carbono orgánico total (COT) al cabo de 6 horas. Si el proceso se lleva a cabo empleando el método electro-Fenton, se consigue un 61% de disminución del COT al cabo de 2 horas, mientras que por Peroxicoagulación se elimina un 91 % en sólo 1 hora en iguales condiciones.

## **6.2 Filtración por membranas.**

Las membranas son finas barreras entre dos fases, a través de las cuales tiene lugar un transporte de materia, gracias a la acción de una fuerza, (generalmente diferencia de concentración o presión). Son unos dispositivos con una historia de alrededor de 40 años y que con el paso de los años han ido desarrollando grandes avances (Benito, 2004).

Atendiendo a su clasificación, en función de su estructura se pueden clasificar en dos grandes bloques: densas y microporosas.

### **6.2.1 Membranas densas**

Estructuras en las que las sustancias que circulan a través de la membrana siguen un mecanismo de transporte que depende de la solubilidad y difusividad de la molécula transportada a través del material. La permeabilidad de la misma se ve condicionada por el espesor de la membrana y por las propiedades físicas y químicas del polímero: cristalinidad, estructura de la cadena, humedad, etc. (Benito, 2004). Las membranas son de tipo anisótropo, (estructuras laminares o tubulares donde el tamaño de poro, la porosidad o la composición de la membrana cambia a lo largo de su espesor), debido a las fuertes presiones a las que se ven sometidos. La ósmosis inversa y la nanofiltración son procesos que utilizan este tipo de membranas (Rodríguez et al.,2006).

### **6.2.2 Membranas porosas**

Elementos que incorporan una estructura microporosa, similar a una barrera perforada, pudiendo ser atravesada por aquellas partículas cuyo tamaño sea inferior al tamaño de poro (Benito, 2004). En este tipo de membranas la fuerza impulsora del fluido a través de la membrana es la diferencia de presión. Las membranas que se encuadran en este grupo tienen una distribución de diámetros de poro de 0,001 mm – 10 mm (Rodríguez et al.,2006).

Las configuraciones de las membranas a la hora de su fabricación pueden ser: laminares, tubulares o fibras huecas.

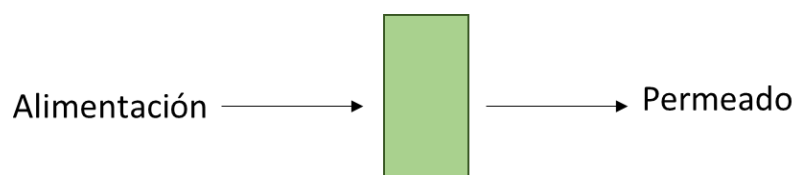
- **Laminares.** Son láminas planas, las cuales se podrán manipular para formar otro tipo de módulos dependiendo de su propia flexibilidad.
- **Tubulares:** Estructuras insertadas en el interior de carcasas cilíndricas, y compuestas de una serie de membranas tubulares. La alimentación se bombea por el interior de las membranas, produciéndose un flujo lateral de permeado a través de las paredes. La carcasa permite la extracción de flujos de permeado y concentrado, En lo que respecta al material del que están hechas, presentan un soporte poroso de papel o fibra de vidrio sobre el que se deposita la superficie filtrante. También se construyen en materiales cerámicos (Rodríguez et al.,2006). Este tipo es uno de los más usados a nivel industrial sobre todo por su facilidad de limpieza.
- **Fibras huecas:** Son estructuras semejantes a los intercambiadores de calor multitubulares, de 70 cm de longitud y 8 cm de diámetro donde se alojan 500 – 2000 membranas del tipo fibra hueca. Estas poseen diámetros comprendidos entre 0,2 y 1,25 mm. Los “hilos” de membrana contienen billones de poros que actúan como colador para filtrar partículas, turbidez y patógenos.

Existen dos configuraciones, atendiendo a que la alimentación circule por el interior o el exterior de las fibras. La caída de presión en este tipo de módulos es de 0,7 bar – 70 bar, según el tipo de aplicación (Rodríguez et al.,2006).

Su principal ventaja es que su relación entre el área de membrana efectiva y el volumen del módulo es muy alta (Benito et al., 2004).

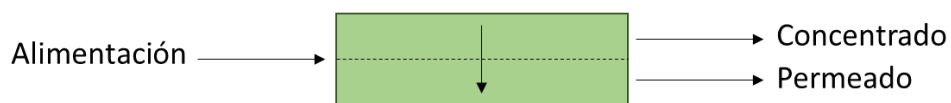
La filtración con membranas se puede realizar mediante dos modos de operación:

- **Filtración frontal.** El efluente a tratar es introducido en la misma línea de flujo de la membrana, quedando así las partículas contaminantes retenidas en el interior de las membranas y se sitúa en la línea de flujo de las membranas, de esta manera, las partículas contaminantes son retenidas en el interior de las membranas y se genera una corriente depurada. Las membranas utilizadas son de tipo filtro profundo, dispuestas en cartuchos.



*Ilustración 6.5. Esquema de filtración en línea*

- **Filtración tangencial.** El efluente determinado es introducido de forma tangencial, respecto a la línea de flujo de las membranas. Los contaminantes quedan retenidos en la superficie de la membrana, pero son arrastrados por el flujo tangencial, de esta forma se evita el ensuciamiento de la membrana. A la salida del proceso se generan dos corrientes: concentrado, con una concentración de contaminantes mayor que en la alimentación, y permeado, con una concentración de contaminantes que hacen posible su vertido o reutilización. Las membranas utilizadas son de tipo tamiz o densas (Rodríguez et al.,2006).



*Ilustración 6.6 Filtración tangencial*

---

## 7 Análisis de patentes

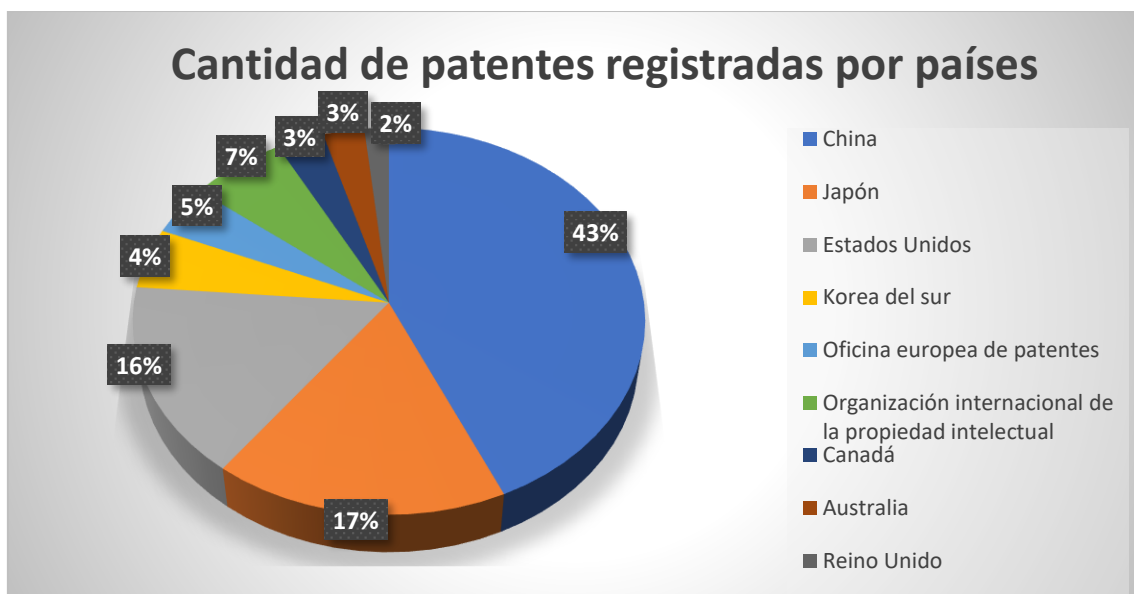
---

## 7 Análisis de patentes

En análisis de las patentes existentes tanto a nivel mundial como europeo es de gran importancia, ya que permite conocer los métodos de mayor importancia en el sector, información de gran relevancia para las industrias a la hora de insertar una nueva tecnología en la industria.

El análisis de patentes se ha realizado mediante la base de datos oficial de la Oficina Europea de Patentes (<https://worldwide.espacenet.com/>). Esta página, ofrece un servicio en línea gratuito para la búsqueda y solicitud de patentes relacionadas con invenciones y desarrollos técnicos desde el año 1782 hasta la actualidad. Ofrece cobertura a nivel mundial y, además, permite la traducción automática de documentos de patente, el seguimiento del progreso de las tecnologías emergentes, encontrar la solución de problemas técnicos o incluso estudiar los elementos desarrollados por los competidores.

