



Escola Universitària d'Enginyeria  
Tècnica Industrial de Barcelona  
Consorci Escola Industrial de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

## **Volumen I**

Memoria – Anexos

PROYECTO FINAL DE CARRERA



# **“ESTACION DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES”**

PFC presentado para optar al título de Ingeniería  
Técnica Industrial especialidad QUÍMICA  
por **Jose Antonio Cerezo Castro**

Barcelona, 15 de Junio de 2011

Tutor proyecto: Leopoldo de Miguel Gisbert  
Departamento de Ingeniería Química (DEQ)  
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)



# ESQUEMA GENERAL

## ÍNDICE MEMORIA

Índice memoria

Resum

Resumen

Abstract

Agradecimientos

### **Capítulo 1: Introducción**

- 1.1. Recursos hídricos
- 1.2. Gestión de los recursos hídricos
- 1.3. Normativa
- 1.4. Vertido en lecho público

### **Capítulo 2: aspectos relevantes de las aguas residuales**

#### **2.1. Composición de las aguas residuales**

#### 2.2. Características físicas

- 2.2.1. Sólidos totales
- 2.2.2. Turbidez
- 2.2.3. Temperatura
- 2.2.4. Color
- 2.2.5. Olor

#### 2.3. Características químicas

- 2.3.1. Materia orgánica
- 2.3.2. Materia inorgánica
- 2.3.3. Gases

#### 2.4. Características biológicas

- 2.4.1. Bacterias
- 2.4.2. Hongos
- 2.4.3. Algas

- 2.4.4. Protozoos
- 2.4.5. Rotíferos
- 2.4.6. Crustáceos
- 2.4.7. Virus
- 2.4.8. Plantas y animales
- 2.5. Secreciones de la microfauna y la microflora
  - 2.5.1. Sabores y olores
  - 2.5.2. Sustancias tóxicas
  - 2.5.3. Aspecto del agua
- 2.6. Parámetros utilizados
- 2.7. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
- 2.8. Demanda química de oxígeno (DQO)
- 2.9. Carbono orgánico vegetal (COT)
- 2.10. Demanda total de oxígeno (DTO)
- 2.11. Estabilidad relativa
- 2.12. Oxígeno disuelto
- 2.13. Objetivos del tratamiento
- 2.14. Ecología de los ríos: índices bióticos
- 2.15. Análisis de aguas. Generalidades
  - 2.15.1. Toma de muestras
  - 2.15.2. Conservación de la muestra

### **Capítulo 3: estudio de los procesos de depuración del agua residual**

- 3.1. Clasificación y aplicación de los métodos de tratamiento de las aguas residuales
  - 3.1.1. Tipos de tratamientos aplicados a aguas residuales
  - 3.1.2. Principales cadenas de procesos
  - 3.1.3. Rendimiento de la depuración
  - 3.1.4. Calidad del efluente según el medio receptor
- 3.2. Medida de los caudales
  - 3.2.1. Criterios de implantación
  - 3.2.2. Criterios económicos
- 3.3. By-pass

### **Capítulo 4: bombeo**

- 4.1. Bombeo

- 4.1.1. Bombas centrífugas
- 4.1.2. Tornillo de Arquímedes

### **Capítulo 5: pretratamiento**

- 5.1. Métodos generales
  - 5.1.1. Rejas mecánicas
  - 5.1.2. Tamices
- 5.2. Eliminación de residuos

### **Capítulo 6: desarenado y desengrasado**

- 6.1. Desarenado
  - 6.1.1. Tipos de desarenadores
  - 6.1.2. Eliminación de arena
- 6.2. Desengrasado

### **Capítulo 7: tratamientos biológicos**

- 7.1. Generalidades
- 7.2. Conceptos básicos de microbiología
  - 7.2.1. Fisiología de la célula
  - 7.2.2. Ciclo aerobio y anaerobio
  - 7.2.3. Crecimiento bacteriano
  - 7.2.4. Cinética del crecimiento biológico
- 7.3. Tratamientos aerobios de cultivo en suspensión
  - 7.3.1. Tratamiento de fangos activos
  - 7.3.2. Sistemas de aireación prolongada (oxidación total)
  - 7.3.3. Contacto-estabilización
  - 7.3.4. Lagunaje
- 7.4. Tratamientos aerobios de cultivo fijo
  - 7.4.1. Filtros percoladores
  - 7.4.2. Biodiscos

### **Capítulo 8: sistemas de aireación**

- 8.1. Unidades de difusión de aire
  - 8.1.1. Burbuja fina
  - 8.1.2. Burbuja grande
- 8.2. Aireadores mecánicos
  - 8.2.1. Aireadores de superficie
  - 8.2.2. Aireadores sumergidos
- 8.3. Necesidades de aireación

- 8.4. Diseño de tanques de aireación
- 8.5. Sistemas de control de espumas

### **Capítulo 9: decantación secundaria**

- 9.1. Tipos de tanques
- 9.2. Factores de diseño
  - 9.2.1. Carga de superficie y carga de sólidos

### **Capítulo 10: parámetros de operación en planta biológica**

- 10.1. Parámetros de operación
  - 10.1.1. Índice volumétrico de fangos (IVF)
  - 10.1.2. Tiempo de retención ( $t_R$ )
  - 10.1.3. Carga másica ( $C_M$ )
  - 10.1.4. Edad del fango (TRF)
  - 10.1.5. Caudal de recirculación
- 10.2. Control del proceso
- 10.3. Control del efluente biológico
  - 10.3.1. Toxiguard
  - 10.3.2. Microtox (test de luminiscencia)
  - 10.3.3. Plantas piloto

### **Capítulo 11: tratamiento de los fangos**

- 11.1. Características del fango
- 11.2. Características de los fangos
- 11.3. Dificultades operacionales con el fango
  - 11.3.1. Fango ascendente
  - 11.3.2. Fango voluminoso o bulking
  - 11.3.3. Nocardia
- 11.4. Pretratamientos de fangos
  - 11.4.1. Espesado por gravedad
  - 11.4.2. Espesado por flotación
  - 11.4.3. Espesado por centrifugación
- 11.5. Tratamiento del fango
  - 11.5.1. Estabilización
- 11.6. Acondicionamiento
  - 11.6.1. Acondicionamiento químico
  - 11.6.2. Elutriación
  - 11.6.3. Tratamiento térmico

- 11.7. Desinfección
- 11.8. Deshidratación
  - 11.8.1. Filtración al vacío
  - 11.8.2. Centrifugación
  - 11.8.3. Filtros prensa
  - 11.8.4. Filtros de banda
  - 11.8.5. Eras de secado
  - 11.8.6. Lagunaje
- 11.9. Secado térmico
- 11.10. Vertidos de fangos
  - 11.10.1. Adobo para la tierra. Compostaje
  - 11.10.2. Descarga en el vertedero. Vertido al mar

## **Capítulo 12: tratamientos avanzados del agua residual**

- 12.1. Filtración en medio granular
- 12.2. Control de nutrientes
- 12.3. Eliminación del nitrógeno
  - 12.3.1. Sistemas de nitrificación-desnitrificación conjunta
  - 12.3.2. Sistemas de desnitrificación de etapas separadas
- 12.4. Eliminación del fósforo
  - 12.4.1. Sistemas biológicos
  - 12.4.2. Procedimientos químicos
- 12.5. Adsorción sobre carbón activo
  - 12.5.1. Tratamientos con carbón activo granular
  - 12.5.2. Tratamientos con carbón activo en polvo
- 12.6. Desinfección
  - 12.6.1. Mecanismos de acción de los desinfectantes
  - 12.6.2. Factores que influyen en la acción desinfectante
  - 12.6.3. Desinfección con cloro
  - 12.6.4. Desinfección con dióxido de cloro
  - 12.6.5. Desinfección con cloruro de bromo
  - 12.6.6. Desinfección con ozono
  - 12.6.7. Desinfección con rayos ultravioleta

## **Capítulo 13: Bibliografía**

- 13.1. Bibliografía de Consulta

# ANEXOS

Índice anexos

Anexo I: PFC1

# ÍNDICE MEMÒRIA

Índice memoria

1. Introducción
2. Historia de la depuración de aguas residuales
3. La agencia catalana del agua
4. La contaminación de aguas

## **Sección 4.01 Sustancias contaminantes del agua**

- (a) Microorganismos Patógenos.
  - (b) Desechos Orgánicos.
  - (c) Sustancias Químicas Inorgánicas.
  - (d) Nutrientes Vegetales Inorgánicos.
  - (e) Compuestos Orgánicos.
  - (f) Sedimentos y Materiales Suspendidos.
  - (g) Sustancias Radiactivas.
  - (h) Contaminación Térmica.
5. Tipos de aguas residuales.

## **Sección 5.01 Aguas Blancas**

## **Sección 5.02 Aguas negras**

## **Sección 5.03 Aguas Residuales Industriales**

6. Análisis de los vertidos
7. Que es una E.D.A.R?
8. Tipos de E.D.A.R?
9. Tratamientos que realiza una E.D.A.R

## **Sección 9.01 Pretratamiento:**

## **Sección 9.02 Tratamientos primarios:**

## **Sección 9.03 Tratamiento secundario:**

- (a) Fangos activos



- (b) Camas bacterianas
- (c) Biodiscos

**Sección 9.04 Tratamientos terciarios:**

- (a) 8.4.1. Adsorción.
  - (b) 8.4.2. Intercambio iónico.
  - (c) 8.4.3. Ultrafiltración.
  - (d) 8.4.4. Osmosis inversa.
  - (e) 8.4.5. Electrodialisis.
  - (f) 8.4.6. Stripping.
  - (g) 8.4.7. Oxidación-reducción.
  - (h) 8.4.8. Desinfección.
10. Esquema de una E.D.A.R.
11. Bibliografía





Escola Universitària d'Enginyeria  
Tècnica Industrial de Barcelona  
Consorci Escola Industrial de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

## Memoria



# "ESTACION DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES"

PFC presentado para optar al título de Ingeniero  
Técnico Industrial especialidad QUÍMICA  
por **Jose Antonio Cerezo Castro**

Barcelona, 15 de Junio de 2011

Tutor proyecto: Leopoldo de Miguel Gisbert  
Departamento de Ingeniería Química (DEQ)  
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)



# ÍNDICE MEMORIA

Índice memoria .....	1
Resum.....	7
Resumen .....	7
Abstract .....	8
Agradecimientos.....	9
<b>Capítulo 1: Introducción.....</b>	<b>9</b>
1.1. Recursos hídricos.....	10
1.2. Gestión de los recursos hídricos.....	11
1.3. Normativa.....	12
1.4. Vertido en lecho público.....	14
<b>Capítulo 2: aspectos relevantes de las aguas residuales .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1. Composición de las aguas residuales .....</b>	<b>14</b>
2.2. Características físicas .....	16
2.2.1. Sólidos totales .....	16
2.2.2. Turbidez.....	16
2.2.3. Temperatura.....	16
2.2.4. Color .....	17
2.2.5. Olor.....	17
2.3. Características químicas .....	17
2.3.1. Materia orgánica .....	17
2.3.2. Materia inorgánica.....	19
2.3.3. Gases .....	21
2.4. Características biológicas .....	21
2.4.1. Bacterias.....	21
2.4.2. Hongos .....	22
2.4.3. Algas .....	22
2.4.4. Protozoos .....	23
2.4.5. Rotíferos .....	23
2.4.6. Crustáceos .....	23
2.4.7. Virus.....	23
2.4.8. Plantas y animales .....	24

2.5.	Secreciones de la microfauna y la microflora .....	24
2.5.1.	Sabores y olores .....	24
2.5.2.	Sustancias tóxicas .....	24
2.5.3.	Aspecto del agua.....	24
2.6.	Parámetros utilizados .....	25
2.7.	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO) .....	26
2.8.	Demanda química de oxígeno (DQO).....	27
2.9.	Carbono orgánico vegetal (COT) .....	27
2.10.	Demanda total de oxígeno (DTO) .....	28
2.11.	Estabilidad relativa .....	28
2.12.	Oxígeno disuelto .....	28
2.13.	Objetivos del tratamiento.....	28
2.14.	Ecología de los ríos: índices bióticos .....	29
2.15.	Análisis de aguas. Generalidades .....	29
2.15.1.	Toma de muestras.....	29
2.15.2.	Conservación de la muestra .....	30
<b>Capítulo 3: estudio de los procesos de depuración del agua residual .</b>		<b>31</b>
3.1.	Clasificación y aplicación de los métodos de tratamiento de las aguas residuales .....	31
3.1.1.	Tipos de tratamientos aplicados a aguas residuales .....	31
3.1.2.	Principales cadenas de procesos.....	33
3.1.3.	Rendimiento de la depuración .....	34
3.1.4.	Calidad del efluente según el medio receptor .....	35
3.2.	Medida de los caudales .....	36
3.2.1.	Criterios de implantación.....	36
3.2.2.	Criterios económicos.....	37
3.3.	By-pass .....	41
<b>Capítulo 4: bombeo .....</b>		<b>41</b>
4.1.	Bombeo.....	41
4.1.1.	Bombas centrífugas .....	42
4.1.2.	Tornillo de Arquímedes .....	43
<b>Capítulo 5: pretratamiento .....</b>		<b>44</b>
5.1.	Métodos generales .....	45
5.1.1.	Rejas mecánicas .....	45
5.1.2.	Tamices .....	46
5.2.	Eliminación de residuos .....	47

<b>Capítulo 6: desarenado y desengrasado .....</b>	<b>48</b>
6.1. Desarenado.....	48
6.1.1. Tipos de desarenadores .....	49
6.1.2. Eliminación de arena .....	50
6.2. Desengrasado .....	51
<b>Capítulo 7: tratamientos biológicos .....</b>	<b>53</b>
7.1. Generalidades .....	53
7.2. Conceptos básicos de microbiología.....	54
7.2.1. Fisiología de la célula .....	55
7.2.2. Ciclo aerobio y anaerobio .....	56
7.2.3. Crecimiento bacteriano .....	57
7.2.4. Cinética del crecimiento biológico .....	59
7.3. Tratamientos aerobios de cultivo en suspensión.....	60
7.3.1. Tratamiento de fangos activos .....	60
7.3.2. Sistemas de aireación prolongada (oxidación total) .....	61
7.3.3. Contacto-estabilización .....	62
7.3.4. Lagunaje.....	63
7.4. Tratamientos aerobios de cultivo fijo .....	64
7.4.1. Filtros percoladores .....	65
7.4.2. Biodiscos.....	66
<b>Capítulo 8: sistemas de aireacion .....</b>	<b>68</b>
8.1. Unidades de difusión de aire.....	68
8.1.1. Burbuja fina .....	69
8.1.2. Burbuja grande.....	69
8.2. Aireadores mecánicos.....	69
8.2.1. Aireadores de superficie .....	69
8.2.2. Aireadores sumergidos.....	70
8.3. Necesidades de aireación .....	71
8.4. Diseño de tanques de aireación .....	72
8.5. Sistemas de control de espumas.....	73
<b>Capítulo 9: decantacion secundaria .....</b>	<b>74</b>
9.1. Tipos de tanques .....	74
9.2. Factores de diseño .....	76
9.2.1. Carga de superficie y carga de sólidos .....	77
<b>Capítulo 10: parámetros de operación en planta biológica .....</b>	<b>78</b>
10.1. Parámetros de operación .....	78

10.1.1.	Índice volumétrico de fangos (IVF) .....	79
10.1.2.	Tiempo de retención ( $t_R$ ) .....	79
10.1.3.	Carga másica ( $C_M$ ) .....	80
10.1.4.	Edad del fango (TRF) .....	80
10.1.5.	Caudal de recirculación .....	80
10.2.	Control del proceso .....	81
10.3.	Control del efluente biológico.....	82
10.3.1.	Toxiguard .....	83
10.3.2.	Microtox (test de luminiscencia) .....	83
10.3.3.	Plantas piloto .....	83
<b>Capítulo 11:</b>	<b>tratamiento de los fangos.....</b>	<b>84</b>
11.1.	Características del fango .....	85
11.2.	Características de los fangos .....	85
11.3.	Dificultades operacionales con el fango .....	86
11.3.1.	Fango ascendente.....	86
11.3.2.	Fango voluminoso o bulking.....	86
11.3.3.	Nocardia.....	87
11.4.	Pretratamientos de fangos .....	87
11.4.1.	Espesado por gravedad .....	88
11.4.2.	Espesado por flotación .....	89
11.4.3.	Espesado por centrifugación .....	90
11.5.	Tratamiento del fango .....	92
11.5.1.	Estabilización .....	92
11.6.	Acondicionamiento .....	94
11.6.1.	Acondicionamiento químico.....	94
11.6.2.	Elutriación .....	95
11.6.3.	Tratamiento térmico .....	95
11.7.	Desinfección.....	95
11.8.	Deshidratación.....	96
11.8.1.	Filtración al vacío.....	96
11.8.2.	Centrifugación.....	96
11.8.3.	Filtros prensa .....	97
11.8.4.	Filtros de banda .....	97
11.8.5.	Eras de secado.....	97
11.8.6.	Lagunaje .....	98
11.9.	Secado térmico.....	98



11.10.	Vertidos de fangos .....	99
11.10.1.	Adobo para la tierra. Compostaje .....	99
11.10.2.	Descarga en el vertedero. Vertido al mar.....	100
<b>Capítulo 12: tratamientos avanzados del agua residual.....</b>		<b>101</b>
12.1.	Filtración en medio granular .....	101
12.2.	Control de nutrientes.....	103
12.3.	Eliminación del nitrógeno .....	103
12.3.1.	Sistemas de nitrificación-desnitrificación conjunta .....	105
12.3.2.	Sistemas de desnitrificación de etapas separadas .....	105
12.4.	Eliminación del fósforo .....	106
12.4.1.	Sistemas biológicos .....	106
12.4.2.	Procedimientos químicos .....	108
12.5.	Adsorción sobre carbón activo .....	110
12.5.1.	Tratamientos con carbón activo granular .....	111
12.5.2.	Tratamientos con carbón activo en polvo .....	112
12.6.	Desinfección .....	112
12.6.1.	Mecanismos de acción de los desinfectantes .....	112
12.6.2.	Factores que influyen en la acción desinfectante.....	113
12.6.3.	Desinfección con cloro.....	113
12.6.4.	Desinfección con dióxido de cloro .....	115
12.6.5.	Desinfección con cloruro de bromo .....	116
12.6.6.	Desinfección con ozono .....	117
12.6.7.	Desinfección con rayos ultravioleta .....	117
<b>Capítulo 13: Bibliografía .....</b>		<b>118</b>
13.1.	Bibliografía de Consulta .....	118



## **RESUM**

Des de sempre l'aigua ha estat un bé escàs en molts llocs, però alhora vital per a la supervivència. S'han desenvolupat moltes formes de obtenir-lo, des de la construcció de preses fins a la de autèntiques fàbriques depuradores d'aquest bé. La construcció d'una EDAR ha anat patint els avenços tecnològics juntament amb les necessitats creixents de la població. Podríem considerar els primers tractaments, que es produïen en fosses sèptiques, com els inicis de tota aquesta indústria.

Per construir una EDAR s'hi han de tenir una sèrie de coneixements, l'enginyer no pot fer bé la seva feina sense tenir nocions del procés, de quin és l'objectiu final, sense saber quins tipus de tractaments es coneixen i quines són necessaris en cada cas.

En aquest projecte es pretén donar a conèixer els processos de depuració d'una estació depuradora d'aigües residuals, cal estudiar en profunditat el producte a tractar en sí, és a dir, l'aigua. Les seves propietats físiques i químiques, els seus mètodes analítics, el transport, els processos unitaris i la importància que té la depuració d'aigües.

## **RESUMEN**

Desde siempre el agua ha sido un bien escaso en muchos lugares, pero a su vez vital para la supervivencia. Se han desarrollado muchas formas de obtenerlo, desde la construcción de presas hasta la de auténticas fábricas depuradoras de este bien. La construcción de una EDAR ha ido sufriendo los avances tecnológicos junto con las necesidades crecientes de la población. Podríamos considerar los primeros tratamientos, que se producían en fosas sépticas, como los inicios de toda esta industria.

Para construir una EDAR hay tener una serie de conocimientos, el ingeniero no puede hacer bien su trabajo sin tener nociones del proceso, de cuál es el objetivo final, sin saber que tipos de tratamientos se conocen y cuales son necesarios en cada caso.

En el presente proyecto se pretende dar a conocer los procesos de depuración de una estación depuradora de aguas residuales, es necesario estudiar en profundidad el producto a tratar en sí, es decir, el agua. Sus propiedades físicas y químicas, sus métodos analíticos, el transporte, los procesos unitarios y la importancia que tiene la depuración de aguas.

## **ABSTRACT**

Since water has always been a scarce commodity in many places, but in turn vital for survival. Have developed many ways to get it, from construction of dams to the purification plant. The construction of a wastewater treatment plant has undergone technological advances together with the growing needs of the population. We could consider the first treatment, which occurred in septic tanks, as the beginning of this whole industry.

To build a WWTP is to have a set of knowledge; the engineer cannot do their job without having to know the process, which is the ultimate goal, not knowing what types of treatments are known and which are necessary in every case. The present project aims to show vetting of a wastewater treatment plant is necessary to scrutinize the product to be treated as such, the water. Physical and chemical properties, analytical methods, transportation, unitary processes and the importance of water purification.

## **AGRADECIMIENTOS**

Este proyecto es la culminación de varios años de esfuerzo en los que he tenido que conciliar los estudios con la vida laboral y la vida familiar. Por lo que quiero agradecer especialmente a mi mujer Pilar y a mis hijas Laia y Arlet toda la paciencia que han tenido durante todo este tiempo para que este objetivo se haya cumplido.

Y a todas las personas que me han ayudado a la hora de hacer este proyecto. Al señor Leopoldo de Miguel, ponente del proyecto, al señor Ramón Oliver por su apoyo y colaboración, y al resto de profesores que siempre han tenido una respuesta clave a mis dudas presentadas durante todo este tiempo.

# **CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN**

Hoy en día, a pesar del grado de desarrollo existente en algunas zonas, la falta de agua es una gran amenaza para la vida humana ya que ésta es indispensable para la existencia de vida en la tierra. Este fenómeno no es nuevo pues el hombre ha intervenido siempre en el medio natural pero el problema se agrava cuando los mismos mecanismos naturales que han perdurado millones de años son insuficientes para contrarrestar la acción humana.

En el mundo actual, la necesidad de agua se ha acentuado en muchas zonas. Concretamente y, haciendo referencia al agua dulce, las reservas se explotan de una manera intensiva para distintos usos dentro del sector doméstico, secundario e industrial, lo que hace cambiar el régimen de los ríos y reduce el volumen de los acuíferos subterráneos. A parte de ser pequeña la cantidad de agua dulce disponible, está repartida de una manera muy desigual: factores como la situación demográfica y la altitud influyen considerablemente en el clima y por lo tanto en la cantidad de agua presente, lo que da lugar a una

masificación humana en determinadas zonas en las que, de momento, no falta agua.

Los recursos son insignificantes si se comparan con la cantidad total de agua en el planeta. Ésta cubre más de las  $\frac{3}{4}$  partes de la superficie terrestre y se cifra en  $1,3 \cdot 10^{18} m^3$ , incluyendo el estado sólido y líquido. El agua en estado de vapor contenido en la atmósfera de forma permanente se estima en  $12,8 \cdot 10^{12} m^3$ . No obstante, el 97% de la masa total de agua corresponde a los océanos, un 2,5 % a aguas salobres y solo un 0,5 % a agua dulce.

El hombre se abastece de este recurso natural mediante el denominado "ciclo hidrológico". Las aguas naturales forman parte de un ciclo continuo, así el agua en forma de humedad se evapora de los océanos y otras superficies de agua, posteriormente a su vez precipitada en forma de lluvia, nieve y granizo. Parte de esta precipitación regresa a las superficies del agua y parte cae sobre la tierra. De ésta última, una parte es captada por la vegetación, algo se evapora, otra parte corre hacia los océanos por conducto de corrientes de agua y lagos y el resto se infiltra en el suelo. Además, el agua por la facilidad que tiene de fluir, es uno de los primeros vehículos de transporte para la vida y, por lo tanto, también para las sustancias contaminantes.

Las características del ciclo del agua, analizadas desde el punto de vista de la oferta y la demanda, son más complejas que la mayoría de bienes, a causa de la diversidad su uso. Por un lado, hay aumento de consumo por habitantes debido a la mejora del nivel de vida y, por otro lado, las enormes cantidades de agua destinadas a los procesos agrícolas e industriales. En los países poco industrializados acostumbra a producirse un gran crecimiento demográfico, que también comporta aumento de la demanda de agua. Si al problema de la demanda de recursos hidrológicos se añade la cuestión de la contaminación de aguas tenemos una situación que no puede ser ignorada por nadie.

## 1.1. Recursos hídricos

En Cataluña el agua es uno de los recursos naturales más apreciados y, además, más desigualmente distribuidos, ya que el clima mediterráneo que domina se caracteriza por precipitaciones muy irregulares. Fuera de la cuenca del Ebro, el resto tiene ríos con cuencas más o menos reducidas y de régimen irregular. Las características orográficas permiten distinguir dentro del territorio catalán dos grandes vertientes, una que envía directamente el agua al Mediterráneo, que ocupa la mitad costera y la de Poniente, que lo hace a través del Ebro.

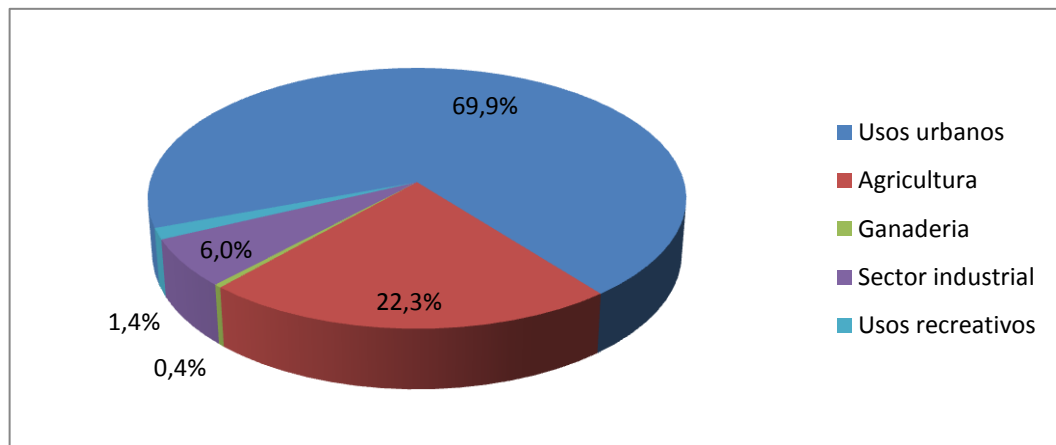
La vertiente mediterránea, Cuenca del Pirineo Oriental, comprende  $16.387 \text{ km}^2$  de los  $31.930 \text{ km}^2$  que tiene Cataluña. Las aguas de ésta suelen ser intermitentes, torrenciales y difíciles de regular. En las cuencas más importantes, las aguas se controlan con embalses superficiales (Boadella, Sau, Susqueda, Baells, Sant Ponç, Foix, Gaià, Riudecanyes) o con la explotación de los embalses subterráneos que forman los valles aluviales de los ríos y ciertas formaciones permeables adecuadas para la retención del agua.

A pesar de estas formas de aprovechamiento, los recursos hidráulicos regulados no son abundantes en las cuencas internas. Hay zonas muy deficitarias con unos recursos disponibles per cápita que varían entre 100 y  $200 \text{ m}^3$  y año por habitante como son el litoral tarraconense o el Garraf, y zonas como las cuencas

del Llobregat, del Besos y del litoral. Por el contrario, las cuencas gerundenses están bastante bien dotadas y la media de recursos regulados, de 1.000 m<sup>3</sup> anuales por habitante que permiten afrontar el desarrollo urbano, industrial y de regadío sin grandes dificultades.

En la otra mitad de Cataluña, formada por las cuencas del Segre o del Ebro y Garona, la problemática principal está centrada en la subcuenca del Alto Segre, donde hay un déficit de agua de riego. Así, se trata de cuencas compartidas y la competencia de las actuaciones, infraestructuras de regulación o el trasvase de caudales para solucionar carencias de otras zonas no corresponde, en este caso, solo a la administración catalana.

Según la directiva marco del agua (DMA), el plan de gestión del agua de Cataluña, del total de los recursos hídricos disponibles, un 69,9 % se emplea en agricultura, un 22,3 % para usos urbanos, un 6,0 % para el sector industrial, el 1,4% para ganadería y 0,4 % para usos recreativos.



**Figura 1.** Demanda de agua en Cataluña

## 1.2. Gestión de los recursos hídricos

Los escenarios climáticos contemplan que uno de los sectores más afectados por los efectos del cambio climático será el sector de la gestión de los recursos hídricos, especialmente en la región mediterránea.

Se recogen las distintas perspectivas, desde los efectos sobre los regímenes hidrológicos de aguas superficiales y subterráneas y su aprovechamiento hasta los impactos sobre los ecosistemas acuáticos, pasando por otras implicaciones socioeconómicas en los sectores que dependen de ello.

Se estima un aumento de la temperatura planetaria para finales de siglo de entre 1,1 °C y 6,4 °C con respecto al período 1980-1999. Por lo que se refiere a las consecuencias hidrológicas, se espera una reducción de las aportaciones medias a los ríos de alrededor del 5 % a medio plazo (entre los años 2020 y 2040). Dicha reducción incluye la disminución de las precipitaciones, la subida de la temperatura, los cambios de cobertura vegetal en áreas extensas, con el aumento de la evapotranspiración, o la reducción de las reservas de agua en el suelo, con la reducción de la eficiencia en la infiltración. Además, la frecuencia de las lluvias torrenciales también se puede llegar a doblar, y los caudales punta se

podrán incrementar, aproximadamente, un 20 %. A este efecto se sumará la subida del nivel del mar en el litoral.



**Figura 2.** *Parque natural Cadí-Moixeró*

En cuanto a los ecosistemas acuáticos, se prevé una disminución de la biodiversidad de los organismos, con un aumento del riesgo de aparición de nuevas especies invasoras y una recesión de las endémicas, sobre todo a largo plazo, con una mayor vulnerabilidad de los sistemas de aguas más frías o de regímenes más efímeros.

Las implicaciones socioeconómicas de estos cambios en la hidrología hacen prever que se producirá un incremento de los usos de agua por efectos térmicos, básicamente domésticos y urbanos, a corto y medio plazo. La agricultura, principalmente la de secano, será especialmente vulnerable. Además, la reducción de caudales puede conllevar un empeoramiento de la calidad del agua, un encarecimiento de los tratamientos y un descenso de la producción hidroeléctrica.

Todos estos efectos deberán incorporarse en la planificación hidrológica y en la elaboración del futuro Plan de Adaptación al Cambio Climático de Cataluña, que debería estar listo a lo largo del año 2012.

Muchos de los impactos climáticos podrán ser eliminados o paliados por las medidas de adaptación que se vayan desarrollando en los próximos años. La hipótesis de la reducción de aportaciones de cerca del 5 % a medio plazo se ha incorporado al plan de gestión de cuencas de la Agencia Catalana del Agua, todavía orientativo, en el horizonte 2027. Actualmente ya están en servicio o se están ejecutando gran parte de las actuaciones que permitirán aumentar los recursos necesarios para eliminar riesgos en los abastecimientos en el futuro. Destacan la apuesta por la reutilización del agua, la recuperación de acuíferos, la desalinización y el ahorro y la eficiencia de las redes.

### 1.3. Normativa

La Generalitat de Cataluña preocupada por la progresiva degradación de calidad de los ríos plantea la *Ley 5/1981* en la cual se toman medidas de protección del medio hídrico catalán controlando la evacuación y tratamiento de aguas residuales.

Aparece también la *Ley de Aguas 29/1985*, a nivel de todo el estado español, que define y califica el agua como un bien escaso y unitario, sobre esta premisa



se declaran públicas todas las aguas (las aguas minerales y termales tienen una regulación específica) y se hace patente la necesidad de preservar la calidad de esta agua mediante una planificación hidrológica.

Asimismo, se establece que todas las actividades susceptibles de provocar contaminación o degradación de las aguas públicas, en particular el vertido de aguas y productos residuales, requieren autorización administrativa.

A partir de la publicación del *Real Decreto 849/1986*, del Reglamento Dominio Público Hidráulico y del cumplimiento de las normativas de la Comunidad Económica Europea, fueron apareciendo sucesivamente normas específicas relacionadas con ellas.

El *Real Decreto 2646/1985* establece los traspasos de la Administración del Estado a la Generalitat de Cataluña en materia de obras hidráulicas, creando así un organismo competente en el territorio catalán en materia de la gestión de los recursos hídricos, la Administración Hidráulica de Cataluña.

La *Ley 17/1987* regula la Administración Hidráulica de Cataluña, y junto a otros Decretos y Órdenes se estructuraron la Junta de Aguas y la Junta de Saneamiento en el Departamento de Política Territorial y Obras Públicas. Más adelante la Generalitat de Cataluña crea para la *Ley 4/1991* el Departamento de Medio Ambiente, asignándole competencias y funciones.

El artículo 5.1K) de la *Ley 19/1991* define las competencias de la Junta de Saneamiento del Departamento de Medio Ambiente sobre la regularización de vertidos de aguas residuales en el ámbito de las cuencas hidrográficas. El *Decreto 286/1992* es de suma importancia en el mundo de la industria ya que modifica el procedimiento de la determinación del incremento de tarifa de saneamiento y canon de saneamiento por medida directa de la carga contaminante. En este decreto se establece la obligación, por parte del usuario industrial, de declarar la contaminación que sufre el agua a la Junta de Saneamiento mediante la Declaración de Carga Contaminante vertida (D.C.C.A.), y pagar el tributo en función de la contaminación vertida en materia en suspensión (MES), materias oxidables, sales solubles y toxicidad-materias inhibidoras.

Entre las medidas que se proponen para asumir estos objetivos se encuentran medidas de tipo económico, fiscal y sancionador en el caso de no cumplir estrictamente la normativa vigente.

La disposición final núm.34 de la *Ley 16/97* que regula los presupuestos generales de la Generalitat de Cataluña modifica el impreso MD-10 de la Declaración de Carga Contaminante Abocada (D.C.C.A.) cambiando y gravando la fórmula del cálculo del coeficiente punta ( $C_p$ ) e incluye el fósforo total (P) y el nitrógeno (NTK) dentro de los parámetros de contaminación.

A partir de la *Ley 25/98* se crea la Agencia Catalana del Agua (A.C.A.) unificando la Junta de Saneamiento y la Junta de Aguas como única administración hidráulica en Cataluña, ésta dependerá del Departamento de Medio Ambiente. Los *Decretos 125/99*, *D. 218/99* y *D. 155/99* aprueban los Estatutos de la Agencia Catalana del Agua (A.C.A.) y la estructura del Departamento de Medio Ambiente.

El *Decreto 103/2000* modifica la antigua Declaración de Carga Contaminante Abocada (D.C.C.A.) y crea la Declaración del Uso y Contaminación del Agua

(D.U.C.A.) haciendo nuevos impresos "B1 (1, 2), B2 (1, 2, 3), B3 (1, 2), B4, B5 y B6" de la antigua auto declaración de vertidos, haciéndola obligatoria anualmente, así como tener que presentarla el último trimestre de cada año para las empresas que consuman más de 6000 m<sup>3</sup>/año. Además unifica el canon de Infraestructura Hidráulica y el canon de Saneamiento, creando el Canon del Agua para el uso y contaminación de cualquier utilización del agua.

## 1.4. Vertido en lecho público

La *Ley de Aguas 29/85* establece que todas las actividades susceptibles de provocar la contaminación o degradación del dominio público hidráulico requieren autorización administrativa. En Cataluña la Administración competente es la Agencia Catalana del Agua (A.C.A.) como organismo de cuencas hidrográficas. Para los vertidos directos e indirectos al lecho público (río, riera, canal...) o indirectos (alcantarillado público o privado que desemboque después al lecho público, vertidos al subsuelo, sobre el terreno...) se han de ajustar en general a las condiciones y límites fijados en el Real Decreto 84/1996.

# **CAPÍTULO 2: ASPECTOS RELEVANTES DE LAS AGUAS RESIDUALES**

## 2.1. Composición de las aguas residuales

Las impurezas contenidas en las aguas residuales urbanas comprenden materias minerales orgánicas que son arrastradas por la corriente líquida en forma de materia en suspensión (sedimentables, flotantes y coloidales) o en mayor o menor proporción, disueltas en agua.

A estas materias le tenemos que añadir microorganismos, que pueden degradar las materias orgánicas y provocar fermentaciones pútridas.

Una de las características principales de un agua residual urbana es su biodegradabilidad, es decir, la posibilidad de depuración mediante procesos biológicos, que se da cuando existe una alimentación equilibrada de las bacterias (nitrógeno y fósforo).

Es conveniente que las aguas residuales lleguen a la estación de tratamiento en un estado suficientemente fresco, ya que un agua nauseabunda es tóxica para el tratamiento, y si se quisiera conseguir una buena depuración, se tendría que someter a una preaireación o una precloración antes de la decantación.

La contaminación de un agua residual urbana se estima en función de su caudal, de su concentración en materias en suspensión y de su demanda bioquímica de oxígeno. La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) permite valorar su contaminación de origen industrial.

Las sustancias que pueden contener un agua residual se pueden clasificar de la siguiente forma:

- SÓLIDOS:
  - Flotantes.
  - Sedimentables.
  - En suspensión.
  - Organismos microbianos.
- DISUELTOS:
  - Sales solubles.
- GASES:
  - CO<sub>2</sub>, Cl<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>.

La producción de aguas residuales oscila entre 50 y 500 l/hab por día y varía mucho según la hora del día y la estación del año.

Para clasificar un agua se usan parámetros físicos, químicos y biológicos. Según la calidad de estos componentes el agua residual se clasifica en fuerte, media o débil. La siguiente tabla muestra datos típicos de la concentración y composición del agua residual.

**Tabla 1.** *Clasificación del agua residual.*

Parámetro	CONCENTRACIÓN (mg/l)		
	Fuerte	Media	Débil
Sólidos en suspensión	300	200	100
Fijos (inorgánicos)	70	50	30
Volátiles (orgánicos)	230	150	70
DBO	300	200	100
DQO	750	500	250
Nitrógeno total	65	40	20
Nitrógeno amoniacal	50	25	12
Fósforo total	20	10	6
Aceites y grasa	150	100	50

Respecto a las plantas depuradoras, se habla siempre de agua residual como alta, media o baja carga.

## 2.2. Características físicas

La característica más fuerte del agua residual es su contenido total de sólidos, es cual está compuesto por materia flotante y materia en suspensión, en dispersión coloidal y en disolución. Otras características son la temperatura, color y olor.

### 2.2.1. *Sólidos totales*

Los sólidos totales del agua residual provienen del agua de abastecimiento, de uso industrial y doméstico y del agua de filtración de pozos locales y aguas subterráneas. Analíticamente, el contenido total de sólidos de una agua residual se define como toda la materia que queda como residuo de evaporación a 103-105°C.

### 2.2.2. *Turbidez*

La turbidez, se mide según la transmisión de la luz en el agua, es otro ensayo utilizado para indicar la calidad del agua residual. La materia coloidal dispersa o absorbe la luz evitando así su transmisión.

### 2.2.3. *Temperatura*

La temperatura del agua residual es generalmente más alta que la de suministro, debido a la adición de agua caliente de las casas e industrias.

La temperatura del agua es un parámetro muy importante por su efecto en la vida acuática, en las reacciones químicas, velocidades de reacción y en la aplicación del agua a otros usos.

El oxígeno es más soluble en agua fría que en caliente. El aumento de la velocidad de las reacciones químicas que supone un aumento de temperatura,

junto con la disminución de oxígeno puede causar graves agotamientos en los meses de verano de las concentraciones de oxígeno disuelto.

#### 2.2.4. *Color*

Históricamente, la palabra condición se usó junto con composición y concentración para describir el agua residual. La condición se refiere a la edad del agua residual. Se determina cualitativamente por su color y olor. El agua residual reciente suele ser gris; pero cuando los compuestos orgánicos se descomponen por las bacterias, el oxígeno disuelto del agua residual se reduce a cero y el color cambia a negro. En esta condición se dice que el agua es séptica.

#### 2.2.5. *Olor*

Los olores son debidos a los gases producidos por la descomposición de la materia orgánica. El agua residual reciente tiene un olor peculiar desagradable, pero más tolerable que el del agua séptica. El olor más característico es el del sulfuro de hidrógeno producido por los microorganismos anaerobios que reducen los sulfatos a sulfitos.

## 2.3. Características químicas

Esta sección se divide en tres categorías generales que tratan de: materia orgánica, materia inorgánica y los gases que se encuentran en el agua residual.

#### 2.3.1. *Materia orgánica*

En un agua residual de intensidad media, un 75% de los sólidos en suspensión y un 40% de los sólidos filtrables son de naturaleza orgánica. Proceden del reino animal y vegetal y de las actividades humanas relacionadas con la síntesis de compuestos orgánicos. Los compuestos orgánicos están formados generalmente por una combinación de carbono, hidrógeno y oxígeno, junto a nitrógeno en algunos casos. Otros elementos importantes tales como el azufre, fósforo y hierro pueden estar también presentes. Los principales grupos de sustancias encontradas en el agua residual son las proteínas (40 a 60%), hidrocarburos (25 a 50%) y grasa y aceites (10%). La urea, principal constituyente de la orina, es otro componente orgánico importante. En función de la rapidez con que se descomponga, la urea es muy raramente encontrada en un agua residual que no sea muy reciente.

Junto con las proteínas, carbohidratos, grasa y aceites, y la urea, el agua residual contiene pequeñas cantidades de un gran número de diferentes moléculas orgánicas sintéticas con estructura que puede variar. Ejemplos típicos son los detergentes, fenoles y pesticidas usados en agricultura. El número de estos compuestos aumenta año tras año al ir creciendo la síntesis de moléculas orgánicas.

##### a) Proteínas

Son los principales componentes del organismo animal. En las plantas se encuentran en menor grado. Tienen una estructura química compleja e inestable, estando sometidas a muchas formas de descomposición. Algunas son solubles en

agua y otras no. Son una composición de aminoácidos y tiene un gran peso molecular.

Todas las proteínas contienen carbono y nitrógeno (alrededor del 16%).

#### *b) Carbohidratos*

Están ampliamente distribuidos en la naturaleza, incluyen azúcares, almidones, celulosa y fibras de madera. Contiene carbono, hidrógeno y oxígeno. Algunos como el azúcar son solubles en agua y otros como los almidones son insolubles. Desde el punto de vista del volumen y resistencia a la descomposición, la celulosa es la más importante.