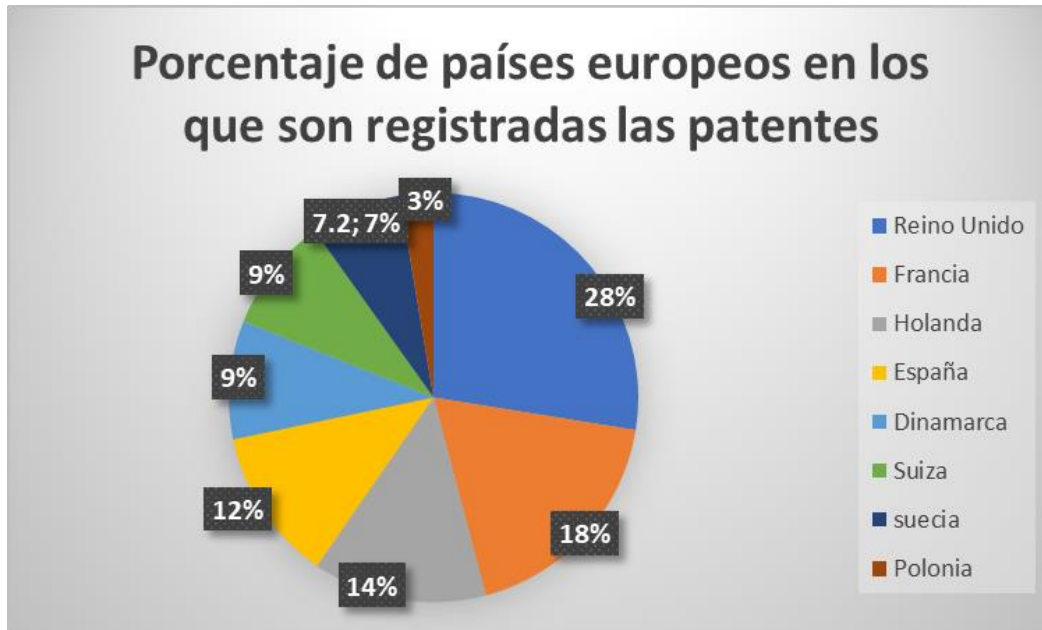
El primer filtro de búsqueda bajo el que se inició la búsqueda fue: “Industrial” “Waste” “water” en el cual se obtuvieron un total de 620.665 resultados. La Gráfica 7.1 muestra el porcentaje de patentes de los principales países industrializados.



Gráfica 7.1 Países con mayor número de patentes registradas. (Fuente: Espacenet,2020)

Como se puede observar, la mayor parte de las patentes han sido registradas en China, Japón y Estados Unidos, debido a que las principales empresas propietarias de dichas patentes presentan sus sedes principales en estos países. Las principales empresas propietarias de patentes relacionadas con el tratamiento de aguas residuales industriales

son: Fuji Photo film Co Ltd., Mitsubishi Heavy ind Ltd., Bayer AG., China Petroleum & Chemical., Toray Industries., Matsushita Electric ind co Ltd., China Petroleum & Chem Corp. y Kurita Water ind Ltd, Toshiba corp.



*Gráfica 7.2 Porcentaje de países europeos en los que son registradas una serie de patentes*

Si se realiza un estudio detallado a nivel europeo, y únicamente se focaliza la atención en los países con más de 1.300 patentes registradas, se obtiene que Reino Unido y Francia son los principales países que aglutinan el registro de patentes, como se puede observar en la Gráfica 7.2.

España ocupa el cuarto lugar en orden de relevancia, con alrededor de 5.772 patentes registradas. Al realizar un análisis de las últimas patentes registradas desde 1990 hasta la actualidad se obtiene 38 patentes registradas que engloban métodos de oxidación avanzada y 50 patentes relacionadas con tratamientos con membranas.



---

## 8 Características generales de aguas residuales industriales

---

## 8 Características generales de aguas residuales industriales.

La caracterización de las aguas residuales es muy compleja porque depende del tipo de industria. Normalmente, para cada industria específica es necesario un seguimiento analítico continuado con el fin de poder proponer la mejor línea de tratamiento que permita alcanzar los objetivos legales.

En este apartado se pretende resumir para cada tipo de industria los principales contaminantes presentes en sus aguas residuales. Además, para cada tipo de contaminante se propone sistemas de tratamiento que podrían eliminarlo o reducir su concentración hasta los valores aceptados por la normativa vigente.

A continuación, se expone los principales contaminantes inorgánico y los grupos de industria que podrían originarlos.

*Tabla 8.1. Contaminantes inorgánicos frente a su relevancia en diversas industrias (adaptado de Rodríguez et al., 2006)*

Componentes	Industrias
Arsénico y sus compuestos	Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (22%)
	Industria química inorgánica de base o fertilizantes (20%)
	Producción de cemento y materiales cerámicos (18%)
	Plantas de procesado de residuos peligrosos (10%)
Cadmio y sus compuestos	Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (66%)
	Cloruros Plantas de combustión (40%)
	Industria química inorgánica de base o fertilizantes (30%)
	Industria Química Orgánica de base (20%)
Cromo y sus compuestos	Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (87%)
Cobre y sus compuestos	Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (23%)
	Industria química inorgánica de base o fertilizantes (18%)
	Industria Química Orgánica de base (12%)

Componentes	Industrias
	Plantas de combustión (12%)
	Cianuros Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (80%)
	Industria Química Orgánica de base (10%)
	Fluoruros Industria química inorgánica de base o fertilizantes (54%)
	Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (22%)
	Industria Química Orgánica de base (17%)
	Plomo y sus compuestos Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (40%)
	Industria química inorgánica de base o fertilizantes (15%)
	Industria Química Orgánica de base (12%)
	Refinerías de petróleo y gas (12%)
	Mercurio y sus compuestos
Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (18%)	
Industria Química Orgánica de base (14%)	
Níquel y sus compuestos	Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (44%)
	Industria química inorgánica de base o fertilizantes (13%)
	Industria Química Orgánica de base (13%)
Compuestos orgánicos de estaño	Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (86%)
	Fósforo Industria química inorgánica de base o fertilizantes (25%)
	Industria Química Orgánica de base (22%)
	Industria de la madera y papel (18%)
Zinc y sus compuestos	Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (33%)

Componentes	Industrias
	Industria Química Orgánica de base (23%)
	Industria química inorgánica de base o fertilizantes (16%)
	Industria de la madera y papel (11%)

Tras observar la tabla, algunos ejemplos de industrias que se pueden encontrar en Canarias son: la Industria de la madera y papel, las plantas de producción de cemento y materiales cerámicos, y refinerías de petróleo y gas. Al observar la tabla, se podría afirmar que, en las plantas de producción de cemento y materiales cerámicos, el 18% de la composición del efluente de aguas residuales está conformado de arsénico y sus compuestos. Para el caso de la industria de la madera y el papel, el 11% lo conforman zinc y sus compuestos y el 18% compuestos orgánicos de estaño.

La Tabla 8.2. resume los principales contaminantes orgánicos y los grupos de industria que podrían originarlos.

*Tabla 8.2 Contaminantes orgánicos frente a su relevancia en diversas industrias. (Fuente: Rodríguez et al.,2006)*

Componentes	Industrias
Benceno, tolueno, etilbenceno, y xilenos (BTEX)	Industria Química Orgánica de base (56%)
	Industrias del petróleo y del gas (17%)
	Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (11%)
	Cloroalcanos Industria química inorgánica de base o fertilizantes (100%)
Orgánicos halogenados (AOX)	Instalaciones para la producción de pasta de papel (86%)
Compuestos organoestánicos	Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (86%)
	Industria Química Orgánica de base (11%)
1,2,-Dicloroetano (DCE)	Productos químicos orgánicos de base (63%)
	Productos químicos inorgánicos de base o fertilizantes (36%)
Diclorometano (DCM)	Productos químicos orgánicos de base (48%)
	Industria farmacéutica (30%)

Componentes	Industrias
Bromuro de difeniléter	Instalaciones para pretratamiento de fibras o textiles (100%)
Dioxinas y furanos	Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (41%)
	Instalaciones de combustión (19%)
	Productos químicos orgánicos de base (17%)
	Instalaciones para eliminación de residuos peligrosos (15%)
	Fenoles Productos químicos orgánicos de base (47%)
	Refinerías de petróleo y de gas (23%)
Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (11%)	
Hexaclorobenceno (HCB) Hexaclorobutadieno (HCBd) Hexaclorciclohexano (HCH)	Productos químicos orgánicos de base (~90%)
Hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH)	Tratamiento de superficies con disolventes orgánicos (33%)
	Refinerías de petróleo y de gas (27%)
	Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (21%)
	Productos químicos orgánicos de base (13%)
Hidrofluorocarburos (HFC)	Productos químicos inorgánicos de base o fertilizantes (48%)
	Productos químicos orgánicos de base (41%)
Pentaclorofenol (PCP)	Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (100%)
	Perfluorocarburos (PFC) Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (82%)
Tetracloroetileno (PER)	Tratamiento de superficies con disolventes orgánicos (43%)
	Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (26%) Productos químicos orgánicos de base (12%)

Componentes	Industrias
	Productos químicos inorgánicos de base o fertilizantes (12%)
	Tetraclorometano (TCM) Productos químicos orgánicos de base (93%)
Triclorobencenos (TCB)	Productos químicos orgánicos de base (56%)
	Productos químicos inorgánicos de base o fertilizantes (44%)
	1,1,1-Tricloroetano (TCE) Productos químicos inorgánicos de base o fertilizantes (100%)
Tricloroetileno (TRI)	Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (32%)
	Productos químicos orgánicos de base (31%)
	Tratamiento de superficies con disolventes orgánicos (24%)
Triclorometano (Cloroformo)	Productos químicos orgánicos de base (43%)
	Productos químicos inorgánicos de base o fertilizantes (40%)
	Industria farmacéutica (15%)

De entre todas las industrias orgánicas mencionadas, las de mayor relevancia en canarias sería, las refinerías de petróleo y de gas. Las mismas están compuestas en un 17% de “Benceno, tolueno, etilbenceno, y xilenos (BTEX)”, en un 23% de dioxinas y furanos y en un 27% de Hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH).