#### *c) Grasas animales, aceites y grasas*

Las grasas animales y los aceites son cuantitativamente el tercer componente de los alimentos. El término grasa, normalmente utilizado, incluye las grasas animales, aceites, ceras y otros constituyentes que se encuentran en el agua residual. El contenido de grasa se determina mediante la extracción de la muestra residual con hexano (la grasa es soluble en hexano).

Las grasas son unos de los componentes orgánicos más estables y no se descomponen fácilmente por las bacterias.

También se tiene que tener en cuenta el queroseno, los aceites lubricantes y los procedentes de materiales bituminosos usados en construcción de carreteras. Estos aceites llegan al alcantarillado en gran cantidad procedentes de comercios, garajes y calles. Generalmente flotan, pero parte de ellos forman parte del fango.

#### *d) Detergentes*

Son compuestos tensoactivos sintéticos que llegan al agua por vertidos industriales y urbanos.

Los productos contienen agentes de superficie y ayudantes. La mayoría de agentes de superficie son poco biodegradables, de cadena ramificada, como los alquilbenceno sulfatos.

Las concentraciones observadas en las aguas son difíciles de expresar, debido a la multiplicidad de métodos utilizados y a sus límites de precisión.

Los daños que ocasionan son los siguientes:

- Formación de espumas que paralizan procesos de depuración natural o artificial, concentra las impurezas y pueden diseminar las bacterias y los virus.
- Disminución de la absorción de oxígeno de la atmósfera y de su disolución aunque no haya espuma, por la formación de una película aislante en la superficie.
- El sabor a jabón se detecta por umbrales netamente superiores al umbral de formación de espuma.
- Aumento del contenido de fosfatos, procedente de los polifosfatos combinado con los agentes de superficie, que favorece la eutrofización de los lagos y del desarrollo del plancton en los ríos.

- Aumento progresivo del contenido de boro procedente del perborato sódico.

Los detergentes no son tóxicos para las bacterias, algas, peces, y otros organismos de un río si se mantienen en una concentración inferior a 3 mg/l.

El uso de detergentes biodegradables con un contenido mínimo de biodegradable del 80 % ha hecho que estos sean menos tóxicos, aunque su parte no biodegradable es más tóxica para los peces que los detergentes que no biodegradables.

e) Fenoles y derivados

Constituyen un índice de contaminación industrial. El problema característico es el sabor del clorofenol que aparece cuando se le añade cloro al agua, aunque haya pequeñas porciones de estos elementos. Se tiene que reducir por debajo de 0,1 e incluso hasta 0,01 µg/l.

Los derivados fenólicos son biodegradables en diferente grado dependiendo de su composición.

f) Pesticidas y productos químicos agrícolas

Los pesticidas, que luchan contra los organismos nocivos para la salud o que atacan a materiales y recursos vegetales, son también perjudiciales para la salud por acumulación en las células animales y vegetales, pudiendo producir trastornos en el medio ambiente.

Los pesticidas no comprenden solamente a insecticidas, etc., Sino también están formados por ciertos derivados de origen industrial como los bifenilpoliclorados.

Los factores que influyen en la contaminación del agua son su solubilidad, la resistencia a la degradación física o bioquímica, la naturaleza del suelo y el volumen e intensidad de las lluvias.

Los pesticidas pueden ser la causa de los malos olores y sabores. Además tienen una acción indirecta para la desaparición del plancton, la reducción del contenido de oxígeno y la modificación del pH y del contenido de gas carbónico.

Sobre los efectos en el hombre, las intoxicaciones agudas no proceden, pero si de forma crónica, ya que los pesticidas tienen un efecto acumulativo.

### 2.3.2. *Materia inorgánica*

Las concentraciones de los distintos constituyentes inorgánicos pueden afectar mucho en los usos del agua, conviene examinar su naturaleza. Se estudia el pH, la concentración de cloruros, la alcalinidad, el nitrógeno, el fósforo, el azufre, compuestos tóxicos y metales pesados.

a) pH

La concentración del ión hidrógeno es un importante parámetro de calidad tanto de las aguas naturales como de las residuales. El agua residual en una concentración adversa de ion hidrógeno es difícil de tratar por medios biológicos y si la concentración no se altera antes de la evacuación, el efluente puede alterar la concentración de las aguas naturales. El pH puede medirse con el peachímetro. De la misma manera se usan distintas soluciones indicadoras que cambian de color a determinados valores de pH. El color de la solución se

compara con el color de discos o tubos normalizados. Sólo se usa este método para líquidos relativamente claros.

*b) Cloruros*

Los cloruros que se encuentran provienen del uso doméstico, agrícola e industrial. Las heces humanas, por ejemplo, contienen unos 6 g de cloruros por persona y día.

*c) Alcalinidad*

La alcalinidad en el agua residual es debida a la presencia de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de elementos tales como el calcio, magnesio, sodio, potasio o amoniaco. La alcalinidad se determina por titulación con un ácido normalizado, los resultados se expresan en carbonato cálcico.

*d) Nitrógeno*

Es un nutriente esencial para el crecimiento de protistas y plantas. Cuando el contenido en nitrógeno sea insuficiente se necesitará la adición del mismo para hacer tratable el agua residual. El nitrógeno en aguas residuales recientes se encuentra en forma de urea y materia proteica. Se descomponen en amoniaco gracias a la acción de las bacterias. El amoniaco puede ser transformado en nitritos y nitratos y utilizados para las algas y animales, entonces su descomposición vuelve a formar amoniaco. Se forma un ciclo y según el caso puede ser necesario eliminar o reducir el nitrógeno, o introducirlo.

*e) Fósforo*

El fósforo también es esencial para el crecimiento de las algas y otros organismos biológicos. Debido a los crecimientos explosivos nocivos que tienen lugar en las aguas superficiales, existe mucho interés en la actualidad en controlar la cantidad de compuestos de fósforo que entran en las aguas superficiales a través de los vertidos de aguas residuales industriales y domésticas.

*f) Azufre*

El ion sulfato se presenta naturalmente en la mayoría de los suministro de agua y también en el agua residual. Es reducido y entonces oxidado por las bacterias y puede pasar a ácido sulfúrico siendo muy corrosivo para las tuberías.

*g) Compuestos tóxicos*

Muchos iones tienen importancia en el tratamiento y vertido de aguas residuales por su toxicidad. El cobre, plomo, plata, cromo, arsénico y boro son tóxicos en distinto grado. Afecta a los microorganismos del tratamiento biológico y les puede causar la muerte.

*h) Metales pesados*

Los vestigios de muchos metales como el níquel, magnesio, plomo, cromo, cadmio, cinc, cobre, hierro y mercurio son importantes constituyentes de muchas aguas. Algunos de ellos son necesarios para el desarrollo de la vida biológica y en ausencia podría limitar el crecimiento de las algas. La presencia de estos metales en cantidades excesivas interferirá mucho en los usos posteriores del agua, por lo tanto hay que evitar y controlar las concentraciones de estos metales.



### 2.3.3.

### Gases

Los más frecuentemente encontrados en el agua sin tratar son nitrógeno ( $N_2$ ), oxígeno ( $O_2$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ), amoníaco ( $NH_3$ ) y metano ( $CH_4$ ). Los tres primeros son gases comunes de la atmósfera y se encuentran en todas las aguas que están expuestas al aire. Los otros tres proceden de la descomposición de la materia orgánica presente en el agua residual.

#### a) Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto es necesario para la respiración de los microorganismos aerobios. Aunque, el oxígeno es ligeramente soluble en agua. La cantidad real de oxígeno que puede estar presente depende de: solubilidad del gas, presión parcial del gas en la atmósfera, temperatura y la pureza del agua.

#### b) Sulfuro de hidrógeno

Se forma por la descomposición de la materia orgánica que contiene azufre o por la descomposición de sulfitos y sulfatos minerales. Es un gas incoloro, inflamable, que tiene un olor característico a huevos podridos. Si se combina con hierro forma el sulfuro ferroso (SFe) y el agua se vuelve negruzca.

#### c) Metano

Es el principal subproducto de la descomposición anaerobia de la materia orgánica. El metano es un hidrocarburo combustible, incoloro e inodoro que tiene gran valor como combustible. Normalmente no se encuentra en grandes cantidades pero los trabajadores tendrán que estar avisados sobre el peligro de explosión.

## 2.4. Características biológicas

Los microorganismos pueden afectar tanto a las aguas superficiales como subterráneas y los más importantes son:

### 2.4.1.

### Bacterias

Las bacterias son protistas unicelulares. Consumen alimentos solubles y generalmente se encuentran donde hay alimentos y humedad. Su forma habitual de reproducción es por escisión binaria, aunque algunas especies se reproducen sexualmente o por germinación.

Hay tres tipos de bacterias: esféricas, cilíndricas y helicoidales. El tamaño de las bacterias es muy variable. Van desde 0,15 a 1,0  $\mu m$  de longitud para las esféricas y las cilíndricas y 0,5 a 5  $\mu m$  de longitud para las helicoidales. Están compuestas por un 80 % de agua y un 20 % de materia seca, de la cual el 90 % es orgánica y el 10 % restante es inorgánica.

La temperatura y el pH tienen un papel vital en la vida y la muerte de las bacterias, así como en otras plantas y animales microscópicos. Se ha comprobado que la velocidad de reacción para los microorganismos aumenta con la temperatura, doblándose por cada 10  $^{\circ}C$  de aumento, hasta adquirir una temperatura límite. Según el grado de temperatura en que se desarrollen mejor, las bacterias se clasifican en criófilas, mesófilas y termófilas.

El pH de una solución es también un factor clave en el crecimiento de los organismos. La mayoría no pueden tolerar niveles de pH por encima de 9,5 o por debajo de 4,0. El pH óptimo para el crecimiento está entre 6,5 y 7,5.

Las bacterias pueden clasificarse, en base a su metabolismo en heterótrofas y autótrofas. Las autótrofas más comunes son quimiosintéticas pero sólo unas pocas son capaces de efectuar la fotosíntesis. En el tratamiento biológico de las aguas residuales, las bacterias heterótrofas constituyen, en general, el grupo más importante por su necesidad de compuestos orgánicos por el carbono celular. Las bacterias autótrofas y heterótrofas pueden dividirse al mismo tiempo en aeróbicas, anaeróbicas y facultativas, según se necesidad de oxígeno.

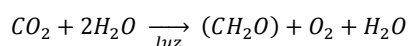
#### 2.4.2. *Hongos*

Son protistas heterótrofos, no fotosintéticos y multicelulares. Se pueden reproducir tanto sexualmente, por escisión, germinación o formación de esporas. El moho produce unidades microscópicas que colectivamente forman una masa filamentosa llamada micela. Los fermentos son hongos que no pueden formar una micela y, por tanto, son unicelulares.

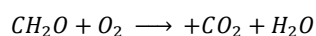
#### 2.4.3. *Algas*

Son protistas unicelulares o multicelulares, autótrofas y fotosintéticas. No son deseables en el abastecimiento de agua ya que producen malos olores y sabor desagradable. El color verde de la mayoría de las especies y su capacidad para formar capas disminuye el valor estético del agua. Los estanques de oxidación de algas son un valioso elemento para que produzcan oxígeno a través del mecanismo de la fotosíntesis. Por la noche, cuando no hay luz, para producir la fotosíntesis consumen oxígeno en la respiración. La respiración también se da en presencia de la luz solar, pero la reacción neta es la de la producción de oxígeno.

Fotosíntesis:



Respiración:



En un medio acuático puede observarse que este tipo de sistema metabólico produce una variación diurna de oxígeno disuelto. La capacidad de las algas para producir oxígeno es vital para la ecología del medio acuoso. Para que un estanque de oxidación aerobia o facultativa funcione eficazmente, es imprescindible que las algas proporcionen oxígeno a las bacterias aerobias y heterótrofas (reacción simbiótica).

como consecuencia que las algas utilicen anhídrido carbónico en su actividad fotosintética, puede producirse valores de pH elevados. Además, al aumentar el pH cambian los componentes de la alcalinidad y así la alcalinidad del carbonato y del hidróxido tienden a predominar. Si el agua tiene una elevada concentración de carbonato cálcico precipitará cuando las concentraciones del ion calcio y carbonato lleguen a ser suficientemente grandes para superar el producto de

solubilidad. Esta eliminación del ion carbonato por precipitación hace que el pH no aumente más. Al igual que en el caso de oxígeno disuelto, existe una variación diurna del pH. Durante el día, las algas consumen anhídrido carbónico, hecho que hace aumentar el pH, mientras que por la noche lo producen, hecho que disminuye el pH.

Las algas, al igual que sucede con otros microorganismos, requieren compuestos orgánicos para reproducirse. A parte del anhídrido carbónico, los principales nutrientes son el nitrógeno y el fósforo. También son muy importantes los restos de otros elementos (oligoelementos) como el hierro, cobre o molibdeno. El problema para evitar el crecimiento excesivo de las algas en las aguas naturales se centra hoy en día en la eliminación de nutrientes.

#### 2.4.4. *Protozoos*

Son protistas microscópicos y generalmente unicelulares. La mayoría son heterótrofos aerobios, aunque algunos son anaerobios. Los protozoos son, en general, de un orden de magnitud mayor que las bacterias, y suelen consumir bacterias como fuente de energía. Actúan como purificadores de los afluentes de procesos biológicos de tratamientos de aguas residuales, al consumir bacterias y partículas orgánicas. Hay cinco grupos principales: sarcodina, mastigophora, esporozoa, infusoria o ciliata y suctoria.

#### 2.4.5. *Rotíferos*

El rotífero es un animal aerobio, heterótrofo y multicelular. Su nombre proviene que tiene dos juegos de párpados giratorios sobre la cabeza que usan para el movimiento y captura de alimentos. Los rotíferos son muy eficientes al consumir bacterias dispersas y floculadas así como pequeñas partículas de materia orgánica. Su presencia en un efluente indica un proceso de purificación biológica aerobia muy eficiente.

#### 2.4.6. *Crustáceos*

Al igual que el rotífero, el crustáceo es un animal aerobio, heterótrofo y multicelular, pero tiene un cuerpo duro o coraza. Los crustáceos son una importante fuente de alimentación de los peces y como tal suelen encontrarse en la mayoría de las aguas naturales. Excepto en los estanques de oxidación con poca carga, donde a veces se detecta su presencia, los crustáceos no existen en los sistemas de tratamiento biológico en cantidades apreciables. Su presencia indica que el efluente está bajo de materia orgánica y que es rico en oxígeno disuelto.

#### 2.4.7. *Virus*

Un virus es una pequeña estructura biológica que contiene toda la información necesaria para su propia reproducción. Son tan pequeños que sólo se pueden observar con un microscopio electrónico. Son parásitos y como tal necesitan algo para sobrevivir.

Sólo se pueden multiplicar en el interior de una célula viva. Están constituidos por la asociación de un ácido nucleico y una proteína que se ha podido separar químicamente y cristalizarse. La reunión de estos dos cuerpos genera el virus

con todas sus propiedades biológicas. Cuando un virus ataca una célula viva, esta se transforma en un conjunto de nuevos virus, dispuestos a infectar a nuevas células.

Eventualmente las células huésped se rompen, liberando nuevas partículas de virus, que pueden continuar infectando otras células.

Los virus suelen clasificarse según la huésped que infectan. Muchos virus que producen enfermedades al hombre, se saben que son excretados en las heces humanas. Por eso, en el tratamiento de las aguas residuales domésticas nos tenemos que asegurar que estos virus están debidamente controlados mediante la cloración y la correspondiente evacuación del efluente.

#### *2.4.8. Plantas y animales*

Las plantas y animales de importancia varían en tamaño desde rotíferos microscópicos y gusanos hasta crustáceos macroscópicos. El conocimiento de estos organismos es útil al valorar el estado de las corrientes y lagos, al determinar la toxicidad de las aguas residuales evacuadas al medio ambiente, y al observar la efectividad de la vida biológica en los procesos secundarios de tratamiento utilizados para destruir los residuos orgánicos.

## **2.5. Secreciones de la microfauna y la microflora**

Se pueden desarrollar numerosos organismos en las agua de los ríos, especialmente los que han recibido una contaminación orgánica o sustancias eutrofizantes. Sus metabolitos, emitidos durante su vida o después de su muerte, pueden causar una serie de problemas:

#### *2.5.1. Sabores y olores*

Suele ser el sabor a tierra y a florecido, debido a los actinomicetos y a ciertas cianofíceas que regeneran diferentes sustancias principalmente geosmina.

#### *2.5.2. Sustancias tóxicas*

Algunas cianofíceas elaboran productos tóxicos para los animales superiores. Generalmente son sustancias intracelulares, y por tanto, no representan un peligro inmediato si se eliminan las algas durante el tratamiento.

#### *2.5.3. Aspecto del agua*

Color o turbidez debido a secreciones de la microflora y las excreciones de la microfauna.

## 2.6. Parámetros utilizados

**Tabla 2.** Los principales parámetros utilizados para caracterizar un agua residual.

Sólidos en suspensión	Residuos domésticos e industriales (curtidos)
Color	Residuos domésticos e industriales (textiles)
Olor	Agua residual en descomposición y residuos industriales (química)
Aceites y grasas	Residuos domésticos e industriales (ganadería)
Tensoactivos	Residuos domésticos e industriales
Pesticidas	Residuos agrícolas
Cloruros	Agua de suministro y residuos industriales
Nitrógeno	Residuos domésticos, agrícolas y ganadería
Fósforo total	Residuos domésticos (detergentes) e industriales (agrícolas)
Materia orgánica	Residuos domésticos e industriales (ganadería, láctea y papelera)
Metales pesados	Residuos industriales (galvánicos)

De la tabla podemos deducir los principales tipos de aguas residuales y sus características más importantes.

**Tabla 3.** Aguas residuales urbanas

Sólidos en suspensión	Coloides y turbidez
Materia orgánica	DBO, DQO y TOC
Detergentes	Tensoactivos aniónicos y fosfatados
Nitrógeno amoniacal	Hidrólisis de la urea
Patógenos	Coliformes fecales, estreptococos fecales, salmonelas y enterovirus

**Tabla 4.** Aguas residuales agrícolas y ganaderas

Fosfatados	Fertilizantes
Nitrógeno amoniacal	Fertilizantes
Pesticidas	DDT, HCH, ALDRIN y DIELDRIN
Arsénico	Plaguicidas
Materia orgánica Nitrógeno Grasas animales Sólidos gruesos	Ganaderos

Las aguas residuales industriales son muy variables. Pueden contaminar a cualquier tipo de parámetro. Se detallarán los más importantes en cada caso concreto.

Las aguas pluviales añaden al medio receptor los contaminantes producidos por las aguas residuales anteriores al no existir redes de alcantarillado separadas.

## 2.7. (DBO) Demanda bioquímica de oxígeno

El consumo de oxígeno realizado en una corriente de agua por los organismos aerobios se denomina Demanda Bioquímica de Oxígeno. Esta capacidad de consumir oxígeno con los microorganismos se utiliza para medir el potencial polucionante de un agua, realizando por medio del ensayo de la DBO<sub>5</sub>. La DBO en las aguas polucionadas es la cantidad de oxígeno, en mg/l, necesaria para descomponer la materia orgánica presente por acción bioquímica aerobia.

Esta demanda de oxígeno la hacen tres clases de materiales: carbonatados, nitrogenados y ciertos compuestos químicos reductores.

La transformación biológica de la materia orgánica se realiza en dos etapas. En la primera etapa, se oxidan principalmente los compuestos carbonatados, nitrogenados y ciertos compuestos químicos reductores. La primera empieza inmediatamente y acaba aproximadamente a los veinte días a 20 °C. la segunda no empieza hasta los veinte días a 20 °C y se prolonga por un periodo más largo.

El punto final puede tardar mucho tiempo en conseguirse. Por este motivo se ha aceptado como regla general el periodo de cinco días de incubación a 20 °C, denominado DBO<sub>5</sub>, ya que ambos procesos se realizan en condiciones diferentes debido a que el río es un sistema dinámico mientras que en la botella del DBO se ha creado un sistema cerrado. Además, en el ensayo normalizado de la DBO<sub>5</sub>, se mantienen constantes una serie de parámetros que no lo están en el río, como la turbidez, la temperatura, la luz solar, el medio aerobio, etc. Así se deduce que la DBO<sub>5</sub> nos proporciona muy poca información de los fenómenos que se realizan en las aguas de un río contaminado.

Por otro lado, la botella DBO, sistema cerrado, desarrolla una competitividad entre los microorganismos presentes en el mismo, determinando una dinámica y un modelo diferente del que se realiza en un río, siendo la curva de consumo de oxígeno de la botella parecida a la curva de crecimiento de los microorganismos.

El cálculo se efectúa determinando el contenido de oxígeno de una muestra dada y lo que queda después de cinco días de una muestra parecida, conservada durante este tiempo en una botella cerrada fuera del contacto del aire a 20 °C. La diferencia entre los dos contenidos representa la DBO<sub>5</sub>. En la práctica, las aguas muy polucionadas necesitan a los cinco días cantidades de oxígeno mucho mayor que las que contiene la muestra, y por tanto se ha de añadir a una segunda muestra una cantidad preparada de agua de dilución, saturada de oxígeno con la finalidad de que quede en la muestra un poco de oxígeno después de los cinco días (método de dilución). La determinación se realiza midiendo ambas cantidades de oxígeno disuelto inmediatamente y después del periodo de cinco días de incubación.