A continuación, a modo de resumen se detallan las primeras líneas de eliminación de contaminantes en el tratamiento de aguas residuales.

*Tabla 8.3 Tratamientos propuestos para los contaminantes inorgánicos planteados.*

Compuesto	Técnica	Eficiencia de eliminación	Referencia
Arsénico y sus compuestos	Quitosano reticulado	Capacidad de absorción de 230 mg/g	Crini, 2005
	Nanocompuestos como micropartículas supermagnéticas que actúan como semillas	95-99 %	Mandel et al., 2013

Compuesto	Técnica	Eficiencia de eliminación	Referencia
	para precipitados de hidróxido de hierro.		
Cadmio y sus compuestos	Hidrogel funcionalizado con sulfhídrico	Capacidad de absorción de 17,7 mg/g	Hua y Li, 2014
	Hidrogel de celulosa preparada utilizando disolvente LIOH/urea	110 mg/g	Isobe et al., 2013
	Electrofluoculación	64,40%	Chenar et al., 2013
	Adsorción y desorción de Cd (II) con resina D001.	185,8 mg/g	Zhen et al., 2015
Cromo y sus compuestos	Vermiculitas y el efecto de su precipitación	100%	Hikmet et al., 2014
	Hidrogel funcionalizado con sulfridilo	5,2 mg/g	Hua y Li, 2014
	Sinergia de la fotocatalisis y de adsorción para la eliminación simultánea de Cr6+ y Cr3+ con el TiO2 y nanotubos de titanato.	98-99,7%	Wen et al., 2014
Cobre y sus compuestos	Quitosato reticulado	164 mg/g	Crini, 2005
	Hidrogel funcionalizado con sulfhídrico	9,3 mg/g	Hua y Li, 2014
	Separación de Cu de aguas ricas en fósforo por ultrafiltración micelar mejorada, membrana Amicon 8400 stirred cell, Millipore.	75%	Landaburu, et al., 2011

Compuesto	Técnica	Eficiencia de eliminación	Referencia
Mercurio y sus compuestos	Cenizas volantes silico-aluminoso y cenizas volantes-sulfo cálcico	53-81 %	Rio y Delebarre, 2003
	Ceniza volante de carbón	17%	Prasetyo y Zakki, 2013
	Precipitación con 1,3-benzenediamidoethanet hiolate	>99,9 %	Blue et al, 2008
	Nanocompuestos como microparticulas supermagnéticas que actuan como semillas para precipitados de hidróxido de hierro.	95-99%	Mandel et al., 2013
	Carbón activado producido a partir de piedras tunecinas.	16,12 mg/g	Bouhamed et al., 2015
	Proceso por separación de membrana	99,60%	Guerrero et al, 2006
Zinc y sus compuestos	Vermiculitas y el efecto de su precipitación	99,70%	Hikmet et al, 2014
	Hidrogel de celulosa preparada utilizando disolvente LIOH/urea	200 mg/g	Isobe et al., 2013
	Nanocompuestos como Micropartículas superparamagnéticas que actúan como semillas para precipitados de hidróxido de hierro.	95-99 %	Mandel et al., 2013

De entre las técnicas mencionadas, existen técnicas específicas de carácter innovador que no han sido explicadas con anterioridad, estas son:



- **Quitosano reticulado.** Es un biopolímero con gran capacidad de adsorción de metales pesados. Al pertenecer a este grupo, son capaces de reducir las concentraciones de iones metálicos de transición a concentraciones de partes por billón. Además de ser ampliamente disponibles y ambientalmente seguros.
- **Nanocompuestos como micropartículas supermagnéticas que actúan como semillas para precipitados de hidróxido de hierro.** Es un método potencialmente estable, que garantiza la remoción de metales pesados en aguas residuales.
- **Hidrogel funcionalizado con sulfhídrico e Hidrogel de celulosa preparada utilizando disolvente LIOH/urea.** Los hidrogeles son polímeros insolubles en el agua, pero con gran capacidad de adsorción y retención de la misma.
- **Electrofluoculación.** Conjunto de procesos que permiten la adsorción de sustancias al inyectar iones por los electrodos, que modifican el estado de equilibrio de estas, generando coágulos y floculos.
- **Vermiculitas.** Las vermiculitas son un material originado por la expansión de un mineral a altas temperaturas, formado por silicatos de hierro o magnesio, que tiene gran capacidad para retener el agua.
- **Cenizas volantes.** Son un subproducto industrial, altamente contaminante por ser enriquecido con elementos de traza potencialmente tóxica provenientes del gas de combustión. Pero, puede ser reutilizado como un adsorbente de bajo costo para la eliminación de compuestos orgánicos, gases de combustión y metales.

Seguidamente se exponen una serie de técnicas para la eliminación de contaminantes orgánicos específicos (Tabla 8.4).

*Tabla 8.4 Tratamientos propuestos para los contaminantes orgánicos planteados*

Compuesto	Técnica	Eficiencia eliminación	Referencia
Benceno, tolueno, etilbenceno, y xilenos (BTEX)	Adsorción por Zeolita	70-85 %	Hansen et al., 1994
	Nanofiltración $5 \cdot 10^{-3}$ - $5 \cdot 10^{-4} \mu\text{m}$	100%	Peng et al., 2004
Orgánicos halogenados (AOX)	Adsorción en carbón activo	90-95 %	Spellman, 2003
	Precipitación química	90-99%	Spellman, 2003

Compuesto	Técnica	Eficiencia eliminación	Referencia
Bromuro de difeniléter	Lodo anaeróbico		Yang-hsin, 2012
Hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH)	Lodo activado convencional	95%	Bolzonella, 2010
	Biorreactor de membrana	95%	Bolzonella, 2010
Pentaclorofenol (PCP)	Lodo activado convencional	<0,05µg/L	Bolzonella, 2010
	Biorreactor de membrana	<0,05µg/L	Bolzonella, 2010

En el caso de necesitar hacer un ajuste del pH se deberá dosificar químicos que permitan mantenerlo en los valores deseados. Un ejemplo podría ser la dosificación de dióxido de carbono, ácido sulfúrico o sosa, técnica que garantiza la regulación del pH de forma simple y precisa.

En lo referente a la eliminación de materia carbonosa, medida como DQO y DBO<sub>5</sub>, las técnicas más comúnmente utilizadas son la degradación biológica, como ya se indicó en el apartado de tecnologías convencionales. En el caso de necesitar eliminar sólidos suspendidos totales, es necesario la implantación de tecnologías de sedimentación o filtración. Para la reducción de aceites y grasas, la flotación, el tamizado o la coagulación-floculación, la electrólisis, la precipitación o la decantación son a menudo unas buenas alternativas.

---

## 9 Análisis del Sector Industrial en la provincia de Santa Cruz de Tenerife

---

## 9 Análisis del Sector Industrial en la provincia de Santa Cruz de Tenerife.

A continuación, se muestra en la Tabla 9.1, la relación de empresas existentes en la isla y distribuidas por sectores. Esta tabla se ha elaborado gracias a la información consultada en la página del Gobierno de Canarias, el listado reflejado a continuación se encuentra registrado en ASINCA (Asociación industrial de Canarias).