La  $DBO_5$  se determina por la siguiente fórmula:

$$mg/l \text{ de oxígeno } (DBO_5) = (D_1 - dd_2)/P$$

Donde:

$D_1$ : oxígeno disuelto en la muestra diluida después de la preaireación.

$D_2$ : oxígeno disuelto en la muestra diluida después de la incubación.

P: factor decimal de la muestra de agua polucionada.

## 2.8. (DQO) Demanda química de oxígeno

Para preparar una medida de la cantidad de materia carbonosa contenida en los diferentes tipos de materia orgánica presentes en las aguas residuales, se utiliza, al igual que la DBO, como una expresión del poder polucionante de un agua. En especial de aguas residuales, mayoritariamente industriales, que contienen compuestos tóxicos para los microorganismos responsables de la descomposición de esta materia orgánica. No presente, por otro lado, una diferenciación entre la materia orgánica putrefacta y la que no lo es.

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) está basada en el hecho que todos los compuestos orgánicos (con raras excepciones) pueden ser oxidados a dióxido de carbono y agua mediante la acción, en medio ácido de agentes muy oxidantes. Por este motivo, los valores de la DQO son mayores que los valores correspondientes a la DBO de la muestra, y están en proporción a la mayor o menor cantidad de materia orgánica biológicamente resistente a ser oxidada. Es de gran interés este parámetro en los casos en que se contemplan tratamientos de ciertos residuos industriales.

Para un determinado líquido residual generalmente es posible establecer la relación entre su DBO y DQO, con valores a la unidad, indicativo que una porción de las sustancias orgánicas oxidables no es biodegradable o relativamente resistente a la degradación biológica.

Esta relación, cuando se mantiene constante por un determinado líquido residual más o menos constante dentro de unos límites aceptables, puede ser usado para cálculos rápidos de la DBO del residuo.

## 2.9. Carbono orgánico vegetal (COT)

Este parámetro es utilizado como medida de grados de polución en receptores acuáticos. Su determinación en soluciones acuosas incluye los métodos de Van Slyke-Folch de la combustión húmeda del carbono y de la materia orgánica a dióxido de carbono y agua que la hacen lenta, por lo que hace referencia al método de analizar el carbono, el cual es rápido y sencillo, presentan a esta determinación del COT como una alternativa recomendable para medidas de la polución de masas hídricas. Además se puede correlacionar este valor de COT con el de DBO y DQO.

## 2.10. Demanda total de oxígeno (DTO)

Este parámetro sirve para indicar de forma rápida la de demanda de oxígeno de un residuo en lugar del contenido en carbono. Su medida incluye tanto las sustancias inorgánicas como las orgánicas a reacciones de variada eficiencia, a través de reacciones químicas que aparentemente convierten el carbono en dióxido de carbono, el hidrógeno en agua, al nitrógeno en óxido nítrico y a los sulfuros en sulfitos parcialmente sulfatados. Algunas veces es posible obtener una buena correlación del DTO con la DBO, con la correspondiente ventaja para caracterizar un determinado líquido residual.

## 2.11. Estabilidad relativa

Se define como el porcentaje de la relación de oxígeno disponible (como oxígeno disuelto y oxígeno contenido en los nitritos y nitratos) en el oxígeno total requerido para satisfacer la DBO. Esta relación está indicada, de forma aproximada, por el número de días necesarios para agotar el oxígeno disponible en la muestra, usando el azul de metileno como indicador. Esta determinación se ha reemplazado con el análisis de la DBO, OD (oxígeno disuelto) y nitritos y nitratos de la muestra.

## 2.12. Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto puede indicar el grado de frescura de esta agua, como también la necesidad de prever o no facilidades para un adecuado control de los olores. Se considera, junto a los análisis de la DBO, la determinación más significativa para los líquidos residuales y para las aguas receptoras. Entre otras cosas, indica el grado de septización y potencialidad de los líquidos cloacales de producir malos olores, calidad de las aguas receptoras en aceptar o no determinadas formas de vida acuática necesarias para mantener un equilibrio ecológico del sistema y como fuentes productoras de alimentos, y para valorar la actividad fotosintética de estas masas hídricas.

## 2.13. Objetivos del tratamiento

La finalidad del tratamiento consiste en obtener un agua depurada con una contaminación en un grado tal que permita su vertido sin perjuicio para la fauna y la flora del medio receptor.

La reglamentación sanitaria, fija en cada país un límite de contaminación tolerada en los vertidos a los ríos, tal como se incluye en el apartado referente a la legislación vigente en Cataluña.

Se trata de normas generales que sirven de base para los estudios correspondientes, en función de las condiciones locales, las autoridades competentes pueden estar obligadas en ciertos casos a imponer condiciones más rigurosas: escasa dilución, protección de fuentes de aprovisionamiento de agua potable, etc.

Los criterios de depuración se determinarán, en cada caso, en función de las posibilidades de autodepuración del medio receptor y de la contaminación total



de todos los vertidos. El grado de contaminación límite de un río depende de su clasificación: río de fuerte contaminación, usado para vertido de aguas usadas con contenidos de oxígeno disuelto inferior a 4 mg/l; río de ciprínidos, con oxígeno entre 4 y 6 mg/l; río de salmónidos, con contenido de oxígeno superior a 7 mg/l.

Si el agua depurada contiene impurezas orgánicas o minerales (nitrogenadas o fosfatadas) y orgánicas no biodegradables (detergentes o pesticidas), es preciso hacer un tratamiento terciario.

## 2.14. Ecología de los ríos: índices bióticos

El problema no se plantea de igual forma en las aguas corrientes, a las que no se les puede aplicar la definición completa de eutrofización (proceso de envejecimiento por acumulación de materia orgánica, a causa de la producción primaria fotosintética de algas y, eventualmente, de las aportaciones exteriores). Para caracterizar la contaminación de los ríos, se ha usado durante mucho tiempo el grado de saprobidad, ligado a las características químicas del agua y a unas zonas biológicas definidas por los representantes de las diversas comunidades animales y vegetales (sistema de Kolkwitz y Marson, 1909).

En Francia, se utilizan con frecuencia los índices bióticos de Verneaux y Tuffery. Una contaminación orgánica puntual se traduce inmediatamente aguas abajo por una caída brusca del índice biótico, que aumenta después en función de la autodepuración. Este método aporta una valiosa información para el estudio de la contaminación y también para juzgar la eficacia del tratamiento.

## 2.15. Análisis de aguas. Generalidades

### 2.15.1. Toma de muestras

La toma de muestras es una fase previa a los 14 análisis de mayor importancia que las propias determinaciones analíticas en sí.

En primer lugar, el análisis de un agua sólo tiene sentido si la muestra es representativa del agua que se quiere analizar. Dado el carácter heterogéneo de los vertidos, tanto en su descomposición como en su caudal, se ha de escoger en principio un lugar donde exista una buena homogeneización, y si no es posible, se han de mezclar diferentes aguas para conseguir una muestra suficientemente representativa, recordando siempre que las muestras parciales han de ser proporcionales al caudal.

Las condiciones generales para una buena toma de muestras son las siguientes:

- Las botellas de muestreo han de estar perfectamente limpias y se aclararán varias veces con el agua a analizar.
- Las botellas se han de llenar sin agitar excesivamente el agua en contacto con el aire.
- Las botellas se han de llenar hasta el máximo para evitar que se forme una cámara de aire.

- Para una toma de muestras a gran profundidad se ha de utilizar un frasco lastrado provisto de tapón, con dos cuerdas, una de las cuales abra el tapón cuando la botella esté sumergida.
- El transporte de las muestras ha de ser refrigerado, envolviendo las muestras con hielo dentro de la nevera portátil.

Durante la toma de muestras se ha de observar también:

- Turbulencia y color.
- Presencia de materias sólidas.
- Presencia de aceites (irisaciones en la superficie)
- Olores
- Cualquier otra circunstancia que permita identificar la muestra.

Actualmente existen en el mercado aparatos automáticos de toma de muestra que permiten obtener muestras representativas de la contaminación, tanto proporcionales al caudal como a la variación de sus características a lo largo del día y precisan la magnitud de sus puntas.

La recogida de muestras en un equipo automático se realiza normalmente mediante dos dispositivos.

- Bomba peristáltica (STRUERS, SIGMA)
- Aspiración por depresión creando previamente un vacío en el recipiente destinado a la toma de muestras (MANNING, CENTURY 2000).

Los equipos de toma de muestras automáticos portátiles no están provistos de refrigeración.

### *2.15.2. Conservación de la muestra*

Lo mejor es analizar la muestra lo antes posible, cosa que resulta imposible o muy difícil por razones logísticas. Por este motivo, se recurre a métodos específicos de conservación de la muestra.

Algunas determinaciones se han de realizar in situ, como la de oxígeno disuelto y otras inmediatamente, como la del cloro libre y combinado, así como las determinaciones microbiológicas en aguas de mar o cloradas.

Como métodos generales de conservación, se han de citar la refrigeración a 4 °C, y si las muestras han de estar mucho tiempo antes de ser analizadas, la congelación a -4 °C.

A continuación se detallan aquellas determinaciones en las que es de mayor importancia la conservación específica:

- DQO: dada la biodegradación de la materia orgánica se ha de añadir a la muestra ácido nítrico a un pH menor de 2(1ml/l).
- DBO: por la misma razón que en el caso anterior, la muestra se ha de analizar antes de 6 horas.

- CIANUROS: se añade sosa cáustica hasta conseguir un pH mayor de 11 al ser un ácido muy débil (desprendimiento de HCN).
- SULFUROS: se añade NaOH hasta conseguir un pH mayor que 9 y acetato de cinc para fijarlos como sulfuro de cinc. Puede existir desprendimiento de H<sub>2</sub>S.

En ambos casos se puede hacer el análisis in situ mediante kits si no importa excesivamente la precisión, aunque los reactivos se degradan fácilmente con el tiempo.

- METALES PESADOS: añadir ácido nítrico hasta conseguir un pH menor a 2 para evitar su precipitación con el tiempo en forma de sulfuros.
- NITRITOS Y NITRATOS: añadir ácido sulfúrico hasta conseguir un pH menor a 2. Se ha de analizar lo más rápido posible ya que el nitrito es muy inestable.

# **CAPÍTULO 3: ESTUDIO DE LOS PROCESOS DE DEPURACIÓN DEL AGUA RESIDUAL**

## **3.1. Clasificación y aplicación de los métodos de tratamiento de las aguas residuales**

### **3.1.1. residuales**

*Tipos de tratamientos aplicados a aguas*

Para el diseño de una planta depuradora existen tres factores principales a tener en cuenta:

- La contaminación de origen que determina los procesos de tratamiento que se han de aplicar.
- El grado de reducción de la contaminación que depende de la calidad del efluente que se desea.
- Disponibilidad económica, financiación y amortización.

En caso contrario, es decir, un diseño en el que no se han considerado los elementos anteriores se produce un aumento considerable del coste al ser necesarias modificaciones y ampliaciones sucesivas o que sea inviable o poco rentable económicamente.

Los niveles de tratamiento que se consideran habitualmente en la depuración de aguas residuales son los siguientes:

a) Pretratamiento

Algunos autores no lo consideran un tratamiento propiamente dicho, aunque su aplicación es casi obligada. Dentro de este conjunto encontramos un cierto número de operaciones, físicas o mecánicas que tienen como objetivo separar del agua la mayor cantidad posible de materias que, por su naturaleza o tamaño, crearían problemas en los tratamientos posteriores.

Las operaciones de pretratamiento son las siguientes (una estación de tratamiento puede incluir una o varias de estas operaciones, según su importancia y la calidad del agua sucia):

- Desbaste: proteger la estación de la posible llegada intempestiva de grandes objetos y separar materias voluminosas arrastradas por el agua.
- Dilaceradores: desintegración de las materias sólidas arrastradas por el agua sucia.
- Desarenado: extracción del agua sucia la grava, arena y partículas minerales más o menos finas.
- Predecantación: eliminación de la totalidad de la arena fina y la mayor cantidad de fango.
- Eliminación de aceites y grasas: separación de los aceites y las grasas que acompañan al agua sucia.
- Cernido: filtración sobre soporte fino para la eliminación de partículas sólidas más o menos pequeñas.
- Tratamiento de arenas y de desperdicios: eliminación en la misma planta depuradora de las arenas y desperdicios separados del agua en las operaciones anteriores.

b) Tratamiento primario

Es el tratamiento más simple en depuración, que incluye básicamente la eliminación de arena, sólidos flotantes y en suspensión por gravedad. Se

producen reducciones medias de materia orgánica y sólidos en suspensión, pero el aspecto del agua es impresentable.

Los tratamientos primarios sin adición de reactivos químicos no se consideran tratamientos de depuración como se ha nombrado anteriormente sino pretratamientos.

Los tratamientos fisicoquímicos consiguen únicamente una elevada reducción en sólidos en suspensión (90 %), con lo que el efluente tiene un aspecto presentable pero no se ha eliminado prácticamente nada de la contaminación disuelta.

#### c) Tratamiento secundario

Los tratamientos secundarios, que en su mayor parte consisten en tratamientos biológicos convencionales, son similares a la autodepuración natural, y tienen una capacidad de eliminación muy superior de la contaminación disuelta, consiguiéndose reducciones superiores al 90 % en sólidos suspendidos y en materia orgánica, así como elevadas reducciones en otros parámetros.

Se trata de tratamientos muy superiores a los fisicoquímicos, que aunque tienen un coste superior de explotación, muchas veces queda compensado por la menor cantidad de lodo generado y, por tanto, menor coste de evacuación de lodos.

No obstante, por otro lado ha influido en el desarrollo de los tratamientos fisicoquímicos ya que su coste de construcción es mucho mayor, tanto en el ámbito de obra civil como el de la maquinaria.

#### d) Tratamiento terciario

Como tratamiento terciario se incluyen todos aquellos tratamientos específicos que se utilizan para la reducción de contaminantes que no se pueden eliminar mediante los tratamientos biológicos convencionales.

Algunos ejemplos de tratamientos terciarios son:

- Eliminación de sólidos muy finos y turbidez
- Clarificación y eliminación del color
- Desinfección
- Reducción de fósforo
- Reducción de nitrógeno

La utilización de uno o varios tratamientos terciarios depende básicamente del medio receptor. En el presente proyecto se realiza la reducción conjunta de fósforo y nitrógeno.

### 3.1.2.

#### *Principales cadenas de procesos*

La depuración de un efluente urbano puede poner en juego, por separado o conjuntamente esta serie de instalaciones por tal de condicionar la calidad de las aguas residuales a los límites fijados en las normativas:

- Instalaciones de depuración física:

Pretratamientos (desbaste, desarenado, etc.)

Decantación primaria que elimina las materias en suspensión sedimentables y flotantes.

- Instalaciones de depuración fisicoquímica: estos tratamientos proporcionan rendimientos de depuración sensiblemente inferiores a los tratamientos biológicos, entre el 50 y el 75 %. En estos se puede separar por coagulación las materias en suspensión no sedimentables, obteniéndose un resultado más eficaz, que una simple decantación; la coagulación elimina igualmente ciertos materiales pesados como los fosfatos. Estos tratamientos presentan un ahorro de la inversión inicial y el espacio para su instalación, en cambio, presentan unos costes de operación elevados, en productos químicos y, sobretodo, con un incremento considerable de la producción de fangos.
- Instalaciones de depuración biológica: se obtiene una eliminación más completa de la contaminación orgánica debido a la acción bacteriana. Entre los tratamientos biológicos, mayoritariamente, se ha propuesto el sistema de fangos activados y el filtro percolador, con los que se pueden conseguir rendimientos con los diferentes parámetros, que van del 90 al 95%.
- Instalaciones de tratamiento y secado de lodos. Hace referencia a los lodos primarios depositados en los decantadores primarios y lodos en exceso producidos en el tratamiento biológico.

En ciertas estaciones de depuración de importancia media, puede adoptarse un esquema principal, suprimiendo la decantación primaria y efectuando un tratamiento biológico aerobio simultaneo de las aguas y los fangos.

En algunos casos, cuando sólo es necesario obtener un grado de depuración muy alto o de eliminación de cuerpos residuales no biodegradables, se ha de prever un tratamiento terciario.

Por otro lado, cuando se desea un grado de depuración intermedio entre una depuración biológica y el de un simple tratamiento primario, puede prevenirse un tratamiento fisicoquímico del agua para floculación y decantación. Se ha de prever también este tratamiento si se quiere obtener un grado elevado de depuración. Por ejemplo, en instalaciones de carga estacional (balnearios, centros de turismo, etc.). es necesario también estudiar convenientemente las condiciones de eliminación de los lodos y los gastos de explotación.

Hay que tener en cuenta que el poder de autodepuración del río receptor aumentará cuando el caudal de este aumente debido a fuertes lluvias u otros motivos.

Para no sobredimensionar las estaciones de tratamiento, puede ser conveniente, especialmente en el caso de las redes unitarias, limitar sucesivamente el caudal máximo: en el tratamiento biológico, en el tratamiento primario y, eventualmente, en el pretratamiento.

### *3.1.3. Rendimiento de la depuración*

Depende de numerosos factores entre los que hay que destacar:

- Regularidad de caudal y carga del efluente a tratar.

- Proporción del agua residual industrial
- Concentración del agua sucia
- Temperatura del agua

Los rendimientos del proceso, en porcentaje, de las operaciones se puede estimar de la siguiente manera. No hay que olvidar que un incremento del rendimiento da lugar a un aumento en el consumo de energía, especialmente sensible si se llega a la nitrificación.

- Decantación primaria (tratamiento físico): en el caso de aguas urbanas, la eliminación de DBO es del orden del 35 % y la de materias sedimentables hasta el 90 %. La presencia de aguas industriales puede reducir hasta un 10 % el rendimiento de la eliminación de DBO.
- Decantación después de la floculación (tratamiento fisicoquímico). La eliminación de la DBO es del orden del 70 % y de las materias en suspensión sobre el 90 %.
- Depuración biológica. Puede obtenerse un rendimiento elevado de reducción de la DBO (más del 95%) en instalaciones tradicionales de pequeña carga másica (inferior a 0,3 Kg de materia en aireación).

#### *3.1.4. Calidad del efluente según el medio receptor*

La calidad que se ha de exigir a un efluente depende básicamente del medio receptor, de tal forma que el vertido no produzca perturbación al sistema. Dadas las normativas actuales, los tratamientos necesarios para cada uno de los ecosistemas principales son los siguientes:

##### *a) Vertido al mar:*

- Dilución mediante emisario submarino.
- Desinfección para cumplir las normas de aguas de baño.
- No es imprescindible la eliminación de nutrientes (N y P), ya que no se pueden producir problemas de eutrofización.
- Reducción de materia en suspensión.
- No es necesario la eliminación de materia orgánica.

##### *b) Vertido al río:*

- Eliminación de las materias en suspensión y clarificación.
- Eliminación de color.
- Eliminación de la DBO para evitar la disminución de oxígeno disuelto.
- Desinfección y reducción de nutrientes necesarios en un futuro.

##### *c) Vertido a lagos o pantanos:*

- Todas las anteriores

- Imprescindible la eliminación de nutrientes ya que pueden causar problemas de eutrofización.
- Aplicación de los sistemas terciarios necesarios para proteger el ecosistema.

## 3.2. Medida de los caudales

La medida de los caudales es de vital importancia en las plantas depuradoras tanto para asegurar un funcionamiento óptimo de éstas y evitar averías, como para su dimensionado para poder establecer las relaciones necesarias. La medida del caudal se realiza después de pretratamiento.

En cuanto a la clasificación de los caudalímetros, las fuentes bibliográficas consultadas son divergentes en este punto en función de la propiedad analizada del flujo, la magnitud o la forma de realizar la operación de medida. La clasificación más clásica es la siguiente:

- Obstructivos: volumétricos y másicos.
- No obstructivos.

También se pueden encontrar clasificaciones que separan los métodos principales para medir los caudales en la descarga directa y los de cómputo área-velocidad. Encontramos varios tipos de contadores:

- Rotámetro: consiste en un tubo cónico que se intercala en la tubería dentro del cual hay un flotador, la altura de éste nos determina el caudal circulante.
- Elementos de reducción: basado en la medida de la caída de la presión estática provocada por la disminución de la sección del tubo.
- Tubo de Pitot: la medida de la presión diferencial nos proporciona la velocidad del fluido.
- Caudalímetro de turbina: mide la velocidad de giro de una hélice insertada en el flujo
- Contador por ultrasonidos: basado en el hecho que la señal de ultrasonidos se refleja en la superficie del agua.
- Efecto vórtex: mide la frecuencia del desprendimiento de la capa límite generado por las turbulencias creadas por un elemento insertado en la canalización.
- Efecto Coriolis: mide la deformación periódica de un tubo en "U" recorrido por un fluido sometido a un movimiento vibratorio.

### 3.2.1. *Criterios de implantación*

Antes de instalar un caudalímetro hay que tener en cuenta varios aspectos: la accesibilidad y la atmósfera del lugar de instalación (proyecciones de agua, temperatura y vibraciones), la posición del caudalímetro (vertical u horizontal)



por tal que el agua ocupe toda la sección de la canalización y, también puede ser necesario disponer de equipos que puedan tener una cierta movilidad.

Hay que tener en cuenta, que en el caso de los fluidos cargados de sólidos en suspensión hay que instalar filtros de protección para evitar la abrasión o las obturaciones de los equipos. Para instalar un caudalímetro también hay que disponer de una longitud libre y recta de canalización.

### *3.2.2. Criterios económicos*

Para seleccionar que tipo de contador hay que instalar, se han de tener en cuenta una serie de factores de carácter económico.

El principio de medida depende de la precisión del aparato, el rango de medida, la naturaleza del fluido y otros factores que serán determinantes para el coste del contador. Otro factor que afecta al coste del contador es la electrónica del aparato, es decir, la capacidad de totalizar medidas, de ser conectado a elementos de control y de formar parte de un sistema de medida informatizado. La existencia de mecanismos de corrección y reglaje de las medidas según la naturaleza y las condiciones del fluido también puede incrementar sensiblemente el coste del contador.

La instalación del contador puede suponer un gasto importante. Hay que decir también que en caso de una medida de caudal a canal abierto hay que hacer obra civil para la realización de la restricción. El mantenimiento de los contadores representa un coste a tener presente.



**Tabla 5.** Comparativa de los distintos tipos de caudalímetro

	Elemento de reducción	Tubos de Pitot	Ultrasonidos (Doppler)	Ultrasonidos (transmisión)	Electro-magnético	Vórtex	turbinas	volumétrico	Másico (Coriolis)
<b>Características del fluido</b>									
Limpio	A	A	N	A	A	A	A	A	A
Cargado	L	L	A	N	A	L	N	L	A
Temperatura alta (> 180°C)	A	A	L	L	L	L	L	N	L
Presión alta (>40b)	A	A	A	A	L	L	L	A	A
Medida en los dos sentidos	N	N	L	N	A	N	N	N	N
<b>Condiciones de implantación</b>									
Incidencia de la inestabilidad del fluido de aguas Arriba sobre la medida	3	3	2	3	2	3	3	1	1
Grandes diámetros de canalización N(>75mm)	A	A	L	A	L	L	A-L	N	N
P3 pequeños diámetros de canalización (<75mm)	N	N	L	A	A	N	A-L	A	A
Pérdida de carga	3	2	1	1	1	2	1-2	3	2
<b>Características metrológicas</b>									
Rango de medida	1	1	2	2	2	2	3	3	2
Precisión de medida	2	2	2	2	2	2	3	3	2
<b>Condiciones económicas</b>									
Coste de la cadena de medida	1-2	1	2	2	2-3	2	2-3	2	2-3
A:apto; L:limitado; N:no apto; 1:bajo; 2:media; 3:elevado									



### 3.3. By-pass

A la salida de la instalación de medida del caudal se proyectan varias arquetas de by-pass y de reparto de caudales de forma que, equipadas con las correspondientes compuertas, permiten:

- Desviar la totalidad de los caudales admisibles en la planta, una vez pretratados, hacia la red general de by-pass.
- Alimentar directamente los clarificadores con agua pretratada, sin tener que desviarlos hacia los tanques de mezcla ni de floculación.

En el diseño del by-pass se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- Velocidad máxima: 0,3 m/s.
- Resguardo: 0,3 m para el canal.

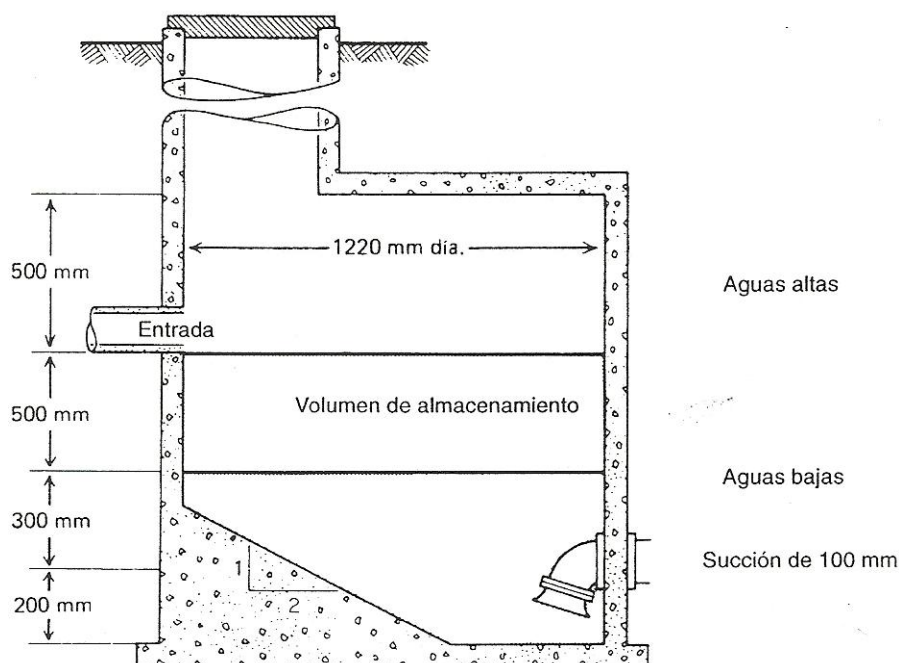
Las características básicas de las compuertas son las siguientes:

- Accionamiento manual, mediante un volante y husillo.
- Estanqueidad: 3 lados.

## **CAPÍTULO 4: BOMBEO**

### 4.1. Bombeo

Las estaciones de bombeo son necesarias en la totalidad de plantas depuradoras, ya que los colectores llegan a un nivel muy bajo y por tanto es necesario ganar altura para poder realizar las siguientes operaciones unitarias. Las estaciones de bombeo dentro del sistema de recolección incluyen un pozo que sirve para igualar el flujo de entrada que siempre es variable.



**Figura 3.** Pozo mojado

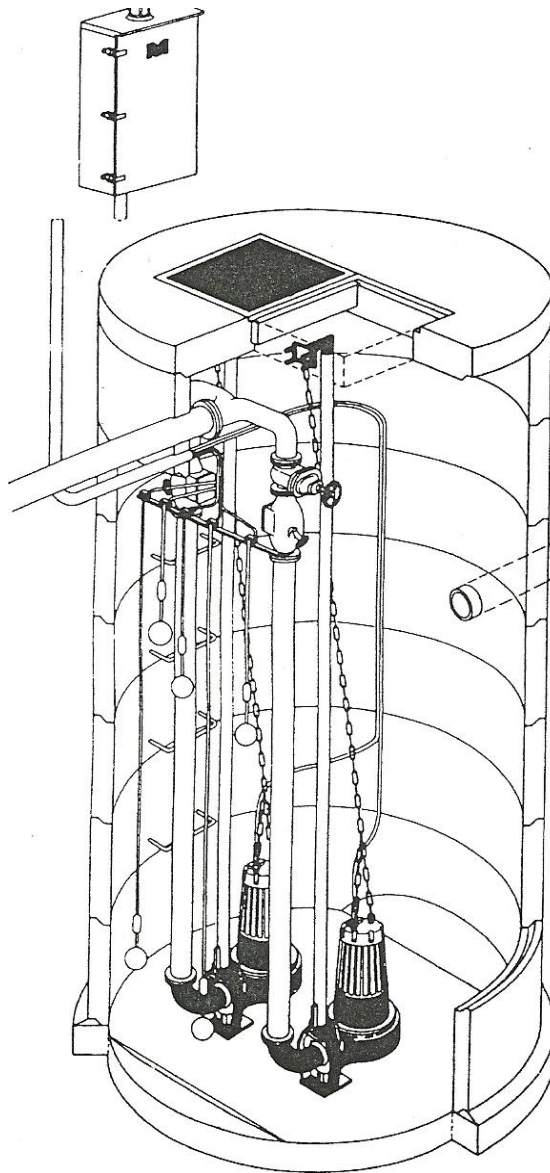
En resumen, el efluente aumenta de cota para recorrer toda la planta, obteniéndose en el bombeo toda la energía potencial necesaria para compensar las pérdidas de carga posteriores.

Las bombas más usadas en el campo del tratamiento de las aguas residuales son las siguientes:

#### 4.1.1. Bombas centrífugas

Estas bombas sumergidas usan la fuerza centrífuga para hacer girar un rodillo para transferir energía al fluido. El agua sucia entra inicialmente en el rodillo y descarga en ángulo recto en el eje de la bomba. Se utiliza en estaciones de bombeo y en plantas depuradoras de bajo y medio caudal, hasta 1000 m<sup>3</sup>/h, ya que el coste de la instalación es muy pequeño.

Su principal inconveniente son las obstrucciones por trapos y sólidos gruesos, es por este motivo que se utilizan únicamente en colectores de pequeño diámetro. Por otro lado, los pozos de bombeo con este tipo de bombas son difíciles de limpiar y con el tiempo producen obstrucciones por las sustancias flotantes que se van acumulando en la estación de bombeo.



**Figura 4.** Bombas centrífugas

En las depuradoras con llegadas masivas de arenas que provienen principalmente de las rieras, el desgaste del rodillo metálico es muy alto y se tiene que cambiar con cierta frecuencia.

Por otro lado no pueden funcionar en vacío, por lo que cualquier error en la medida del caudal o del nivel puede ser fatal ya que puede quemarse el motor.

Las bombas centrífugas se clasifican en: flujo radial, flujo mixto y flujo axial. Generalmente las bombas de flujo radial y mixto se utilizan para el bombeo de aguas residuales y pluviales. Las bombas de flujo axial pueden utilizarse para el bombeo de escorrentías pluviales sin mezclarse con aguas residuales o efluentes de plantas de tratamientos.

#### 4.1.2.

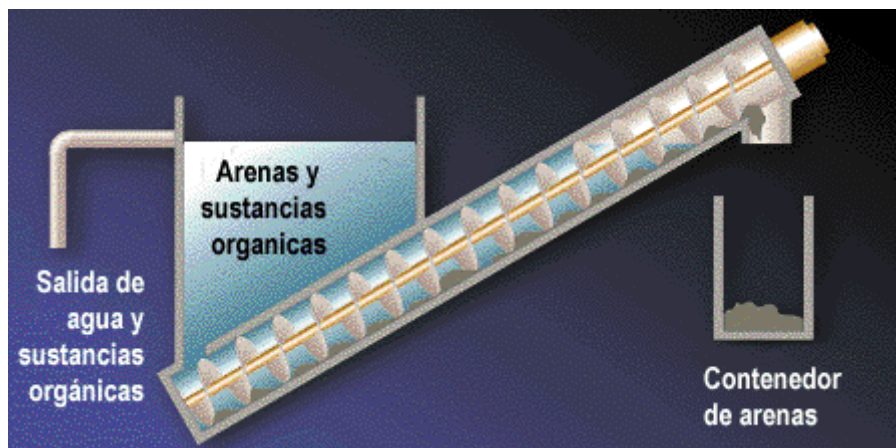
#### *Tornillo de Arquímedes*

Los tornillos de Arquímedes son bombas de desplazamiento positivo por las que el agua sucia circula a través de las palas del tornillo hasta su descarga en la parte superior.

Se usan en estaciones de bombeo y depuradores de elevado caudal (desde 1000m<sup>3</sup>/h) debido a que su coste es muy elevado, tanto el del propio tornillo como el de su instalación, ya que requiere la construcción de una base hormigón y un delicado equilibrado.

La ventaja de este tipo de bombas es que su desgaste es prácticamente nulo y son capaces de elevar todo lo que les llega sin obstruirse. En el caso de grandes colectores puede pasar ocasionalmente la rotura de las palas superiores por la entrada de tablones y piedras de gran tamaño.

Tienen ventajas de cara al proceso ya que el caudal se mantiene constante y no se producen paradas innecesarias ya que pueden producir discontinuidades al proceso de tratamiento como puede pasar en el caso de usar bombas centrífugas.



**Figura 5.** *Tornillo de Arquímedes*

# **CAPÍTULO 5:PRETRATAMI ENTO**

Estas operaciones tienen como objetivo separar del agua la mayor cantidad posible de materias que por su naturaleza o tamaño crearían problemas en los tratamientos posteriores.



En estos tratamientos previos se eliminan todos aquellos sólidos ajenos totalmente al proceso de depuración, ya sea aerobio o anaerobio.

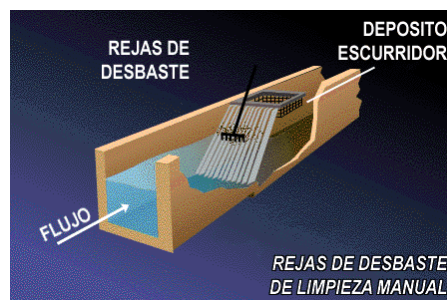
## 5.1. Métodos generales

El primer paso al tratamiento preliminar del agua residual consiste en la separación de sólidos gruesos.

### 5.1.1. *Rejas mecánicas*

El sistema clásico de retirar basuras del agua residual son las rejas mecánicas. El desbaste se puede realizar gracias a las rejas o a los tamices. Las rejas se utilizan para retener materiales sólidos de un tamaño importante. Son barras metálicas de 6mm o más de grosor, dispuestas paralelamente y separadas de 10 a 100mm. Se limpian con rastrillos que trasladan los sólidos gruesos a través de la rejilla que está perpendicularmente al agua, y la descarga en la parte superior de la cinta transportadora o a un tornillo sin eje, de funcionamiento continuo. Los materiales retenidos suelen ser trapos, plásticos, hojas, etc.

En estaciones pequeñas la extracción de materiales retenidos es efectuada manualmente mediante rastrillos hacia la cesta de recogida.



**Figura 6.** Reja de desbaste de limpieza manual.

Cuando el tamizado se efectúa a niveles cercanos al suelo, la operación no tiene complicación, pero cuando se efectúa en fosas, la operación manual de limpieza origina riesgos derivados de las condiciones de trabajo, generalmente dificultosas, en las que se suelen realizar. El tamizado es una operación que se hace siempre.

Los objetivos del desbaste son los siguientes:

- Proteger la estación de la posible llegada intempestiva de grandes objetos flotantes capaces de provocar obstrucciones a las diferentes unidades de la estación.
- Separar y evacuar fácilmente los materiales voluminosos arrastrados por el agua sucia que podrían disminuir la eficacia de los tratamientos posteriores o complicar la realización de los mismos.

En cualquier caso, las rejillas han de ser removidas periódicamente, ya que gran parte del material se puede pudrir y al estar impregnado con materia fecal, produce olores y atrae insectos.

El mecanismo de limpieza automática consiste en un rastrillo que se desplaza mediante una cadena tensada por dos ruedas giratorias o un sistema de vaivén.

Hay una cierta pérdida de carga en los barrotes cuando el agua residual los atraviesa. Se suelen disponer rejas curvas para pequeñas alturas de la corriente de agua, y longitudinales dispuestas casi verticalmente para grandes alturas.

En la reja autolimpiable, los sólidos resbalan sobre ella con una pendiente suficiente, como para autodescargarse en la parte inferior mientras el agua atraviesa la reja.

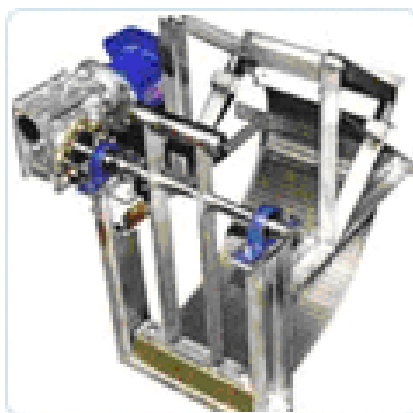
La distancia habitual de separación entre barrotes, denominada ancho de luz, es de 12 mm (ancho estándar), mientras que la profundidad de los barrotes es de 5 cm.

Normalmente, se utilizan rejas de mayor ancho de luz de protección que las estándar, formando un doble sistema de rejas que permite soportar los aluviones de basuras que se producen con las fuertes lluvias.

Algunas veces, se utilizan rejas con ancho de luz muy grande, superiores a 10cm, para proteger los sistemas de bombeo de sólidos muy grandes.

La principal ventaja del uso de rejas es que su pérdida de carga es muy pequeña y, por tanto, son usadas para grandes caudales. Tienen un desgaste pequeño, pero un atasco puede producir el movimiento de los barrotes.

Su principal inconveniente es que dejan pasar muchos sólidos y en algunos casos el tamiz es insuficiente para proteger las instalaciones posteriores.



**Figura 7.** *Reja de limpieza automática*

### 5.1.2. *Tamices*

Los sistemas modernos de retirada de sólidos son los tamices, con ancho de luz variable de 1 a 5mm y que tienen por tanto un mayor rendimiento en la filtración, obteniéndose una protección perfecta de los equipos posteriores. Normalmente se usan rejas de protección para evitar la entrada de maderas, piedras, etc.

Por tanto, a continuación de estas rejas, dispondremos tamices, que suelen utilizar a veces como depuradoras cuando puede haber una gran dilución, como en grandes ríos y mares. Como norma general, se admite que queden restringidas las partículas de un tamaño superior a 3mm.

Los tamices también se colocan perpendicularmente al flujo del agua sucia (120°). Los más conocidos son el Aquaguard, el Step-screen, el Econety y el Hidralet.

Los tamices son más delicados que las rejas, aunque su mantenimiento también es pequeño. Generalmente son de plásticos resistentes y no metálicos, ya que así no se producen fenómenos de corrosión.

La eficacia de los tamices es pequeña: llega únicamente a 1/5, aproximadamente, del rendimiento de los decantadores.

Como depuración previa, se recomiendan rejas de 40 a 50 mm de apertura. Las aperturas anchas tienen la ventaja que las heces y los papeles pueden atravesarlas, llegando a los decantadores junto con el fango, y únicamente las materias gruesas relativamente poco fermentables son retenidas y separadas. Las barras de las rejas se colocan oblicuamente a la dirección de la corriente con una inclinación de 1 (altura) a 3 (longitud) como mínimo. El canal se ensancha por debajo de la reja, pero sólo de forma que la velocidad del agua no resulte inferior a 0,6m/s para que no se deposite en el suelo. Para el caso de las crecidas anormales se dispone de una derivación que en todo caso se equipa de una reja gruesa de unos 100 mm de apertura entre barras. Como cantidad en general recogida en las rejas gruesas, se puede contar entre 2 y 3 l per cápita y año.

La desventaja de las rejas finas es que la cantidad de material recogido es mayor, aumentándose de 5 a 10 l per cápita y año, es decir, que aumenta el triple, conteniendo además heces y sustancias que hacen mal olor. Tienen una elevada pérdida de carga, y es por este motivo que en muchas depuradoras no se pueden sustituir las rejas existentes.

La velocidad de paso a través de la reja no ha de ser mayor de 0,7 m/s para que no sea limpiado y arrastrado por el agua mucho material retenido.

Como ventajas ante los decantadores, podemos citar que es un equipo barato, sin partes móviles, que precisa de un mantenimiento mínimo, aunque necesita un desnivel importante entre el punto de alimentación del agua el de salida, que se consigue por medio del uso de las bombas, comportando unos ciertos gastos de energía.

## 5.2. Eliminación de residuos

Los medios para eliminar los residuos son los siguientes:

1. Descarga en dilucladores o bombas desintegradoras donde son trituradas y devueltas al agua residual.
2. Eliminación por transporte a zonas relleno (vertederos).

En las pequeñas instalaciones, los residuos se pueden eliminar enterrándolos en el propio terreno de la planta, o bien eliminándolos junto a las basuras procedentes del municipio. En las grandes instalaciones, la incineración puede ser una solución adecuada.

# **CAPÍTULO 6:**

# **DESARENADO Y**

# **DESENGRASADO**

## **6.1. Desarenado**

La eliminación de arena es esencial antes de pasar el agua a las centrífugas, de los intercambiadores de calor y de las bombas de diafragma de alta presión. En cambio, en aquellos casos en que el fango no digerido fuera secado con filtros de vacío o bien se incinerase, la utilización de desarenadores de menor eficacia ha dado resultados satisfactorios.

El desarenado tiene como objetivo extraer del agua sucia la grava, arena y partículas minerales más o menos finas, con la finalidad de evitar que se produzcan sedimentos en los canales y conducciones, y para proteger las bombas y otros equipos de la abrasión y desgaste anormales; reducir la formación de depósitos pesados en las tuberías, canales y conductos, y la frecuencia de limpieza de los digestores que se ha de realizar como resultado de excesivas acumulaciones de arena en estas unidades.

En el término arenas se incluyen las arenas propiamente dichas, la grava, las cenizas y cualquier otra materia pesada que tenga velocidad de sedimentación o peso específico superior al de los sólidos orgánicos putrescibles del agua residual. Esta arena presenta también cáscaras de huevos, trozos de huesos, granos de café y grandes partículas orgánicas tales como restos de comida.

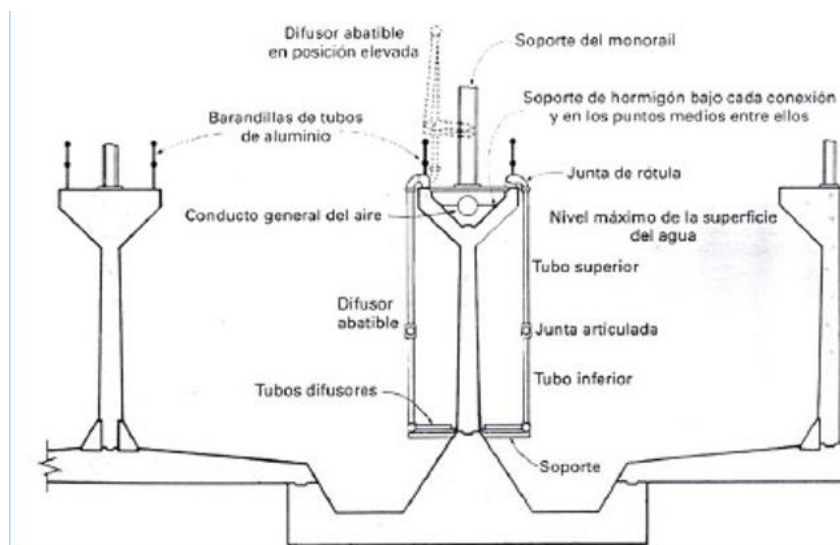
Los desarenadores pueden situarse en las plantas de tratamiento donde la eliminación de la arena pueda facilitar el funcionamiento de las otras unidades. Aunque la instalación de rejillas de limpieza mecánica o de dilaceradores ante los desarenadores facilita la operación de eliminación de arena y de las instalaciones de limpieza.