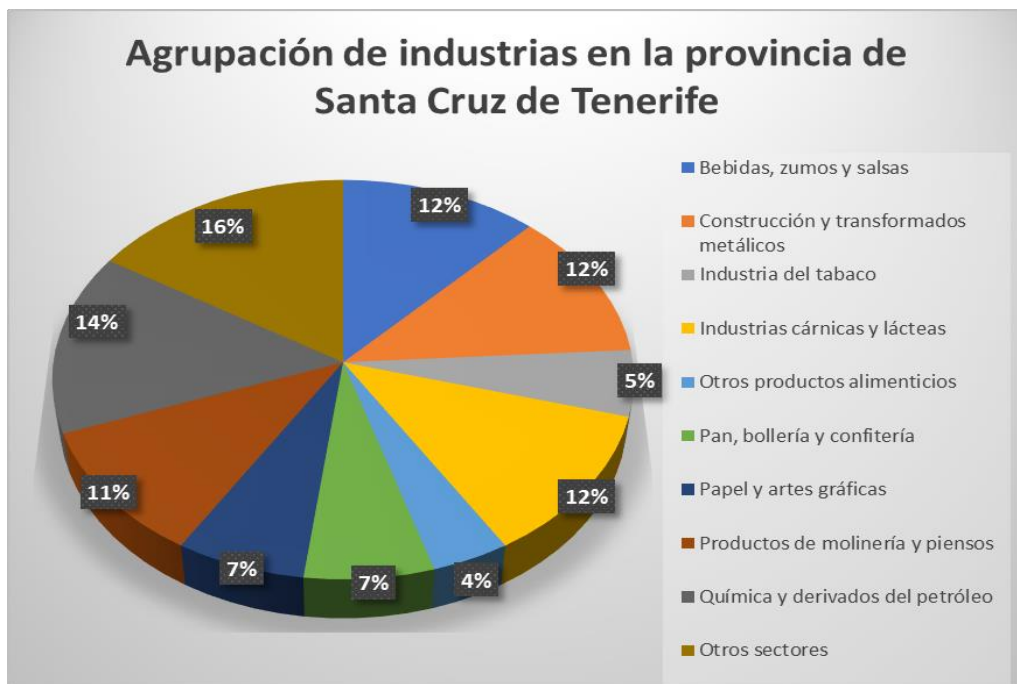
*Tabla 9.1 Distribución de industrias en la isla de Tenerife.*

Sector	Empresas
Bebidas, zumos y salsas	Aguaria water S. L.
	Aguas de Villaflor, S. A.
	Aguas del valle de la Orotava S. L.
	Cervezas reina 2000 S. A. U.
	CIA. cervecera de canarias, S. A.
	Coca-Cola european partners iberia, S. L. U.
	Destilerías San Bartolomé de Tejina, S. A.
	Establecimientos industriales archipiélago, S. A.
	Viticultura san juan S. L. U.
Construcción y transformados metálicos	Alucansa
	Alumiglass 7 islas, S. L.
	Aluminios cortizo canarias, S. L.
	Aluservis, S. L.
	Cementos cosmos, S. A
	Cementos de granadilla, S. L.
	Grasaica, S. L.
	Puma morcem, S.L.
	Rocas canarias, S. A.
Industria del tabaco	JTI international canarias, S. A.
	Tabacos del guajiro, S. A.
	Tabacos elaborados, S. A.
	Tobacco revolutions, S. L.
INDUSTRIAS CÁRNICAS Y LÁCTEAS	Celgan
	Explotaciones ganaderas de Tenerife S. A. U.
	Jltesa-Danone
	Jose Sánchez Peñate, S.A.
	Marilitu, S. A. U.
	Montesano canarias, S. A.
	Scheriber canarias, S. L.

Sector	Empresas
	Tecali, S. L.
	Toledo impormit, S.L.
OTROS PRODUCTOS ALIMENTICIOS	Cafés Careca, S. L.
	Distribuciones jualex, S. L.
	La Gaviota alimentación, S. L.
PAN, BOLLERÍA Y CONFITERÍA	Atlantic pan, S. L.
	Bimbo donuts canarias, S. L. U.
	El masape de la gomera, S. L.
	Fesilman, S. L. U.
	Panadería los compadres, S. L.
PAPEL Y ARTES GRÁFICAS	United confectionary S. L.
	Cartonajes unión, S. L. U.
	KlingeLe embalajes canarias, S. A.
	Litografía A. Romero, S. A.
	Martínez Cano Canarias, S. A.
PRODUCTOS DE MOLINERÍA Y PIENSOS	Productos tinerfeños, S. A.
	Almacenes la estrella, S. L.
	Cargri, S. L.
	Cereales archipiélago, S.A.
	Compañía de transformados canarios de alimentación, S. L.
	Graneros de Tenerife
	Harinalia canarias S. L.
	Harinas de pelegrin, S. L.
QUÍMICAS Y DERIVADOS DEL PETRÓLEO	Adom
	Al air liquide España, S. A.
	Biomca química, S. L.
	C.E.P.S.A.
	Canary oil, S. L.
	Canaryceras, S. A.
	Canplastica, S. A.
	CP5, S. A.
	Disa Tenerife, S. L.
	Plásticos Goldberg, S. L.
	Unión química canaria, S. A.
OTROS SECTORES	Desguaces Tenerife, S. A.
	E-WASTE Canarias S.L.
	Ecología Canaria, S. A.
	Essilor España, S. A.

Sector	Empresas
	Gorona del viento el hierro, S. A.
	Guayarmina textil, S. L.
	Indutespo industrial, S. A.
	Laboratorios kosei, S. L.
	Lanzateide comercial, S. A.
	Marrero cristaleros e instalaciones, S. L.
	Procesos integrales conaire sistemas, S. L.
	Productos naturales de canarias, S.L.

Según los resultados de la Asociación industrial de Canarias existen en la provincia de Santa Cruz de Tenerife existe un total de 75 industrias. La Gráfica 9.1 representa la cantidad de industrias agrupadas en sectores económicos.



Gráfica 9.1 Cantidad de industrias en la provincia de Santa Cruz de Tenerife.  
(Fuente:Elaboración propia)

Al observar el gráfico, se puede apreciar como la agrupación de industrias que abarca un porcentaje más representativo es la industria agroalimentaria, esta engloba las industrias de bebidas, zumos y salsas, las industrias cárnicas y lácteas, pan, bollería y confitería, productos de molinería y piensos y otros productos alimenticios, todo ello engloba un 47 % del total de industrias de la provincia.

En lo referente a la distribución geográfica, en la Ilustración 9.1 se puede observar la forma en la que se agrupan las industrias de la provincia de Santa Cruz de Tenerife.



Ilustración 9.1 Distribución geográfica de las industrias en la provincia de Santa Cruz de Tenerife.

Existen 3 grandes núcleos de agrupaciones de industrias en la provincia de Santa Cruz de Tenerife, (Güímar-Arafo, La Laguna y Santa Cruz de Tenerife), este dato resulta coherente, puesto que coincide con el polígono industrial de Valle de Güímar, las industrias de gran tamaño localizadas en la capital de la isla y algunos, las industrias de gran tamaño localizadas en la capital de la isla y algunos polígonos y empresas de gran importancia en el municipio de San Cristóbal de La Laguna.

En lo referente a las demás islas, las industrias existentes son muy pocas, siendo solo relevantes según esta fuente de búsqueda: INTEC SOLUCIONES INDUSTRIALES S. L., en el municipio del Paso (La Palma); GORONA DEL VIENTO EL HIERRO S. A., en el municipio de Valverde (El Hierro) y EL MASAPE DE LA GOMERA S. L., en el municipio de Vallehermoso (La Gomera).

---

## 10 Caracterización de las aguas residuales de industrias agroalimentarias

---



## 10 Caracterización de las aguas residuales de industrias agroalimentarias.

A continuación, se destacarán las principales características de la industria láctea, cárnica y de elaboración de zumos.

### 10.1 Industria láctea

Las aguas residuales provenientes de una empresa láctea se pueden clasificar en función de dos focos de generación: procesos y limpieza, y refrigeración.

- **Aguas de Limpieza y Proceso:** El agua residual es generada de la limpieza de superficies, tuberías, tanques, equipos. Son aguas que se caracterizan por tener pH extremos, alto contenido orgánico (DBO y DQO), aceites y grasas y sólidos en suspensión. Los volúmenes producidos van de 0,8 a 1,5 litros de agua residual por cada litro de leche procesada.
- **Aguas de Refrigeración:** El agua que proviene de las torres de refrigeración, condensados, etc., experimentan variaciones de temperatura y conductividad. Se estima un volumen entre 2 y 4 litros por cada litro de leche procesada.

Las características generales de este tipo de aguas se engloban en la Tabla 10.1:

*Tabla 10.1. Características del agua procedente de la industria láctea.*

PARÁMETROS	VALORES MEDIOS	VALORES MÁXIMOS
pH	6	11
DQO (mg/L)	1600	6000
DBO5 (mg/L)	1885	4800
Sólidos en suspensión (mg/L)	1500	5700
Aceites y grasas (mg/L)	209	500

### 10.2 Industria cárnica

En lo que respecta a la industria cárnica, la sangre es el principal contaminante, aportando una gran cantidad de demanda bioquímica de oxígeno y una elevada cantidad de nitrógeno.