Cuando convenga situar los desarenadores delante de las bombas para el agua residual, normalmente se tendrá que hacer a bastante profundidad, lo que significa un elevado coste adicional. Por tanto, es más económico bombear el agua residual, con arena y todo, hasta los desarenadores, situados en un punto adecuado antes de las instalaciones de la planta de tratamiento, admitiendo que las bombas pueden necesitar un mayor control y mantenimiento que si estuvieran después de los desarenadores.

El diseño de los desarenadores dependerá del tipo seleccionado, de si están provistos o no de equipo de extracción mecánica de arena y de los requisitos que se exija al equipo desarenador, en caso de existir.

### 6.1.1. Tipos de desarenadores

Existen dos tipos de desarenadores: de flujo horizontal y aireado. El primer caso, generalmente de diseño horizontal, y su profundidad, escasa. Se requiere un cierto control de la velocidad de entrada del agua para que la velocidad por unidad de área sea constante para toda la cámara de desarenado. Se proyectan para que la velocidad sea aproximadamente 0,3m/s ya que esta velocidad arrastra la mayoría de las partículas orgánicas a través del tanque y permite que la arena, que es más pesada, sedimente. Por tal que la velocidad se mantenga cuando varía la profundidad, la sección transversal del canal es parabólica aunque se aproxima a un trapecio.



**Figura 8.** Sección transversal de un desarenador aireado

Para mejorar la separación de arena y materia orgánica se diseñan los desarenadores aireados en los que se inyecta aire a la masa líquida para que describa una trayectoria en espiral a medida que el agua avanza por el tanque. Éstos están pensados para proporcionar un tiempo de retención de 1 a 3 minutos de caudal máximo. La sección transversal es parecida a la proporcionada por circulación en espiral en los tanques de aireación de fangos activados, así, presenta también un canal de unos 0,9m de profundidad con paredes laterales muy inclinadas que están a lo largo de un lado del depósito bajo los difusores de aire, los cuales están situados entre 0,45 y 0,6m por encima del plano normal del fondo.

**Tabla6.** Datos de diseño para desarenadores aireados.

Característica	Valor	
	Intervalo	Típico
Dimensiones		
Profundidad (m)	2,0-5,0	
Longitud (m)	7,5-20,0	
Anchura (m)	2,5-7,0	
Relación anchura/profundidad	1:1-5:1	2:1
Tiempo de retención: caudal punta (min)	2,0-5,0	3,0
Cantidad de arena: espumas arena, m <sup>3</sup> /10m <sup>3</sup>	0,004-0,200	0,015
Suministro de aire m <sup>3</sup> /min.m de longitud	0,15-0,45	0,3

La velocidad de la rotación transversal o la agitación determinan el tamaño de las partículas de peso específico dado que serán eliminadas. Si la velocidad es muy grande, la arena será arrastrada fuera del tanque y, si es muy pequeña, habría materia orgánica que se depositaría con la arena. Afortunadamente, la cantidad de aire se puede ajustar fácilmente. Con un ajuste adecuado, se obtendrá una eliminación prácticamente del 100% y la arena quedará bien limpia. El agua se desplaza a través del tanque a caudal máximo, y incluso más con caudales menores. El agua residual se tendrá que introducir en dirección al movimiento helicoidal. Para determinar la pérdida de carga de un desarenador se ha de considerar la expansión de volumen causado por el aire introducido.

Un gran número de desarenadores aireados están dotados de medios de eliminación de arena mediante palas verticales que se desplazan sobre un monorraíl, centradas sobre el canal de almacenaje y recogida de arena. Otras instalaciones están equipadas con transportadores de cadena que se desplazan a lo largo de los canales de almacenaje y empujan la arena hacia un extremo de éstos, desde donde lo elevan por encima del nivel del agua de forma continua.

Es importante recordar que al proyectar desarenadores aireados, la capacidad de las instalaciones de manipulación de arena esté dimensionada para el caudal punta mantenido.

### 6.1.2. *Eliminación de arena*

El método más corriente es la evacuación de la arena como relleno, cubriéndola cuando sea necesario. En algunas plantas de gran tamaño, se incinera junto al fango. Por ejemplo, en la ciudad de Nueva York y en otras grandes ciudades costeras, la arena se vierte al mar. Generalmente se tendrá que limpiar antes de tirarla al mar.

#### a) Limpieza

El carácter de la arena normalmente recogida en los desarenadores de flujo horizontal varía ampliamente de lo que normalmente se podría considerar como arena limpia hasta aquella que contiene gran proporción de materia orgánica putrescible. La arena sin limpiar puede contener un 50% o más de materia

orgánica. Ésta materia puede atraer insectos y ratas y, tiene un olor desagradable.

La eliminación de la mayor parte de la materia orgánica se puede llevar a cabo mediante separadores y lavadores de arenas. En los casos en que parte de la materia orgánica más pesada permanezca con la arena se suelen emplear lavadores de arena para proporcionar un segundo nivel de separación de sólidos volátiles.

Existen diversos lavadores de arena. Uno de ellos se basa en un tornillo inclinado sumergido que proporciona la agitación para separar la arena de la materia orgánica y, al mismo tiempo, lleva la arena limpia hasta un punto de descarga situado sobre el nivel del agua. Otro tipo consiste en una criba en el que mediante un flujo de líquido que circula alternativamente hacia arriba o hacia abajo del conjunto de la arena, produciéndose la eliminación de la materia orgánica. Su rendimiento es excelente pero su uso supone una operación adicional de planta que ha de ser supervisada.

#### *b)* Transporte

La arena se suele transportar a las zonas de vertido en camiones, por lo que es necesario tener medios para cargarlos. En las plantas grandes se dispone de tolvas elevadas con compuertas de fondo a través de las cuales se cargan los camiones. Las dificultades encontradas para que la arena discurra libremente desde las tolvas de almacenaje se reducen al mínimo aplicando aire por debajo de la arena y también utilizando vibradores. Conviene prever los dispositivos necesarios para la recogida del goteo procedente de las compuertas. De la misma manera se pueden utilizar palas, operadas sobre un sistema monorraíl, para cargar los camiones directamente desde los desarenadores o desde los depósitos de almacenaje situados al mismo nivel.

En algunas plantas la arena se conduce, con buenos resultados, a las zonas de eliminación mediante transportadores neumáticos. Este sistema no requiere tolvas elevadas ni depósitos ni camiones aunque el desgaste de las conducciones.

## 6.2. Desengrasado

El desengrasado consiste en una operación de separación sólido-líquido, y se hace siempre que el agua tenga una temperatura suficientemente baja que permita la coagulación de las grasas. Los aceites y las grasas, generalmente más ligeros que el agua, tienden a subir a la superficie. Por eso, todo dispositivo en el que se reduzca la velocidad de flujo, y que presente una superficie tranquila, actúa como separador de grasa y aceite.

La recogida en superficie y la evacuación, si es posible, se realiza por vertido a arrastre sobre cinta móvil para los aceites, y por rascado para las grasas.



**Figura 8.** *Desengrasador automático*

El decantador primario separa especialmente las grasas, que se acumulan en la superficie, pero generalmente se adapta mal a la recogida de éstas cuando su volumen resulta considerable, con las consecuentes dificultades de explotación.

En las aguas residuales urbanas, el desengrasado es conveniente (indispensable si no se procede a una decantación primaria) y se efectúa satisfactoriamente en combinación con el desarenado siempre que las dimensiones del aparato se calculen adecuadamente.

El aparato presenta una zona de aireación, en la que se inyecta aire por su parte inferior, y una zona tranquilizada destinada a la acumulación de grasas en la superficie. Los fangos sedimentables resbalan sobre una pared inclinada y pasan a la zona de aireación. El tiempo de retención del agua en este aparato es del orden de 10 a 15 minutos a caudal medio, con un mínimo de 5 minutos. La evacuación de las grasas puede hacerse por vertedero, o bien limpiando mecánicamente la superficie. El caudal de aire introducido es del orden de 0,5 a 2m<sup>3</sup>/h por m<sup>3</sup> de capacidad del desengrasador. En estas condiciones, puede conseguirse una eliminación del 80% de materiales grasos.

Respecto al tratamiento y evacuación de grasas y espumas, generalmente no son recuperables. Estos residuos son generalmente orgánicos, y pueden someterse a la digestión anaerobia junto a los fangos, aumentando así la producción de gas, pero esta solución presenta el inconveniente de favorecer la formación de una costra de fango en el digestor, que se tendrá que equipar en este caso con un dispositivo de agitación muy eficaz.

Cuando la instalación comprende una incineración de fangos o de materias separadas por desbaste en las rejillas, las materias flotantes y las grasas pueden incinerarse junto con estos productos.



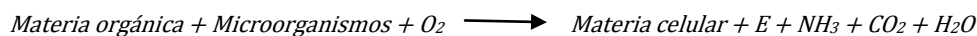
# CAPÍTULO 7: TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS

## 7.1. Generalidades

Los sistemas de tratamiento biológico son proyectados para la estabilización y eliminación de la materia orgánica soluble y coloidal que todavía queda después del tratamiento primario. Cuando se trata de pequeñas instalaciones puede suprimirse la decantación primaria, siendo indispensable en este caso realizarse un pretratamiento en el que se incluya un desengrasado eficaz. Aunque este proceso se puede hacer por medios fisicoquímicos, normalmente se entiende que el tratamiento biológico implica un proceso biológico.

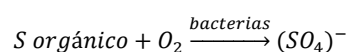
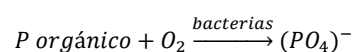
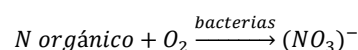
El agua además de contener materia orgánica también transporta un gran número de microorganismos que son capaces de estabilizar el residuo en un proceso de purificación natural controlado, en el que los microorganismos descomponen material orgánico soluble coloidal del residuo, comiéndose la materia orgánica. Para realizar este proceso natural en un tiempo razonable, es necesario un número muy grande de microorganismos en un recipiente. Los sistemas de tratamiento biológico son diseñados para mantener una gran masa activa de bacterias dentro del sistema. Este proceso puede realizarse mediante la puesta en suspensión del agua usada (fangos activados) o por medio de películas fijadas (lechos bacterianos).

Normalmente este proceso se realiza de forma aerobia, produciéndose la siguiente reacción simplificada:



La materia orgánica no biodegradable no se elimina (DQO).

Si el agua tratada tiene finalidades agrícolas se han de eliminar nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, que estimulan el crecimiento de las plantas. La reacción es exotérmica, cuando están presentes nitrógeno, fósforo y azufre en la materia orgánica, se realizan las siguientes reacciones:



La velocidad con la que se produce la oxidación biológica de la materia orgánica es proporcional a la materia orgánica presente, no oxidada, medida en términos de oxidabilidad. Matemáticamente, tenemos:

$$-(dL/dT) = K_1L$$

Integrando:

$$L_t = L_0 \times 10^{-K_1t}$$

Donde:

$L_0$ =DBO<sub>5</sub>, que es la oxidabilidad total de la materia orgánica presente inicialmente.

$L_t$ =oxidabilidad en el tiempo t.

$K_1$ =logaritmo decimal de la constante de proporcionalidad, de la velocidad de reacción.

En el tiempo t, tenemos:

$$Y = (L_0 - L_t)$$

Sustituyendo  $L_t$  en la ecuación anterior, obtenemos:

$$Y_t = L_0 \times (1 - 10^{-K_1t})$$

Si consideramos el déficit de oxígeno disuelto en el río (D), tenemos:

$$dD/dt = K_1L - K_2L$$

Donde  $K_2$  representa la constante de reoxigenación por vía física y  $K_1$  la constante de desoxigenación por vía bioquímica.

Integrando la ecuación anterior, obtenemos:

$$dt = [(K \times L_0)/(K_1 - K_2)] \times (10^{-K_1t} - 10^{-K_2t}) + D_0 \times 10^{-K_2t}$$

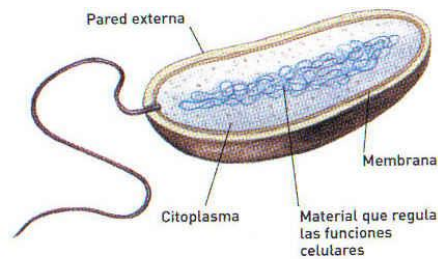
Esta es la ecuación de Streeter y Phelps.

## 7.2. Conceptos básicos de microbiología

El entendimiento de la forma, estructura y actividades bioquímicas de los microorganismos importantes es básico para el diseño de un proceso de tratamiento biológico o en la selección del tipo de proceso a utilizar.

En general, la mayoría de las células vivas son muy similares. Tienen una pared celular que puede ser una membrana rígida o flexible. Si son móviles, poseen generalmente flagelos o algunos apéndices de apariencia capilar. El interior de la célula contiene una suspensión coloidal de proteínas, carbohidratos y otros compuestos orgánicos complejos, llamado citoplasma. Cada célula contiene ácidos nucleicos, producto hereditario vital para la reproducción. La región citoplásmica contiene ácido ribonucleico (ARN), la misión del cual consiste en la síntesis de las proteínas. También en el interior de la pared celular encontramos el núcleo, rico ácido desoxirribonucleico (ADN), que contiene toda la información necesaria para la reproducción de todos los componentes de la célula. En algunas células este ADN está recubierto por una membrana por lo que el núcleo queda

bien definido (células eucariotas). En otras el núcleo no está definido (procariotas).



**Figura 9.** *Célula procariota*

Por tal de poder realizar sus funciones vitales adecuadamente un organismo ha de tener una fuente de energía y de carbono para poder sintetizar nueva materia celular. También son muy importantes elementos inorgánicos como el nitrógeno y el fósforo y otros que están en muy pequeñas cantidades como el azufre, el potasio, el calcio o el magnesio. Dos de las fuentes más corrientes del carbono celular para los microorganismos son el anhídrido carbónico y materia orgánica. Si un organismo obtiene el carbono partir del anhídrido carbónico se dice que es un autótrofo, si no es un heterótrofo.

La energía también es necesaria para la síntesis de la nueva materia celular. En los organismos autótrofos la energía puede proporcionarla el sol, como en la fotosíntesis, o una reacción orgánica de oxidación-reducción. Si la energía es solar al organismo se le conoce como autótrofo fotosintético. Si es proporcionada por una reacción inorgánica de oxidación-reducción se le conoce como autótrofo quimiosintético. En los organismos heterótrofos la energía requerida para la síntesis celular procede de la oxidación o fermentación de la materia orgánica.

Los organismos pueden clasificarse también según su capacidad de utilizar el oxígeno. Los organismos aerobios solo pueden existir en presencia de oxígeno molecular. Los organismos anaerobios existen solo en un ambiente privado de oxígeno. Los organismos facultativos tienen la capacidad con o sin oxígeno libre.

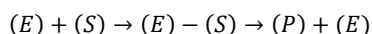
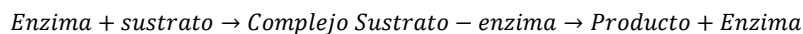
### 7.2.1. *Fisiología de la célula*

Como las bacterias son los microorganismos más frecuentes en el tratamiento biológico de las aguas. El proceso por el cual los microorganismos crecen y consiguen energía es complejo i difícil ya que existen muchas vías y ciclos. Las enzimas son proteínas simples o combinadas con una molécula orgánica o inorgánica de bajo peso molecular. Como catalizadores biológicos que son, las enzimas pueden aumentar en gran medida la velocidad de las reacciones químicas sin alterarse.

Existen dos tipos de enzimas: extracelulares e intracelulares. Cuando el sustrato o nutriente requerido por la célula no es capaz de atravesar la pared de la célula, la enzima extracelular convierte el nutriente en una forma tal que pueda ser transportado al interior de la célula. Las enzimas intracelulares contribuyen a la fotosíntesis y a las reacciones de energía dentro de la célula.

Las enzimas son conocidas por su grado de eficacia para convertir el sustrato en producto final. Una enzima puede actuar sobre una gran cantidad de nutrientes por minuto en producto final. También se caracterizan por su elevada

especificidad por lo que la célula tendrá que producir una enzima distinta para cada nutriente. Una reacción enzimática general es del tipo:



La enzima funciona como un catalizador formando un complejo con el sustrato, el cual es seguidamente transformado en un producto y en la enzima original. En este punto el producto puede ser atacado por otra enzima. Se puede formar una secuencia de complejos y productos antes que se produzca el producto final. En una célula la transformación del sustrato original en el producto final se consigue con un sistema enzimático de este tipo, la actividad de las enzimas se ve sustancialmente afectada por el pH y la temperatura, así como por la concentración del sustrato. Cada enzima tiene un pH y una temperatura de trabajo.

Junto a las enzimas, se requiere energía para que puedan suceder las reacciones bioquímicas de la célula. En la célula se libera energía mediante la oxidación de la materia orgánica o inorgánica, o por reacción fotosintética. La energía liberada es captada y almacenada por ciertos compuestos orgánicos, siendo el compuesto más frecuente el adenosín trifosfato (ATF). La energía captada por este compuesto se utiliza en la síntesis, movilidad y mantenimiento de la célula. Cuando la molécula de ATF ha consumido su energía en las reacciones de síntesis y mantenimiento, cambia a un estado de menor energía denominado adenosín difosfato (ADF). Esta molécula puede entonces captar la energía liberada en la ruptura de la materia orgánica e inorgánica. Una vez conseguida, el compost adopta un estado energético mayor, constituyendo la molécula de ATF.

En resumen, el metabolismo total de las células bacterianas consiste en dos reacciones químicas de energía y síntesis. La primera reacción libera energía de manera que pueda proseguir la segunda reacción de síntesis celular. Ambas reacciones son el resultado de numerosos sistemas intracelulares y cada sistema consiste en muchas reacciones catalizadas por enzimas.

La energía liberada en la reacción de energía es captada por el sistema catalizado por enzimas, que incluye la molécula ATF, y transferida a través de esta a la reacción deficitaria de energía que es la reacción de síntesis.

En el caso de bacterias heterótrofas, únicamente una parte del residuo orgánico se convierte en producto final. La energía obtenida en esta reacción bioquímica se usa en la síntesis de la materia orgánica que queda en nuevas células. Si la materia orgánica del agua residual es limitada, habrá una disminución en la masa celular debido al uso de materia celular sin sustitución. Si esta situación continuara, todo lo que quedaría de la célula sería un residuo orgánico relativamente estable. Este proceso general de disminución de la materia celular se denomina respiración endógena.

### 7.2.2.

### *Ciclo aerobio y anaerobio*

Existen dos ciclos en la naturaleza que suponen el crecimiento y la descomposición de la materia orgánica:

- El ciclo aerobio, en el que el oxígeno se utiliza en la descomposición de la materia orgánica.

- El ciclo anaerobio, en el que se utiliza el oxígeno para la descomposición de la materia orgánica.

El nitrógeno y el azufre son partes integrantes de los ciclos, aunque no son los únicos, como se observa en los esquemas correspondientes de los dos ciclos que se adjuntan a continuación.

La parte de aerobio o anaerobio, como se observa en las figuras solo se refiere a la parte de descomposición de los ciclos. Es aquí donde la materia orgánica muerta se descompone por primera vez en productos iniciales e intermedios, antes que se produzcan los productos finales estabilizados. En los sistemas aerobios, los productos finales de degradación se oxidan más y por tanto quedan a un nivel menor de energía que los productos finales del sistema de degradación anaerobia. Por este motivo se libera mucha más energía en la degradación aerobia que en la degradación anaerobia. Como consecuencia, la degradación anaerobia es un proceso mucho más lento.

La parte izquierda del ciclo es la misma tanto para los sistemas aerobios como para los sistemas anaerobios. Esta parte comprende la formación o síntesis de la materia orgánica necesaria para la vida vegetal o animal.. a veces, y debido a la muerte o restos de la vida animal, existe materia orgánica muerta disponible en las descomposiciones bacterianas y el ciclo se vuelve a repetir.

La descomposición de residuos se acelera al controlar el medio de los microorganismos. Sin perjuicio del tipo de residuo que se trate, el proceso de tratamiento biológico consiste en controlar el medio requerido para un crecimiento óptimo de los microorganismos.

### *7.2.3.*

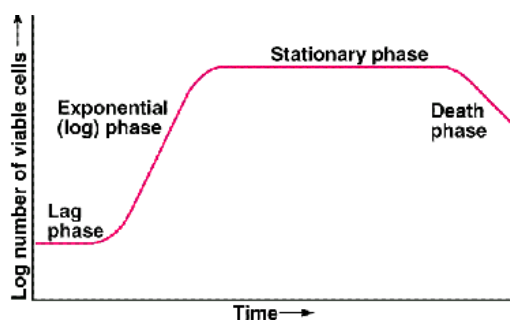
### *Crecimiento bacteriano*

El control eficaz del medio ambiente en el tratamiento biológico de las aguas residuales se basa en el conocimiento de los principios básicos que gobiernan los microorganismos.