Las principales fuentes de contaminación son en los procesos de evisceración y desangrado, estos aportan gran cantidad de la carga orgánica, puesto que el efluente contiene pelos, grasas, estiércol, huesos, sangre y proteínas.

Las características generales de este tipo de aguas se engloban en la siguiente tabla:

*Tabla 10.2. Características del agua residual procedente de la industria cárnica. (Fuente: Mendoza, 2005)*

PARÁMETROS	VALORES MEDIOS	VALORES MÁXIMOS
pH	6-6,5	8-8,5
DQO (mg/L)	3.500	12.000
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	1.200	7.000
Sólidos en suspensión (mg/L)	700	3.000
*NTK (mg/L)	300	6.000
Aceites y grasas (mg/L)	500	1.500

\*NTK: Nitrógeno Total, por el método Kjeldal

### 10.3 Industria elaboración de zumos

En la industria encargada de la elaboración de zumos, el agua residual se origina principalmente en cuatro procedimientos:

- **Eliminación de partes.** Con frecuencia el agua es empleada después de un corte o troceado para transportar el producto, eliminar posibles restos o para un posible lavado. El agua residual en este punto posee una alta carga orgánica, así como materia en suspensión.
- **Extracción.** Operación para la cual se emplea muy poca cantidad de agua, con lo cual, esta adquiere una DBO muy elevada.
- **Pasteurización.** El agua en este punto es empleada durante las operaciones de tratamiento térmico y enfriamiento, por lo que solo existirá vertido en el caso de que la industria no cuente con sistemas de recuperación de vertido y el mismo se caracterizará por tener una temperatura elevada.
- **Concentración.** En este punto el vertido del agua residual dependerá de la tecnología utilizada (Llaneza, 2012).

*Tabla 10.3. Características del agua residual procedente de la industria de zumos. (Fuente. Llaneza, 2012)*

PARÁMETROS	VALORES
pH	4,5-7
DQO (mg/L)	5.500
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	2.500
Sólidos en suspensión (mg/L)	440
N <sub>tot</sub> (mg/L)	26,5
P <sub>tot</sub> (mg/L)	21

### Caracterización general de la industria agroalimentaria

A nivel general, tras analizar los tres tipos de industrias previamente caracterizadas se puede llegar a la conclusión de una tendencia en las características. Presentan alta carga orgánica (valores para DQO y DBO<sub>5</sub> superiores a 1.200 mg/L), un pH variable que será preciso ajustar, así como la necesidad de eliminar nitrógeno y fósforo disueltos, y las grasas y los aceites y grasas en suspensión (para el caso de la industria láctea y cárnica, principalmente). Para poder plantear una red de tratamiento que permita ajustarse a la normativa, es preciso analizar si el agua a tratar es biodegradable.

Para ello se ha de estudiar la relación entre la DBO<sub>5</sub> y la DQO. Siendo posibles los siguientes casos:

- Agua biodegradable, pudiendo utilizar en ella sistemas biológicos como fangos activados o lechos bacterianos.

$$(DQO/DBO_5) < 2,5$$

- Agua biodegradable, siendo recomendable el empleo de lechos bacterianos.

$$2,5 < (DQO/DBO_5) < 5$$

Para el caso de estudio, y particularizando para los valores máximos de la industria láctea:

$$(DQO/DBO_5) = (6.000/4.800) = 1,25$$

En el caso de los valores máximos de la industria cárnica:

$$(DQO/DBO_5) = (12.000/7.000) = 1,71$$

En el caso de los valores máximos de la industria de zumos:

$$(DQO/DBO_5) = (5.500/2.500) = 2,2$$

Como se pudo observar, el agua de estudio para los tres casos es un agua biodegradable. Por eso motivo se procederá a plantear una línea de tratamiento general, con ciertos matices para cada una de ellas.

---

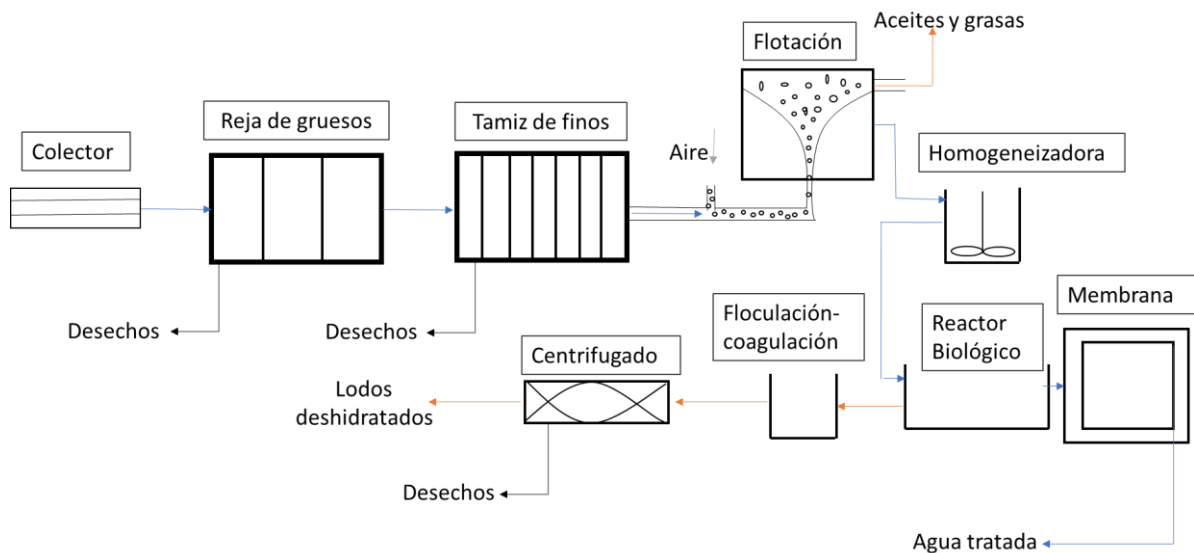
# 11 Opciones de tratamiento de un agua residual industrial procedente de una industria agroalimentaria

---

# 11 Opciones de tratamiento de un agua residual industrial procedente de una industria agroalimentaria.

## 11.1 Tratamiento propuesto para la regeneración del agua residual.

En este apartado se propondrá un esquema para la adecuada regeneración del agua residual. Es decir, el planteamiento de un tratamiento con la finalidad de verter directamente a un medio hídrico.



*Ilustración 11.1 Opción A de tratamiento. (Fuente: Elaboración propia)*

En primer lugar, el agua residual fluye a través de una reja de gruesos y por un tamiz de finos, con el objetivo de eliminar los sólidos en suspensión. Estos elementos serán esenciales para proteger los siguientes aparatos. Primero se ha concebido, el empleo de unas rejas de gruesos para restringir el paso de sólidos de gran tamaño que podrían presentarse en ciertos mataderos. Para el caso de una industria de zumos o similar se considerará prescindible. Sin embargo, el tamiz de finos es de tipo imprescindible para cualquier industria, garantizando con él la eliminación de sólidos de un tamaño inferior, como podrían ser en el caso de la industria de zumos, restos de fruta del proceso de limpieza, para la industria cárnica posibles vísceras de un tamaño inferior, y para el caso de la industria láctea, restos de pequeños elementos del proceso de limpieza.

Seguidamente, tiene lugar la flotación por aire inducido. En el que se separa el agua del líquido inmiscible contenido (aceites y grasas), sustancias problemáticas principalmente en la industria cárnica y láctea. La generación de burbujas se realiza a través de difusores de aire situados en la parte inferior del equipo de flotación; gracias a la acción de estas los aceites y las grasas son arrastradas y eliminadas del sistema. Las grasas obtenidas como residuo son depositadas en contenedores especiales de grasas para posteriormente ser trasladadas al vertedero. Es preferible utilizar este proceso ante decantador por el reducido espacio que ocupa.

El homogeneizador permite ajustar el pH, tan variable en todas las industrias agroalimentarias. En este punto, el agua es retenida durante (16-24) horas en una balsa de homogeneización para evitar puntas de caudal y de carga contaminante. Esta homogeneización del agua facilita la operación y dosificación de las siguientes etapas de depuración” (López , 2015). El tamaño del homogeneizador dependerá notablemente del espacio disponible en cada una de las industrias.