#### CARACTERÍSTICAS DEL CRECIMIENTO

Las bacterias pueden reproducirse por escisión binaria, de forma sexual o por germinación. Generalmente, lo hacen por escisión binaria, es decir, por división, donde la célula original se transforma en dos nuevos organismos. El tiempo necesario para cada división, el tiempo de generación, puede variar desde días hasta 20 minutos. Esta es una cifra hipotética, ya que las bacterias no continúan dividiéndose indefinidamente a causa de diversas limitaciones ambientales, tales como:

- Concentración de sustrato.
- Concentración de nutrientes.
- Tamaño del sistema.



**Figura 10.** Modelo de crecimiento número de células

El modelo de crecimiento basado en el número de células tiene más o menos cuatro fases diferenciables:

- Fase de retardo: después de la adición de un inóculo en un medio de cultivo, la fase de retardo representa el tiempo requerido para que los organismos se aclimaten a sus nuevas condiciones de vida.
- Fase de crecimiento exponencial: durante este periodo, la célula se divide a una velocidad determinada por su tiempo de generación y la capacidad de procesar el alimento (tasa porcentual de crecimiento constante).
- Fase estacionaria: en este caso la población permanece estacionaria. Las razones que se apuntan para este fenómeno son que las células han agotado sus nutrientes necesarios para el crecimiento y que el crecimiento de nuevas células se regula con la muerte de células viejas.
- Fase de muerte logarítmica: durante esta fase, la tasa de muerte de las bacterias excede la producción de células nuevas. La tasa de muertes generalmente es función de la población viable y de las características ambientales. En algunos casos, la fase de muerte logarítmica es inversa a la fase de muerte exponencial.

El modelo de crecimiento puede discutirse según sea su variación con el tiempo de la masa de microorganismos. Este modelo de crecimiento se subdivide en tres fases:

- Periodo de crecimiento logarítmico: siempre hay una cantidad de alimento alrededor de los microorganismos. La tasa de metabolismo y crecimiento únicamente es función de la capacidad de los microorganismos de procesar sustrato.
- Fase de crecimiento decreciente: la tasa de crecimiento y por tanto la masa de bacterias disminuye por limitaciones en la disponibilidad del alimento.
- Fase endógena: los microorganismos se ven forzados a metabolizar su propio protoplasma sin reposición del mismo, ya que la concentración de alimento disponible está en mínimo. Durante esta fase, puede presentarse el fenómeno denominado lisis, según el cual los nutrientes que quedan en las células muertas se difunden con el objetivo de proporcionar alimento a las células existentes (crecimiento crítico).

- Todo lo que se acaba de explicar se refiere a una única población de microorganismos. Frecuentemente las unidades de tratamiento biológico se componen de complejas poblaciones biológicas mezcladas e interrelacionadas, en las que cada microorganismo del sistema tiene su propia curva de crecimiento. La posición y forma de una curva particular de crecimiento en el sistema es función del tiempo, depende de la alimentación y de los nutrientes disponibles y de factores ambientales como la temperatura y el pH, tanto si el sistema es aerobio como anaerobio.

#### 7.2.4. Cinética del crecimiento biológico

Las condiciones ambientales pueden controlarse mediante la regulación del pH, de la temperatura, adición de nutrientes y oligoelementos, adición o exclusión de oxígeno y también una mezcla correcta. El control de las condiciones ambientales asegurará que los microorganismos tengan el medio indicado donde poderse desarrollar.

Para asegurarse que los microorganismos crecen, se le ha de permitir que permanezcan en el sistema el tiempo suficiente para que se reproduzcan. Este periodo depende de la tasa de su crecimiento, la cual está en relación directa con la tasa con la que metabolizan o utilizan los residuos. Suponiendo que las condiciones ambientales están debidamente controladas, puede asegurarse una estabilización eficaz mediante el control de la tasa de crecimiento de los microorganismos.

Una relación desarrollada empíricamente entre el crecimiento biológico y la utilización del sustrato, que se utiliza con frecuencia en los sistemas biológicos es la siguiente:

$$\frac{dX}{dt} = Y \cdot \frac{dF}{dT} - K_d X$$

Donde:

$dX/dt$ : tasa neta de crecimiento de los microorganismos, en masa por unidad de tiempo.

$Y$ : coeficiente de producción o de crecimiento, en masa de microorganismos/masa de sustrato utilizado.

$dF/dt$ : tasa de utilización del sustrato por los microorganismos en masa por unidad de tiempo.

$K_d$ : coeficiente de desaparición de los microorganismos en tiempo<sup>-1</sup>.

$X$ : concentración de microorganismos, en masa/volumen.

Esta ecuación, u otras con pequeñas modificaciones, se ha ido utilizando con éxito por numerosos investigadores para describir los sistemas de tratamiento biológicos aerobios y anaerobios de residuos.

La tasa de utilización del sustrato puede aproximarse:

$$\frac{dF}{dt} = \frac{KXS}{K_s + S} = \frac{dS}{dt}$$

Donde:

K: tasa máxima de utilización de los sustratos por unidad de peso de microorganismos y por unidad de tiempo.

$K_s$ : concentración de sustrato por lo que la tasa de utilización del mismo por unidad de peso de microorganismos es la mitad de la tasa máxima, en masa/volumen.

S: concentración del sustrato que rodea los microorganismos, en masa/volumen.

Cuando un microorganismo autótrofo sintetiza nuevo material celular, la fuente de carbono es el  $\text{CO}_2$ . La fuente de energía para la síntesis celular es la luz o bien la liberada por una reacción inorgánica de oxidación-reducción.

Los nutrientes son a veces los factores limitantes del crecimiento y la síntesis celular en lugar del sustrato orgánico e inorgánico del agua residual. Las bacterias, como las células requieren nutrientes para el crecimiento, principalmente nitrógeno y fósforo, que no siempre se encuentran en cantidad suficiente en las aguas residuales. La adición de nutrientes en cantidades determinadas, puede ser necesaria para el crecimiento adecuado de las bacterias y la consecuente degradación de la materia residual.

## 7.3. Tratamientos aerobios de cultivo en suspensión

El bajo rendimiento de los tratamientos físico químicos en la reducción de la materia orgánica disuelta, ha hecho que se desarrollen los procesos biológicos de manera, que hoy en día, es impensable hablar de agua depurada sin relacionarla con un tratamiento biológico mediante fangos activados. La existencia de un elevado número de plantas físico químicas nos indica simplemente que todavía estamos en una primera fase en la depuración de aguas residuales, por lo que serán necesarias sucesivas ampliaciones de estas plantas hasta llegar a la obtención de un efluente que no produzca ningún efecto nocivo sobre el medio receptor.

El tratamiento por fangos activos, que se denomina comúnmente biológico, es indudablemente el proceso biológico más extendido para el tratamiento de aguas residuales. Han surgido variantes del sistema básico convencional, los cuales dan al tratamiento una versatilidad que le permite adaptarse a un amplio campo de circunstancias operacionales.

### 7.3.1. Tratamiento de fangos activos

Como cualquier tratamiento biológico, incluye el uso de microorganismos para descomponer y romper las cadenas orgánicas, con la formación al mismo tiempo de un fango floculado. Este tratamiento, similar a la autodepuración natural, se realiza por microorganismos aerobios y, por tanto, el control del oxígeno es de gran importancia.

El principio básico del proceso consiste en que las aguas residuales estén en contacto con un cultivo de población microbiana, en forma de suspensión floculante, en un sistema aireado y agitado. La materia en suspensión y la coloidal se eliminan rápidamente de las aguas residuales por adsorción y agregación a los flóculos microbianos. Esta materia y los nutrientes disueltos se descomponen después más lentamente por metabolismo microbiano, proceso



conocido como estabilización. En este proceso parte del material nutriente se oxida a sustancias simples, como el anhídrido carbónico, en un proceso llamado mineralización, y parte se convierte en una nueva materia celular microbiana, llamada asimilación. Parte de la masa microbiana se descompone también de la misma manera, proceso denominado respiración endógena. El proceso de oxidación suministra la energía necesaria para la operación de los procesos de adsorción y asimilación.

Una vez se consigue el grado de tratamiento deseado, la masa microbiana floculada, conocida como fango, se separa del agua residual en el decantador secundario o clarificador.

La mayor parte del fango decantado se devuelve o recircula a la etapa de aireación para mantener la concentración de fangos en el tanque de aireación y para que actúe como inóculo microbiano. De esta forma se consigue un fango activado que es el que realiza las operaciones de depuración.

Parte de los fangos se extraen para mantener el sistema en equilibrio, proceso que se conoce con el nombre de purga de fangos. En un sistema equilibrado, el fango purgado representa la cantidad neta de masa microbiana producida por asimilación en la etapa de aireación.

La alimentación de aguas residuales al tanque de aireación pasa normalmente por un proceso primario de tratamiento para disminuir la carga del efluente. No obstante, ciertas versiones del proceso de fangos activos se usan sin etapa primaria de tratamiento.

La concentración de nutrientes en las aguas residuales es suficiente para desarrollar un proceso biológico para fangos activos. Las aguas residuales industriales, que contienen un rango limitado de sustancias, pueden tener un balance nutritivo inapropiado para el metabolismo microbiano, y puede ser necesaria la adición de nutrientes suplementarios.

El balance de nutrientes necesarios ha de ser de 0,03 a 0,06 kg de nitrógeno por kg de DBO y de 0,07 a 0,01 kg de fósforo. Es decir, se ha de cumplir aproximadamente la relación entre el carbono-nitrógeno-fósforo de 100:5:1.

### *7.3.2. Sistemas de aireación prolongada (oxidación total)*

Los sistemas de aireación prolongada se utilizan principalmente en pequeñas estaciones depuradoras (<500 m<sup>3</sup>/día) dada la sencillez de la operación.

El diagrama de flujo de una unidad convencional es el mismo esencialmente al del proceso de fangos activos, se diferencian en que éste no necesita ningún tipo de retratamiento (excepto rejillas y tamices) ni sedimentación primaria.

El tiempo de residencia de los fangos es muy prolongado (más de 20 días), y de aquí su nombre, de tal forma que los fangos están totalmente en la fase de respiración endógena, donde la descomposición de los fangos excede el crecimiento de los mismos.

Se aplican largos tiempos de retención, de uno o dos días, por lo que la carga másica es muy baja (0,1 a 0,3 kg DBO/kg SS) y el volumen del tanque de aireación muy superior (3-6 veces) al de un tanque de aireación convencional.

Lógicamente, esto implica que su uso está limitado a estaciones depuradoras muy pequeñas (urbanizaciones, industria, etc.).

El elevado tiempo de retención permite reducciones de  $DBO_5$  superiores al 95%, con lo que el efluente tiene una calidad excepcional.

La producción de fangos activos es de 0,2 a 0,3 kg de sólidos por kg de DBO eliminada, valor muy bajo teniendo en cuenta que en un tratamiento biológico convencional la producción de fangos es aproximadamente de 0,5 kg SS/kg DBO. Esto es debido a que los fangos están poco activos al encontrarse en fase endógena.

La necesidad de oxígeno es de 1,25 kg  $O_2$ /kg DBO, un poco superior al convencional (1,1 kg  $O_2$ /kg DBO), aunque este incremento de coste energético queda compensado por el ahorro en el volumen de fangos, que normalmente se llevan a estaciones de secado, dado que el fango está prácticamente digerido (digestión aerobia), con poca tendencia a la putrefacción.

El bajo valor de carga másica puede producir el aumento de bacterias filamentosas y de espumas difíciles de retirar de los decantadores.

En el caso que exista oxígeno suficiente, se produce el efecto de nitrificación al ser la edad del fango elevada, por lo que existe la eliminación del  $NH_4^+$ . Si bien, supone un aumento importante del consumo energético, disminuyen notablemente los riesgos de bulking, posiblemente al existir más oxígeno, o por la desaparición del amonio.

Este tipo de plantas depuradoras permite hacer frente a las oscilaciones de la carga al existir mayor reserva de oxígeno en el tanque de aireación.

El proceso se utiliza principalmente en el tratamiento de aguas lácteas y vertidos industriales con alto contenido orgánico.

### 7.3.3. *Contacto-estabilización*

El proceso de contacto-estabilización es una modificación del sistema de fangos activados.



**Figura 11.** Diagrama de flujo contacto estabilización.

El agua residual se mezcla con el fango estabilizado y esta mezcla se somete a aireación en el tanque de contacto inicial en el cual el tiempo de retención es únicamente de 30 a 45 minutos. Durante este contacto inicial se separa una fracción apreciable de DBO, tanto en suspensión como disuelta mediante bioadsorción después de estar en contacto con el fango activo (de estabilización) y suficiente cantidad de oxígeno.

Se separa entonces el afluente clarificado y la purga del clarificador se hace en un tanque de estabilización donde se airea durante un tiempo de retención de 1,5 a 5 horas.

Durante este periodo de estabilización, la materia orgánica absorbida se degrada mediante degradación aerobia. El fango estabilizado abandona el tanque de estabilización en condiciones de inanición (fase de respiración endógena) y dispuesto, por lo tanto, absorber rápidamente residuos orgánicos en la fase de contacto, es decir, del agua de entrada. Este sistema es similar al de un selector en la depuración biológica convencional.

Debido a que únicamente el fango de reciclado se somete a aireación prolongada, este sistema permite una reducción notable del volumen de la balsa de aireación con respecto a un sistema convencional de fangos activados.

Los rendimientos globales de separación son un poco inferiores a los de un proceso convencional (80-90 %), por lo que se utilizan cuando el efluente está poco cargado, y especialmente cuando la mayor parte de DBO está en forma coloidal y en suspensión, ya que en este caso es más fácil la adsorción en la etapa de contacto.

Otra ventaja de este sistema es que la producción de fangos es muy inferior al de un tratamiento biológico convencional (fase de respiración endógena) y además no necesita pretratamiento ni decantación primaria.

Este sistema es muy útil para procesos industriales, ya que en el caso de vertidos fuertes no queda afectado el fango activo de estabilización sino simplemente el de contacto, por lo que son muy resistentes.

#### 7.3.4. *Lagunaje*

Una laguna aireada es un estanque en el que se trata el agua residual que lo atraviesa de forma continua. Son balsas con profundidades de 1 a 4 m en las que la oxigenación de las aguas residuales se realiza normalmente mediante turbinas o difusores.

La diferencia entre las lagunas aireadas y los sistemas de fangos activos es que en este se hace una recirculación del fango como forma de controlar la cantidad de fango biológico en el reactor de agitación.

La concentración de sólidos en las lagunas es función de las características del agua residual y del tiempo de residencia. Esta concentración está comprendida entre 80 y 200 mg/l, que es muy inferior a la que se utiliza en los tratamientos de fangos activos convencionales (2000-3000 mg/l).

El nivel de turbulencia (agitación) en las lagunas es la base para su clasificación en dos categorías: de mezcla completa y lagunas facultativas.

- Lagunas de mezcla completa

El nivel de turbulencia es suficiente para mantener los sólidos en suspensión y para proporcionar oxígeno disuelto a todo el volumen del líquido.

Los tiempos de residencia son normalmente inferiores a tres días, y los niveles de potencia de 0,007 CV por m<sup>3</sup> de balsa. Los niveles de potencia en las unidades de fangos activos están alrededor de 0,07 CV por m<sup>3</sup>, es decir, valores aproximadamente 10 veces superiores a los requeridos en las lagunas aireadas.

Según los tiempos de retención, el efluente de salida tendrá de una tercera parte a la mitad de la DBO del efluente de entrada. Pero antes que el efluente de salida se descargue, los sólidos se tienen que eliminar por sedimentación.

Se puede observar que si los sólidos son retornados a la laguna, no existe diferencia entre este proceso y un proceso modificado de fangos activados. Esta operación suele realizarse, si es posible, para mejorar el rendimiento por adsorción durante los meses de invierno.

Es útil también tener un decantador primario, ya que la carga del efluente de entrada se reduce notablemente, alrededor de un 35 %.

En las lagunas aireadas no existe proliferación de algas, ya que la turbidez y los SS del agua impiden el paso de la luz.

- Lagunas facultativas

En el caso de una laguna facultativa, aerobia-anaerobia, el contenido del estanque no está totalmente mezclado, y en la mayor parte de los sólidos entrantes y los sólidos biológicos producidos, sedimentan en el fondo de la laguna. Se presenta por tanto, una formación gradual de residuo que tiene que ser evacuado a intervalos de 1 a 10 años.

El nivel de turbulencia, a diferencia de las de mezcla completa, es insuficiente para mantener los sólidos en suspensión, solo hay la necesaria para suministrar el oxígeno disuelto en toda la masa del líquido. Parte de los sólidos decantan en el fondo donde sufren descomposición anaerobia. Los tiempos de retención superan normalmente los seis días y los niveles de potencia están normalmente comprendidos entre 0,001 y 0,007 CV por m<sup>3</sup> de balsa, inferiores a los de mezcla completa.

La razón del número de lagunas facultativas es debida a que en este tipo de lagunas existen tres zonas:

- a) Zona superficial con bacterias aerobias.
- b) Zona anaerobia inferior de fangos.
- c) Zona intermedia, en parte aerobia, donde la descomposición de los residuos orgánicos se lleva a cabo por las bacterias facultativas.

Una disposición que puede resultar muy satisfactoria es la formada por una laguna de mezcla completa en la que se consume la mayor parte de la de la DBO soluble, seguida por una laguna facultativa, diseñada fundamentalmente para la disminución de la DBO insoluble.

Las lagunas aireadas suelen ser usadas también como tratamiento terciario para mejorar la calidad del efluente biológico.

Para obtener efluentes de gran calidad es necesario un mayor tiempo de retención, o bien varias lagunas en serie.

## 7.4. fijo Tratamientos aerobios de cultivo

Los procesos de tratamiento aerobios de cultivo fijo se utilizan, normalmente, para eliminar la materia orgánica que se encuentra en el agua residual. También para hacer el proceso de nitrificación (conversión del nitrógeno amoniacal en

nitrate). Los procesos de este tipo incluyen los filtros percoladores, los filtros de pretratamiento o desbaste, los reactores biológicos rotativos de contacto (biodiscos) y los reactores de nitrificación de lecho fijo.

#### *7.4.1. Filtros percoladores*

El filtro percolador consiste en un lecho formado por un medio sumamente permeable al que se adhieren los microorganismos y a través del cual pasa el agua residual. El agua se rocía uniformemente sobre el relleno mediante un distribuidor rotativo de flujo.

El medio filtrante puede estar formado por piedras (en ocasiones también escorias), o diferentes materiales plásticos de relleno. En caso de filtros percoladores con medio filtrante de piedra, el diámetro de las piedras suele oscilar entre 2,5 y 10 cm. La profundidad del lecho varía en cada diseño pero suele situarse entre 0,9 y 2,5 m. Estos filtros suelen ser circulares. Los filtros percoladores que utilizan lechos de material plástico pueden tener diversas formas: circulares, cuadrados... con profundidades comprendidas entre 4 y 12 m. Se suelen utilizar tres tipos de medios filtrantes plásticos:

- Relleno de flujo vertical.
- Relleno de flujo transversal.
- Otras distribuciones.

Este tipo de filtros incorpora un sistema de drenaje inferior para recoger el líquido tratado y los sólidos biológicos que se hayan separado del medio. Este sistema es muy importante tanto por su acción colectora como por su acción aireadora. El líquido recogido se pasa a un tanque de sedimentación en el que se separan los sólidos y una parte se recircula al distribuidor rotatorio para diluir el agua residual entrante y para mantener la humedad de la película biológica.

La materia orgánica presente en el agua residual se degrada por la acción de los microorganismos adherida al medio. La capa de limo que se forma tiene un espesor comprendido entre 0,1 y 0,2 mm. Cuando los microorganismos crecen, aumenta el espesor de la película, y el oxígeno se consume antes que pueda atravesarla completamente por lo que se distinguen dos capas, una aerobia y otra anaerobia.

El espesor de la subcapa aerobia es función del agua residual aplicada y de su DBO. Cuanto mayor es la DBO del influente, menor será el espesor de esta capa ya que se da un consumo más rápido de oxígeno. Por otro lado, los caudales elevados favorecen el mantenimiento de una subcapa aerobia más espesa debido al oxígeno disuelto suministrado con el influente pulverizado. En los filtros modernos, el caudal se regula para asegurar un espesor uniforme de la película biológica ya que el proceso biológico aerobio tiene lugar en esta subcapa: el sustrato se oxida parcialmente para proporcionar la energía necesaria por el proceso biológico y la otra parte se destina a sintetizar nuevo material de constitución del limo.

En la subcapa anaerobia, la degradación tiene lugar con la formación de ácidos orgánicos,  $H_2S$  y  $CH_4$ .

Si la capa de limo supera los 2 mm puede presentarse una obstrucción del relleno, perjudicando el flujo del agua residual y la transferencia de oxígeno a los

microorganismos aerobios. De todas formas, la capa de limo es, en cierta medida, autorregulante, ya que a medida que aumenta el espesor, los microorganismos asociados a la superficie del relleno quedan sin la alimentación suficiente y tienden a pasar a la fase de respiración endógena en la que pierden la capacidad de adherirse a la superficie del medio y se desprende. En estas condiciones, el líquido arrastra la película y se inicia el crecimiento de una nueva capa biológica.