A continuación, el agua es introducida en el reactor biológico anaerobio, donde se produce el crecimiento de la población bacteriana. Debido a la alta carga orgánica de este tipo de aguas, es preferible emplear reactores en ausencia de oxígeno, principalmente porque una alta carga orgánica a tratar implica grandes aportaciones de oxígeno, requiriendo de mecanismos de control, lo cual encarecería el proceso. A la salida del reactor, en lugar de pasar por un clarificador, como se había indicado en el apartado de “tecnologías convencionales”, se ha planteado el empleo de membranas de filtración de fibra hueca, ya que garantiza un efluente de excelente calidad. Se sugiere que las membranas se sitúen sobre difusores para que las burbujas de aire arrastren la suciedad producida por la deposición de sólidos, gracias a la agitación que se crea (López ,2015).

La combinación del proceso de degradación biológica y la separación sólida/ líquido mediante filtración de membrana atiende al nombre de biorreactor de membrana (MBR). En el circuito planteado se ha elegido un reactor de membrana de circuito no integrado, prolongando así la vida útil de la membrana y facilitando su limpieza y mantenimiento.

El tratamiento anaerobio, además producirá biogás que podrá ser empleado en la misma industria para la producción de energía o agua caliente mejorando el rendimiento energético de la instalación.

La suma de los efectos producidos por la degradación biológica y la filtración hacen superar en muchos casos porcentajes de depuración del 99 % en eliminación de DBO<sub>5</sub> y 95 % de eliminación de la DQO (López, 2015).

Por otro lado, tiene lugar un proceso fisicoquímico de floculación-coagulación, en el que se tienden a formar flóculos y de esta forma reducir el agua de los lodos. El coagulante sugerido para su utilización es el cloruro de aluminio.

Finalmente pasan por un sistema de centrifugado, para poder enviarlos al vertedero, pues se exige que estén deshidratados con un porcentaje mínimo de sequedad, mayor al 20%, según la normativa.

*Tabla 11.1 Porcentaje de eliminación de un sistema de MBR no integrado. (Fuente: López, 2015).*

Proceso	Eliminación (%)			
	DBO	DQO	SS	Color
<b>MBR no integrado</b>	95-99	90-97	>99	80-98

Gracias al elevado porcentaje de eliminación del procedimiento empleado, se garantiza cumplir la normativa de vertidos, para cualquier tipo de industria agroalimentaria y, además permite que sea vertida a cualquier punto sensible directamente sin ningún problema.

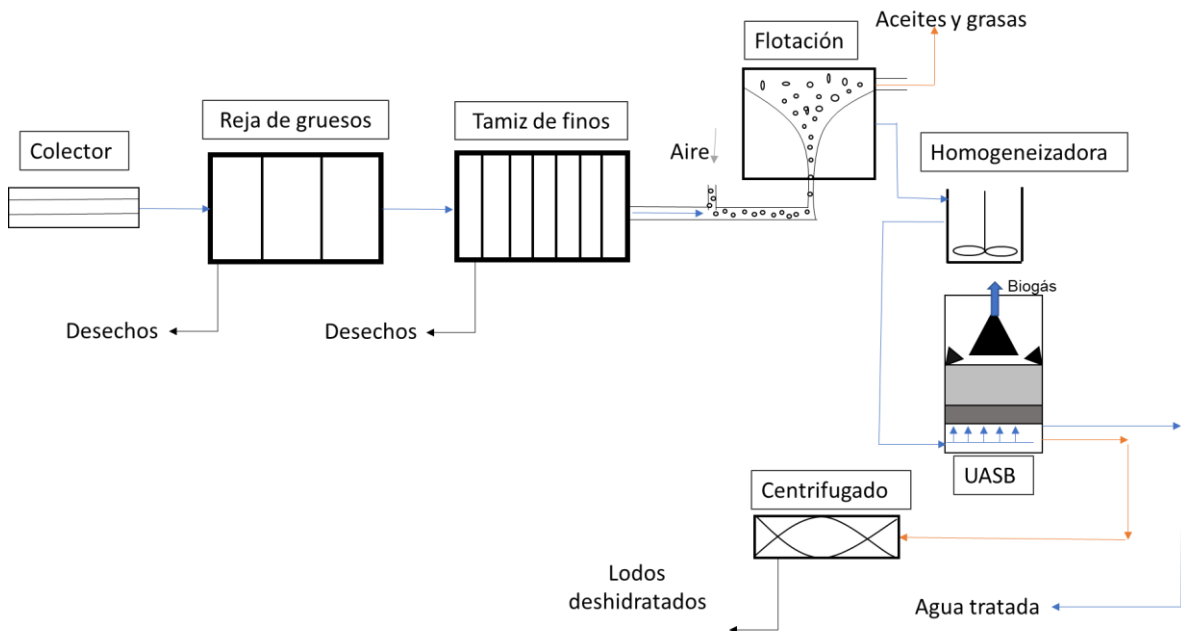
## **11.2 Tratamiento propuesto para verter a la red de saneamiento**

Normalmente el uso de sistemas de tratamiento de regeneración de aguas residuales implica el uso de tecnologías que requieren un elevado coste de instalación como son los MBR (Verrecht, 2010). Esta situación provoca que el sector industrial implante sistemas que permitan alcanzar los rendimientos de depuración exigidos para verter a la red de saneamiento. En este apartado se propone una opción de tratamiento que permitirá reducir la carga contaminante de industrias agroalimentarias para verter a la red de saneamiento acorde a la normativa vigente en Canarias.

A diferencia del planteamiento anterior, en este caso se ha decidido emplear un reactor UASB, seguido de un sistema de decantación. Estos reactores son especialmente positivos para tratamientos industriales con una concentración de materia orgánica alta. El mecanismo de funcionamiento fue explicado en el apartado de tratamientos biológicos de este TFG. Se ha tomado la decisión de seleccionar este mecanismo por ser un sistema compacto, con un bajo costo de operación, que requieren de poca superficie para tratar niveles de eliminación de DBO<sub>5</sub>/DQO superiores al 80%. Presenta una elevada concentración de lodo excedente, por lo que no será preciso el empleo de una unidad de espesamiento de lodo y genera biogás que podría ser reaprovechado en la misma planta. Los UASB además son adecuados para regiones cuyos climas son cálidos a lo largo del

año, con temperaturas mínimas de 18-20 °C, lo que lo hace idóneo para ser implantado en una región como Canarias.

La Ilustración 12.2. muestra un diagrama de flujos de la opción de tratamiento seleccionada en el caso de querer hacer el vertido a la red de saneamiento.



*Ilustración 11.2. Opción de tratamiento B. (Fuente: Elaboración propia)*

Finalmente, el lodo, una vez decantado, se hace pasar por un sistema de centrifugado, en el que reducirá su porcentaje de humedad y seguidamente será llevado al punto insular de recogida de residuos más cercano. Mientras que el efluente de agua residual será conducido hacia la red de saneamiento municipal.



---

## 12 Conclusiones

---

## 12 Conclusiones

- Existe una extensa normativa sobre el tratamiento de aguas residuales tanto a nivel comunitario, como nacional o autonómico. En general, se establecen unas concentraciones límite de vertido para un número elevado de contaminantes orgánicos e inorgánicos. Además, cada organismo regulador puede indicar unas especificaciones adicionales para cada industria.
- La revisión de las tecnologías aplicadas al tratamiento de aguas residuales industriales muestra un uso generalizado de los tratamientos convencionales (físicos, químicos y biológicos) y una aplicación específica de tratamientos avanzados según la tipología de contaminantes para cada industria. Los tratamientos avanzados más utilizados son la oxidación química y los tratamientos con membranas.
- Al analizar las patentes existentes, se ha encontrado un importante desarrollo tecnológico en España, con numerosas patentes asociadas a los métodos avanzados.
- Tras inventariar las principales industrias en la isla de Tenerife, se han encontrado, como era de esperar, grandes núcleos asociados a los polígonos industriales. La mayor parte de las industrias pertenecen al sector agroalimentario (47%), que engloba las industrias de bebidas, zumos y salsas, las industrias cárnicas y lácteas, pan, bollería y confitería, productos de molinería y piensos y otros productos alimenticios. En lo referente a las demás islas de la provincia, cuentan con un número de industrias muy reducido.
- Las aguas residuales de las industrias agroalimentarias presentan como característica general un pH muy variable, una elevada carga orgánica y cantidades de nitrógeno y fósforo que precisarán de un tratamiento, así como contenido en aceites y grasas. Todas estas características condicionan el proceso de tratamiento.
- En lo que refiere a las opciones de tratamiento para efluentes procedentes de industrias agroalimentarias, tras analizar la posibilidad de verter directamente a un punto sensible y otro en el que el agua tratada a su salida sea conducida a otra red de tratamientos, se ha comprobado que la segunda opción ha resultado más viable. Se propone un esquema de tratamiento basado en los siguientes procesos: tamizado, flotación, homogenización, tratamiento anaerobio (UASB) y centrifugado del lodo.

---

## 13 Conclusions

---

## 13 Conclusions

- There are many rules on wastewater treatment both at the community, national or regional level. In general, discharge limit concentrations are established for a high number of organic and inorganic pollutants. In addition, each regulatory body can indicate additional specifications for each industry.
- The review of the technologies applied to the treatment of industrial wastewater shows a generalized use of conventional treatments (physical, chemical and biological) and a specific application of advanced treatments according to the type of pollutants for each industry. The most widely used advanced treatments are chemical oxidation and membrane treatments.
- When analyzing existing patents, an important technological development has been found in Spain, with numerous patents and advanced methods.
- After taking an inventory of the main industries on the island of Tenerife, they have found, as large centers associated with industrial estates. Most of the industries belong to the agri-food sector (47%), which includes the beverage, juice and sauce industries, the meat and dairy industries, bread, pastries and confectionery, milling products and animal feed and other food products. Regarding the other islands of the province, they have a very small number of industries.
- Wastewater from agri-food industries has as a general characteristic a highly variable pH, a high organic load and amounts of nitrogen and phosphorus that will require treatment, as well as a content of oils and fats. All these characteristics condition the treatment process.
- Regarding the treatment options for effluents from agri-food industries, after analyzing the possibility of directly discharging to a sensitive point and another in which the treated water at its outlet is led to another treatment network, it has been verified that the second option has been more viable. A treatment scheme based on the following processes is proposed: sieving, flotation, homogenization, anaerobic treatment (UASB) and centrifugation of the sludge.

---

## 14 Bibliografía

---

## 14 Bibliografía

- Arnaiz C., Isac L., Lebrato J. Tratamiento biológico de aguas residuales. *Tecnología del agua*, [Online]. **1980**, 20,22-26
- Aznar Jiménez D. A. Tratamientos secundarios. URL: <http://ocw.uc3m.es/ingenieria-quimica/environmental-engineering/material-clase/MC-F-215.pdf>. (Accessed, June, 2020).
- Barrera-Díaz, C.; Ureña, F.; Campos, E.; Palomar, M.; Romero, M. A combined electrochemical irradiation treatment of highly colored and polluted industrial wastewater. *Radiation Physics and Chemistry*. [Online]. **2003**, Volume 67, Issue 5. Pages 657-663.
- Beltrán F.J., González M., Rivas J. y Marín M., *Ind. Eng. Chem.* **1884**. Res., 33, 125-136.
- Benito J.M. Conesa, A., Rodríguez M.A. Membranas cerámicas. Tipos, métodos de obtención y caracterización. Instituto de Cerámica y Vidrio (CSIC), 28049 Cantoblanco, Madrid. **2004** Bol. Soc. Esp. Ceram. V., 43 [5] 829-842.
- Bes Monge S., Silva A. M.T., Bengoa C. Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados al tratamiento de aguas residuales industriales. ISBN: 978-84-09-08637-5. Tarragona. 2018.
- Bigda, R.J. Consider Fenton's Chemistry for Wastewater Treatment. *Chemical Engineering Progress*, [Online]. (1995) 91, 62-66.
- Blue, L., Van Aelstyn, M.A., Matlock, M., Atwood, D; Low-level mercury removal from groundwater using a synthetic chelating ligand. *Water Residual.*, [Online]. **2008**. 42, 2025-2028.
- Bouhamed, F; Elouear, Z; Bouzid, J; Ouddane, B. Multi-component adsorption of copper, nickel and zinc from aqueous solutions onto activated carbon prepared from date stones. *International Conference on Integrated Management of the Environment - ICIME 2014*. Environmental Science Pollution. 2015
- Brillas E., Mur E., Sauleda R., Sanchez L., Peral J., Domènech X., Casado J. Aniline mineralization by AOP's: anodic oxidation, photocatalysis, electro-Fenton and photoelectro-Fenton processes. *Applied Catalysis B: Environmental*. 3 **1998**. Cap 16, 31-42.
- Bruni M. y Spuhler D. Gestión del agua y tratamiento sostenible. URL: <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de-agua-y-saneamiento/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/filtraci%C3%B3n-r%C3%A1pida-de-arena>. (Accessed, August, 2020).

Cánepa de Vargas L. Filtración lenta como proceso de desinfección. URL: <http://www.elaguapotable.com>. (Accessed June, 30, 2020).

Cánepa de Vargas, L. Tratamiento de aguas para consumo humano. Capítulo 6. Floculación. Lima, Perú. Pág 265-281.

Cañizares, P.; Paz, R.; Lobato, J.; Saéz, C.; Rodrigo, M.A. Electrochemical treatment of the effluent of a fine chemical manufacturing plant. *Journal of Hazardous Materials*. URL: [https://www.researchgate.net/publication/6977392\\_Electrochemical\\_treatment\\_of\\_the\\_effluent\\_of\\_a\\_fine\\_chemical\\_manufacturing\\_plant](https://www.researchgate.net/publication/6977392_Electrochemical_treatment_of_the_effluent_of_a_fine_chemical_manufacturing_plant). (Accessed June, 20, 2020).

Chenar, S; Karbassi, A; Zaker, N; Ghazban, F; Electroflocculation of Metals during Estuarine Mixing (Caspian Sea). *Department of Environment, University of Tehran*, **2013**. p. 17.

Configuración de adsorbentes en carbón activo granular. URL: <https://www.textoscientificos.com/quimica/carbon-activo/adsorbentes-carbon-activado-granular>. (Accessed, August 2020).

Crini, G. Recent developments in polysaccharide-based materials used as adsorbents in wastewater treatment. *Progress in Polymers Science*. **2005**. 30, 38-70.

Cyclus. Depuración Industrial. URL: <https://www.cyclusid.com/tecnologias-aguas-residuales/tratamiento-aguas/tratamiento-primario/> (Accessed June, 12, 2020).

Depuradora de aguas residuales en sacas filtrantes. URL: <http://www.inmasa.net/depuracion-de-aguas>. (Accessed September, 2020).

Domenech, X. Wilson, F. Jardim, W., & Litter, M. Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes. M.A. Blesa & B Sánchez (editores), January 2004.

ECMA Fabricaciones estructurales. URL: <https://ecma.com.mx/producto/reja-manual/> (Accessed September, 2020).

El agua potable. URL: [http://www.elaguapotable.com/tratamiento\\_de\\_lodos.htm](http://www.elaguapotable.com/tratamiento_de_lodos.htm). (Accessed September 2020).

Espacenet. Oficina Europea de Patentes. URL: <https://worldwide.espacenet.com/>. (Accessed, June, 2020).

Espinosa Renzo, D. C. Tratamientos de aguas residuales mediante carbón activo. URL: <https://es.slideshare.net/renzodaviddelacruz/carbn-activado-45867315>. (Accessed July 2020).

European Environment Agency. URL: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/use-of-freshwater-resources-3/assessment-4>. (accessed september, 3, 2020).

Evitech, Condorchem. Resinas de intercambio iónico. URL: <https://condorchem.com/es/resinas-intercambio-ionico/>.(Accessed June, 2020).

Ferrer Polo J., Seco Torrecillas A., Robles Martínez A. Tratamientos Biológicos de aguas residuales. Universitat politecnica de Valencia. Valencia, 2018.

Fenton H.J.J. Oxidation of tartaric acid in presence of iron. *Journal of the Chemical Society, Transactions.*, [Online]. **1894**, Volume 65,

GEDAR – Tratamiento de Aguas. URL: <https://www.gedar.com/residuales/daf-flotacion-aire-disuelto.htm>.(Accessed September, 2020).

Gestión de agua y saneamiento sostenible. Filtración lenta de arena. URL: <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de-agua-y-saneamiento/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/filtraci%C3%B3n-lenta-de-arena>. (Accessed September, 2020).

Guerrero, J; Hernández, J; Pérez, R; Estudio preliminar del tratamiento del residual líquido (wl) de la empresa “comandante pedro sotto alba” moa nickel s.a. mediante el proceso de separación por membranas Tecnología Química. **2006**. 26 (2),83-93.

Grupo TAR. Manual del Carbón Activo. URL: <http://www.elaguapotable.com/Manual%20del%20carb%C3%B3n%20activo.pdf> (Accessed, June, 2020).

Hikmet, S; Turan, U; Removal of heavy metal ions from aqueous medium using kuluncak (Malatya) vermiculites and effect of precipitation on removal. *Applied Clay Science*. **2014**. 95, 1-8.

Hua, R; Li, Z; Sulfhydryl functionalized hydrogel with magnetism: Synthesis, characterization, and adsorption behavior study for heavy metal removal. *Chemical Engineering Journal.*, [Online]. **2014**. 249, 189-200.

Huang C.P., Dong Ch. y Tang Z. Advanced chemical oxidation: Its present role and potential future in hazardous waste treatment. *Waste Management* , [Online]. **1993**, Volume 13, 361-377.

IDIM Ingeniería de medios del Pirineo. Tamiz de finos de papel filtrante. URL: <http://www.idm-pirineo.es/IDM/Esp/MA/tamiz-estatico.php>. (Accessed September, 2020).



Iglesia Granadillas, J. Fundamentos lodos activos y tipos de reactores. Creative Commons Reconocimiento, Nocomercial, Compartirigual. 2016.

Instituto Nacional de Estadísticas. URL: <https://www.ine.es/dynt3/inebase/index.htm?type=pcaxis&path=/t26/p067/p01/serie&file=pcaxis&L=0>. ((Accessed August, 30, 2020).

Isobe, N; Chen, X; Kim, U; Kimura, S; Wada, M; Saito, T; Isogai, A. TEMPO-oxidized cellulose hydrogel as a high-capacity and reusable heavy metal ion adsorbent, *Journal of Hazardous Materials*, [Online]. **2013**.260, 195-201.

Jácome Burgos A. Reactores de lecho fluidizado. FT-BIO-007. September 2014.

Bolzonella D., Fatone F., di Fabio S., Cecchi F. Journal of environmental. Department of Biotechnology, University of Verona, Italy.19 July 2010. 91, 2424–2431

Khemis, M.; Leclerc, J.P.; Tanguy, G.; Valentin, G. y Lapicque, F. Chemical Engineering Science, ,2006

Kiraly. Coagulantes, Floculantes, y Agentes deshidratantes de lodos.URL: <https://www.google.com/url?sa=i&url=http%3A%2F%2Fkiralyquinteroaguas.blogspot.com>. (Accessed July, 15, 2020).

Landaburu, J; Pongrácz, E; Keiski, R; Separation of cadmium and copper from phosphorous rich synthetic waters by micellar-enhanced ultrafiltration, *Separation and Purification Technology*, [Online]. **2011**. 81, 41-48.

Legrini, O., Oliveros E. y Braun A.M. Photochemical Processes for Water Treatment. *Chem. Rev.* **1993**, 93, 671-698.

Lenntech. Adsorción / Carbón activo.URL: <https://www.lenntech.es/adsorcion-carbon-activado.htm>. (Accessed July, 2020).

Llaneza González, A. Tratamientos de aguas residuales en la industria del zumo de manzana. Thesis. [Online]. Universidad de Oviedo. Junio, 2012.

Lluís Domene F. Diseño y construcción de un reactor con biomasa soportada. Thesis. [Online]. Universitat Politècnica de València. Valencia, 10 de diciembre de 2008.

López Grimau V. , Crespi Rosell M. Gestión de los efluentes de la industria textil. Cuaderno tecnológico nº18. Instituto de Investigación Textil y Cooperación Industrial de la Universidad Politécnica de Cataluña. Septiembre de 2015

Mandel, k; Hutter, F; Gellermann, C; SEXTL, G;. Reusable superparamagnetic nanocomposite particles for magnetic separation of iron hydroxide precipitates to remove and recover heavy metal ions from aqueous solutions, *Separation and Purification Technology*. 2013. 109, 144-147.

Muñoz Couto R., *Uso de humedales para el tratamiento de aguas residuales municipales en el entorno de la Laguna de Tamiahua, Veracruz*. Thesis. [Online]. Cholula, Puebla, México a 14 de mayo de 2009.

Muñoz, J. M. Componentes de los sistemas convencionales de depuración de aguas residuales. URL: <https://www.fundacionglobalnature.org/macrophytes/documentacion/>. (Accesed april, 20, 2020)

Muñoz Paredes J. F., Ramos Ramos M. Reactores discontinuos secuenciales: una tecnología versátil en el tratamiento de aguas residuales. *Cienc. Ing. Neogranad. Bogotá*. **June 2014**, vol.24 no.1

Nuevo, D. Tecpa. URL: <https://www.tecpa.es/la-deshidratacion-de-fangos/>. (Accessed June, 20, 2020).

Peng, H., Volchek, K., Mackinnon, M., Wong, W., Brown, C., Application on to nanofiltration to water management options for oil sands operation. *Desalination.*, [Online]. **2004**. 170, 137-150.

Procesos de depuración. URL: <https://sites.google.com/site/ptaruniminuto/procesos-de-depuracion>. (Accessed June, 23,2020).

Prasetyo, E. Zakki, M; Removal of Hg and Pb in Aqueous Solution Using Coal Fly Ash Adsorbent. *Procedia Earth and Planetary Science.*, [Online]. **2013**. 6, 377-382.

Química medioambiental. URL: [http://quimicamedioamb.blogspot.com/2014/01/canales-de-oxidacion\\_10.html](http://quimicamedioamb.blogspot.com/2014/01/canales-de-oxidacion_10.html). (Accessed, August 2020).

Rio, S; Delebarre, A; Removal of mercury in aqueous solution by fluidized bed plant fly ash. *Fuel* 2003. 82. 153-159.

Rodríguez Fernández-Alba, A.; Letón García, P.; Rosal García, R.; Dorado Valiño; Villar Fernández, S.; Sanz García, J. M. In *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*, Ed. CEIM Dirección general de universidades e investigación; Madrid, 2006.

Rodríguez J. A. Tratamiento anaerobio de aguas residuales. URL: <http://www.ingenieroambiental.com/4014/tratamiento545.pdf>. (Accessed, June, 2020).

Safarzadeh-Amiri A., Bolton J.R. y Cater S.R. The use of iron in advanced oxidation processes. *Journal of Advanced Oxidation Technologies*. De Gruyter. (1996).18-26

Sánchez Ruiz C. Intercambio iónico. FT-TER-006. September 2015.

Sans, R. Ingeniería ambiental. Contaminación y tratamientos. S.A. Marcombo. México. 1999.

Seghezzi, L., Zeeman, G., van Lier, J. B., Hamelers, H. V. M., & Lettinga, G. (1998). The anaerobic treatment of sewage in UASB and EGSB reactors: a review. *Bioresource Technology*, 65, 175-190.

Suárez J., Jácome A. Eliminación de fósforo en los procesos de depuración de aguas residuales. URL: [ftp://ceres.udc.es/Master\\_en\\_Ingenieria\\_del\\_Agua/master%20antiguo\\_antes%20del%202012/Segundo\\_Curso/Tratamientos\\_Avanzados\\_del\\_Agua/master](ftp://ceres.udc.es/Master_en_Ingenieria_del_Agua/master%20antiguo_antes%20del%202012/Segundo_Curso/Tratamientos_Avanzados_del_Agua/master). (Accessed, June, 2020).

Temprano J., Tejero I./ Suárez J. / Jácome A.; Tratamientos primarios. URL: [ftp://193.144.59.208/ITS\\_Caminos/2\\_Ciclo/Ingenieria\\_Sanitaria\\_Ambiental/TEMA29-rev120525-ajb.pdf](ftp://193.144.59.208/ITS_Caminos/2_Ciclo/Ingenieria_Sanitaria_Ambiental/TEMA29-rev120525-ajb.pdf). (Accessed August, 15, 2020).

Toscano. Filtración por presión. URL: <https://www.toscano.es/sin-categorizar/filtracion-por-presion/> (Accessed June 2020).

Tecpa. Cloración en tratamientos de aguas. URL: <https://www.tecpa.es/cloracion-tratamiento-aguas/>. (Accessed June 2020).

Tecowash. Bomba trituradora sumergible. URL: <https://www.tecowash.com/tecowash18/producto/bomba-trituradora-sumergible/>. (Accessed September 2020).

Vázquez Moretón, E. Filtración de lodos. URL: <https://www.eoi.es/es/savia/publicaciones/20073/filtracion-de-lodos-industriales>. (Accessed June, 12, 2020).

Veiga Barbazán. M. C. Reactor anaerobio de flujo. FT-BIO-009. September 2015.

Verrecht B., Maere T. (UGent) Nopens I. (UGent), Brepols C. and Judd S. The cost of a large-scale hollow fibre MBR. *WATER RESEARCH*, **2010**.44(18), 5274–5283.

Wen, L; Jinren, N; Xiaochen, Y; Synergy of photocatalysis and adsorption for simultaneous removal of Cr (VI) and Cr (III) with TiO<sub>2</sub> and titanate nanotubes. *Water Research*. **2014**. 53, 12-25

Yang-hsin S., Hsi-Ling C., Yu-Huei P. *Journal of Hazardous Materials*. **2 February 2012**. 341–346

Zheng, Y; Xiong, C; Yao, C; Ye, F; Jiang, J; Zheng, X; Zheng, Q; Adsorption performance and mechanism for removal of Cd (II) from aqueous solutions by D001 cation-exchange resin. *Water Science & Technology*, [Online]. **2015**. 69 (4), 833-839.

Zinder, S. y Koch, M. Non-acetoclastic methanogenesis from acetate: acetate oxidation by a thermophilic syntrophic co-cultura. **1984**. 138, pages263–272.