Para rendimientos en la disminución de la DBO de aproximadamente el 60 %, normalmente los filtros percoladores son más económicos que el proceso de fangos activados. En el caso de rendimientos superiores al 90% en la DBO, el proceso de fangos activados es más económico debido a que el coste del material de relleno podría resultar muy elevado. Esto sugiere la posibilidad de combinar ambos tratamientos en algunos casos. También en el caso de estaciones depuradoras de instalaciones industriales este sistema es más ventajoso que el de fangos activados ya que se trabaja con valores de la DBO muy altos y sin necesidad que el vertido tenga una calidad excesiva para llevar al alcantarillado.

Dado que las normativas de calidad del efluente tratado son muy restrictivas, el uso de filtros percoladores no es muy común en el tratamiento de las aguas residuales urbanas.

Algunas ventajas de los filtros sobre el proceso de fangos activados son:

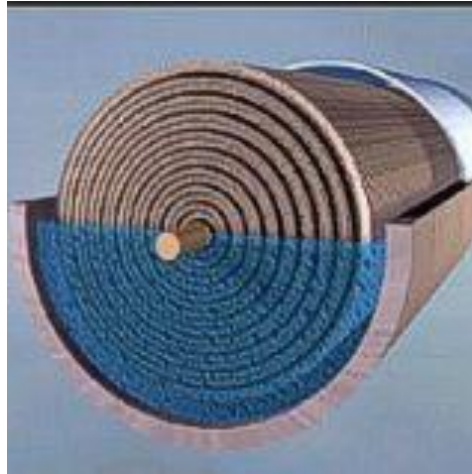
- No es necesaria energía para la aireación (sí para el bombeo).
- Es de operación más sencilla.
- Recuperación rápida en los cambios bruscos de la DBO.
- Menos sensibles a la presencia de sustancias tóxicas.

#### *7.4.2.*

#### *Biodiscos*

Los biodiscos o biorreactores están formados por una serie de discos no muy separados, normalmente fabricados de poliestireno o cloruro de polivinilo con un diámetro de 3 a 4 m. estos discos se mantienen paralelos entre sí y unidos a un eje horizontal que pasa a través de sus centros. Los ejes tienen una longitud de aproximadamente 7 m y pueden alojar de esta manera un gran número de discos.

La superficie del disco está aproximadamente sumergida en un 40% y giran lentamente a una velocidad de 1-2 rpm. Se forma gradualmente un limo biológico de 1 a 3 mm de espesor que se deposita en su superficie. La rotación de los biodiscos pone la biomasa en contacto, de forma alternativa, con la materia orgánica presente en el agua residual y con la atmósfera, por la adsorción del oxígeno. La rotación del disco induce a la transferencia de oxígeno y mantiene la biomasa en condiciones aerobias y también es el mecanismo de eliminación del exceso de sólidos en los discos por medio de los esfuerzos cortantes que origina y sirve para mantener en suspensión los sólidos arrastrados.



**Figura 12.***Biodiscos*

Hay que tener en cuenta que existe el riesgo de congelación del limo en climas fríos, al estar expuesta al aire una gran superficie húmeda. En este caso, se puede utilizar en edificios cerrados, lo que supondrá un incremento del coste.

Se pueden utilizar diversos biodiscos en serie para conseguir elevadas calidades de efluente, desde 10 hasta 20 ppm de DBO en la última etapa. Así, si están correctamente dimensionados constituyen un sistema muy fiable debido a la gran cantidad de biomasa presente y este hecho les permite resistir mejor las sobrecargas hidráulicas y orgánicas.

Las ventajas respecto a los fangos activados son las siguientes:

- Bajo consumo de energía.
- Mantenimiento más sencillo.
- Discos adicionales para necesidades puntuales.
- No necesita recirculación de biomasa.
- Buenas características de sedimentación de la biomasa en la clarificación secundaria.

# **CAPÍTULO 8: SISTEMAS DE AIREACION**

La selección de equipos de aireación es una tarea crítica en el proceso de una planta de fangos activados o de lagunaje aireado por tal de aportar el oxígeno que necesitan los microorganismos y también para conseguir una agitación y homogeneidad suficientes para asegurar un contacto íntimo entre estos, los elementos contaminantes y el oxígeno introducido. Los aireadores normalmente se pueden clasificar en:

- Unidades de difusión de aire.
- Aireadores mecánicos.

Realizan la aireación por borboteo de aire en zonas profundas de la balsa y se les denomina por término general de Aireadores por borboteo.

Un parámetro que es muy importante es la capacidad de transferencia de oxígeno expresada en kg de oxígeno por kw/h en condiciones normalizadas (20°C, 0,0 mg/l de oxígeno disuelto, y agua de la red de suministro como líquido de ensayo). Los ensayos y la evaluación de los Aireadores se llevan a cabo, normalmente, con agua limpia, desaireada con bisulfito sódico, en condiciones no estacionarias. A efectos de diseño, es necesario corregir los datos de rendimiento en condiciones normales a las condiciones reales de funcionamiento previstas.

## **8.1. Unidades de difusión de aire**

Las unidades de difusión tienen como objetivo la inyección de aire comprimido a presión, en la masa líquida, mediante difusores. Las unidades de difusión suelen ser soportes porosos, placas o tubos, se construyen de granos de sílice u óxido de aluminio que se incluyen en una masa porosa con cemento cerámico. Otras unidades utilizadas consisten en tubos recubiertos de nylon, Dacron, Saran... El aire comprimido pasa a través de estas partes porosas, formándose burbujas de aire que sirven para transferir el oxígeno, consiguiéndose también la turbulencia requerida.

La eficiencia de la transferencia de oxígeno depende de muchos factores, entre los cuales están los tipos, dimensiones y geometría de los difusores, el caudal de aire, profundidad y geometría del tanque, incluyendo la posición de las conducciones, de los difusores y de las características del agua residual.

Los difusores se dividen en dos grandes grupos, en función del tamaño de la burbuja.



### 8.1.1. *Burbuja fina*

Las pequeñas burbujas, que tienen una gran superficie por unidad de volumen, permiten un buen contacto sólido líquido, consiguiendo valores relativamente elevados de rendimiento de transferencia de oxígeno. Además, la velocidad de elevación es menor. El diámetro de las burbujas que salen de estos difusores es de 2-2,5 mm, dependiendo del tamaño de burbuja (entre 5-15 %). Los valores de eficacia de oxigenación se encuentran entre 2,5 y 3,6 kg de oxígeno/kWh.

Un inconveniente de las unidades de difusión de pequeños orificios son los altos costes de mantenimiento en algunas aplicaciones, debido a su obturación. Normalmente se utilizan filtros de aire para separar las partículas de polvo que pueden obstruir los difusores. Considerando que la pérdida de carga a través de los difusores finos es relativamente grande, esto se traduce en un aumento de los costes de operación de los compresores de aire.

### 8.1.2. *Burbuja grande*

Estas unidades utilizan grandes orificios, o bien, equipos de agitación hidráulica. Tienen rendimientos de transferencia de oxígeno inferiores a los de burbuja fina, ya que el área interfacial para la transferencia es considerablemente inferior pero tienen la ventaja de no requerir filtros de aire, exigiendo menos gastos de mantenimiento y menor potencia de los compresores de aire. El tamaño de la burbuja llega hasta 25 mm de diámetro. El valor de eficacia de oxigenación oscila entre 1 y 1,5 kg de oxígeno/kWh

## 8.2. Aireadores mecánicos

Los aireadores mecánicos se suelen clasificar en dos grupos en función de las principales características de diseño y de funcionamiento de eje vertical y de eje horizontal. Ambos grupos se subdividen en aireadores superficiales y aireadores sumergidos. En los primeros, el oxígeno se obtiene de la atmósfera; en los aireadores sumergidos el oxígeno se obtiene de la atmósfera y, en algunos tipos, a partir de aire u oxígeno puro que se introduce por la parte inferior del tanque. En todos los casos, la acción agitadora y de bombeo contribuye a mantener mezclado el contenido del tanque de aireación. Existe un gradiente de oxígeno según la altura que puede llegar a formar zonas muertas según la geometría del tanque. Aun así, hay que decir que las necesidades energéticas para mantener un régimen de flujo de mezcla completa con aireadores mecánicos es función de su diseño y de la geometría del tanque, laguna o depósito.

### 8.2.1. *Aireadores de superficie*

La transferencia de oxígeno en los aireadores de superficie se consigue por dos mecanismos:

- Mecanismo de turbulencia: transferencia en la superficie turbulenta del líquido.
- Mecanismo de dispersión: transferencia a las gotas esparcidos por las palas de la unidad.



**Figura 13.** Aireador de superficie

Debido a la evaporación de las gotas dispersadas, hay una disipación considerable de calor. El descenso de temperatura resultante puede dar lugar a congelaciones que pueden ocasionar problemas de funcionamiento de los aireadores, sobre todo los meses de invierno. Por este motivo, en las zonas de clima frío se prefiere el uso de aireadores de burbuja (con difusores o turbina) a los de superficie.

Se han obtenido eficiencias de hasta 4,2 kg de O<sub>2</sub>/kWh para diversos aireadores de superficie en plantas piloto. Los comerciales tienen eficiencias que oscilan entre 1,2 y 3,2 kg de O<sub>2</sub>/kWh

Los de eje vertical están diseñados para promover un flujo ascendente o descendente mediante un efecto de bombeo. Consisten en rotores sumergidos o semisumergidos en el centro del depósito de aireación que se pueden disponer sobre vigas o bien sobre flotantes de fibra de vidrio rellena de espuma de plástico, sobretodo en casos que existen variaciones en el nivel de agua. Éstos agitan violentamente la superficie del agua introduciendo aire en ella, y provocando rápidos cambios en la interfase aire-agua que facilitan la disolución del aire. Los impulsores o rotores se fabrican de acero, fundición, aleaciones no corrosivas y plástico reforzado con fibra de vidrio.

Otro tipo de aireador superficial es el de eje horizontal. Dentro de éstos encontramos el aireador Kessener de cepillo, elemento que se utilizaba para promover, simultáneamente, la circulación del agua y la aireación en canales de oxidación. Está constituido por un cilindro horizontal situado por encima del agua, en el que se habían montado una especie de púas, las cuales se sumergen en el agua y, al girar rápidamente el cilindro por la acción de un motor eléctrico, impulsaba el agua en su recorrido por el canal, favoreciendo la circulación e introduciendo aire en el agua residual. Hoy en día, las púas se han sustituido por piezas de acero en "L" o de otras formas, o barras o placas de plástico.

### 8.2.2. Aireadores sumergidos

Con este tipo de aireadores se obtienen eficiencias menores que los anteriores que están comprendidos entre 1,2 y 1,8 kg de O<sub>2</sub>/kWh

Con los aireadores sumergidos de eje vertical se introduce aire u oxígeno puro en el agua residual por difusión en la zona situado por debajo de los impulsores que se usan para dispersar las burbujas de aire y para mezclar el contenido del tanque por el efecto de corte de las palas del agitador, que giran a una cierta velocidad. Para sistemas que requieren poca oxigenación, es suficiente el

oxígeno suministrado por el aire que se atrae a través de la depresión creada por el propio motor (efecto de succión).



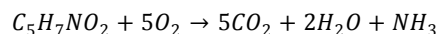
**Figura 14.** Aireador sumergible radial

Los aireadores sumergidos de eje horizontal funcionan por el mismo principio que los superficiales, con la excepción que la agitación del agua se hace con discos o paletas acopladas a ejes rotatorios. Los discos se sumergen en el agua residual entre una octava y tres octavas partes de su diámetro, y entran en el agua residual siguiendo un movimiento circular suave. Al girar el elemento, los espacios entre discos atrapan aire y lo introducen bajo la superficie del agua. Este espaciado es variable, y depende de las necesidades de oxigenación y de mezclado del proceso.

### 8.3. Necesidades de aireación

La cantidad teórica de oxígeno que se necesita en un aireador se puede calcular conociendo la DBO del agua residual y al cantidad de organismos purgados diariamente del sistema.

Si toda la DBO se transformara en productos finales, la cantidad total de oxígeno necesaria se calcularía convirtiendo la  $DBO_5$  a  $DBO_L$  utilizando el factor de conversión adecuado. Se sabe que la parte de la materia orgánica es transformada en nuevas células que inmediatamente son purgadas del sistema; por tanto, si la DBO de las células purgadas fuera eliminada del total, la cantidad restante representaría la cantidad de oxígeno que se ha de suministrar al sistema. La  $DBO_L$  de un mol de células puede evaluarse como:



(Células)

Podemos decir que la relación entre el oxígeno y las células es:

$$kg O_2/kg \text{ células} = 160/113 = 1,42 \rightarrow DBO_L (\text{células}) = 1,42 (\text{células})$$

Por tanto, la cantidad teórica de oxígeno que necesita un sistema de fango activado puede calcularse como:

$$O_2 (kg/dia) = [\text{alimento usado por dia}] - 1,42[\text{organismos purgados por dia}]$$

$$O_2(kg/dia) = \frac{dF}{dt} - 1,42 \frac{dX}{dt}$$

Si se conoce o se puede estimar la eficiencia de la transferencia de oxígeno, se podrá determinar la cantidad real de aire que será suficiente para mantener una

concentración mínima de oxígeno disuelto en todo el tanque de aireación de 1 a 2 ppm.

Cuando la aireación se realiza por medio de difusores, la cantidad de aire utilizada suele oscilar entre 3 y 12 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> para diferentes plantas, siendo 6 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> un antiguo valor empírico, que ya sirve porque el uso del aire depende del agua residual.

El suministro de aire será el adecuado no únicamente para satisfacer la DBO del agua sino también para la respiración endógena de los organismos del fango, y tendrá que proporcionar las condiciones de mezcla requeridas. Para valores de la relación alimento-microorganismos superiores a 0.3, la necesidad de aire en el proceso convencional se eleva de 31 a 56 m<sup>3</sup>/kg DBO eliminada. Para valores de eficiencia menor, la respiración endógena, la nitrificación y los periodos largos de aireación aumentan el uso de aire hasta a 75-110 m<sup>3</sup>/kg DBO eliminada. Las Ten States Standards exigen que el sistema de difusión de aire sea capaz de proporcionar el 150 % de la capacidad normal, que se supone que es de 62 m<sup>3</sup>/kg de DBO, en el agua residual aplicada en los tanques de aireación. Se requiere un caudal de aire de aproximadamente 0.28 m<sup>3</sup>/min por metro de longitud del tanque para conseguir velocidades de mezcla adecuadas y evitar así la deposición de sólidos.

## 8.4. Diseño de tanques de aireación

Los tanques de aireación se suelen construir de hormigón armado y abiertos al aire libre. La forma rectangular permite la construcción adosada de tanques aprovechando paredes comunes. La capacidad total necesaria del tanque se ha de determinar a partir del diseño del proceso biológico. A menudo se construye un número mayor de tanques al necesario para facilitar el mantenimiento y flexibilizar la explotación. Aunque las burbujas dispersadas en el agua residual ocupan cerca del 1 % del volumen del tanque, este hecho no se tiene en cuenta en el dimensionado. Normalmente el volumen ocupado por las conducciones sumergidas es despreciable.

Sin duda, la geometría del tanque tendrá una incidencia importante en la eficiencia de la transferencia de oxígeno y en el grado de mezcla conseguido. La profundidad del agua residual en el tanque se tendría que situar entre 4,6 y 7,6 m para que los difusores puedan trabajar eficazmente. Por encima de la superficie libre del agua, se tiene que contemplar un resguardo de 0,3 a 0,6 m. la relación anchura/profundidad de los tanques puede variar entre 11 y 2,2:1, siendo la relación más frecuente la de 1,5:1. La relación longitud anchura de canal tiene que ser, al menos, de 5:1. En los casos en los que se utilicen sistemas de difusión de aire de mezcla completa, se puede reducir la relación longitud/anchura para abaratar los costes de construcción.

En plantas de grandes dimensiones, los tanques suelen ser alargados, superando en ocasiones, los 150 m por tanque.

En caso que dispongamos de difusores en ambos lados o en el centro del tanque, se pueden permitir mayores anchuras. El punto importante es la limitación de la anchura para evitar la formación de puntos muertos o zonas de mezclado insuficiente. Las dimensiones y proporciones de cada unidad independiente tienen que ser tales que aseguren el mantenimiento de velocidades de flujo

adecuadas para evitar deposiciones de sólidos en el fondo. Se pueden colocar tabiques o deflectores triangulares longitudinalmente para eliminar la formación de zonas muertas.

Los tanques individuales dispondrán de válvulas o compuertas de entrada y de salida que permitan dejar el tanque fuera de servicio para su inspección y reparación. Por tanto, las paredes comunes de dos tanques adosados resistirán la totalidad de la presión hidrostática procedente de ambos lados. Se aconseja que los tanques de aireación dispongan de un sistema de vaciado y en caso de plantas de grandes dimensiones conviene instalar válvulas específicas para trasvasar fangos en el fondo de los tanques. En plantas pequeñas resulta práctico el uso de pequeñas bombas portátiles para el vaciado.

## 8.5. Sistemas de control de espumas

El agua residual suele contener jabón, detergentes y otros agentes tensoactivos que producen espumas durante la aireación del agua residual. Si la concentración de sólidos suspendidos en el líquido es elevada, la tendencia a la formación de espumas se minimiza.

Durante la puesta en marcha del proceso, en presencia de agentes tensoactivos, se pueden formar grandes cantidades de espuma. Este hecho da lugar a la formación de espumas que contienen sólidos del fango, grasas y grandes cantidades de bacterias del agua residual. El viento puede llevársela de la superficie del tanque y extenderla por los alrededores, contaminando todo lo que toque. Además de la antiestética, constituye un riesgo para los trabajadores.

Es importante disponer de algún método que permita controlar la formación de espumas. Un sistema común de aplicación es el de disponer una serie de rociadores a lo largo del lado superior del tanque de aireación, frente a los difusores de aire. El rociado con agua limpia o efluente tamizado rompe físicamente la espuma mientras se está formando. Otra posibilidad consiste en dosificar pequeñas cantidades de productos químicos antiespumantes a la entrada del tanque de aireación o preferiblemente en el agua de rociado.

# **CAPÍTULO 9: DECANTACION SECUNDARIA**

La función del decantador en el proceso de fangos activados es separar los sólidos de los lodos del líquido de mezcla. La separación de sólidos es un punto crítico en cualquier proceso de este tipo debido a la gran cantidad de sólidos floculantes que se generan. Además estos sólidos tienden a formar una capa de espesor variable. En condiciones de caudal punta, si la capacidad de la bomba de recirculación de fangos o las dimensiones de los tanques no son las adecuadas, esta capa puede ocupar toda la profundidad del tanque y sobresalir por el rebosadero.

Por esto, hay que tener presentes una serie de factores a la hora de diseñar un tanque de sedimentación como los tipos de tanques, características del fango, profundidad del agua, etc.

## **9.1. Tipos de tanques**

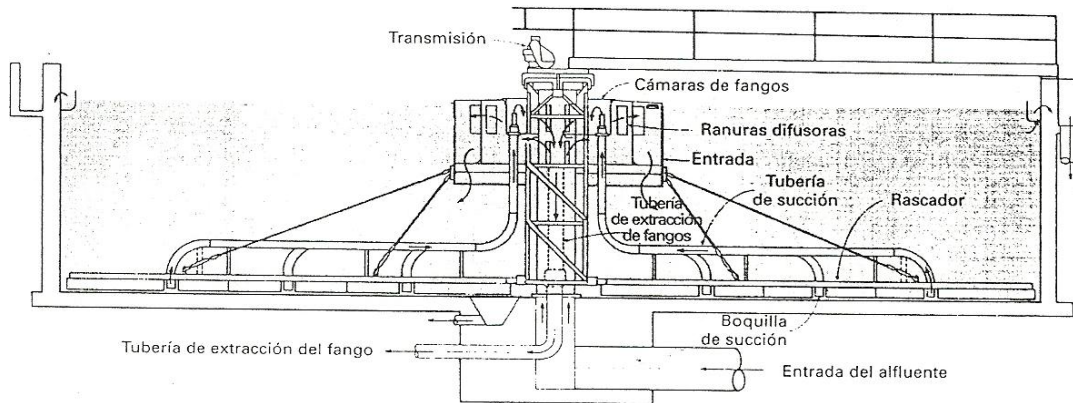
Los tipos de tanques de sedimentación de fangos activados comúnmente empleados son los tanques circulares y rectangulares aunque algunas veces se utilizan tanques cuadrados pero no son tan eficaces en la retención de sólidos separados como los circulares o rectangulares porque puede haber acumulaciones.

Los tanques circulares se suelen construir con diámetros que van de 10 a 40 m de diámetro aunque es recomendable que el radio del tanque no exceda en cinco veces la profundidad del agua en la periferia del tanque. El agua de alimentación puede entrar por la parte central o bien por la parte periférica, distinguiéndose de esta manera dos tipos de tanques. Para transportar y evacuar el fango del fondo del clarificador se utilizan mecanismos rotatorios en todos los casos, aunque también hay los que rascan el fondo y arrastran el fango hacia la zona central y otros que succionan el fango del fondo directamente ya sea por bombeo o por reducción de la altura estática.

Los tanques rectangulares tienen que ser capaces de proporcionar una adecuada distribución del caudal par que las velocidades horizontales no sean excesivas. Se recomienda que la longitud total del tanque no exceda de 10 a 15 veces su profundidad. En este tipo de tanques. Para eliminar los fangos depositados, se utilizan rascadores múltiples del fondo o puentes de translación, similar a un puente grúa, que se desplaza a lo largo de los laterales del tanque y que sirve de soporte para el rascador o para el colector por succión.

Sea cual sea la forma del tanque, el sistema de recogida de fangos tendrá que satisfacer estas dos condiciones:

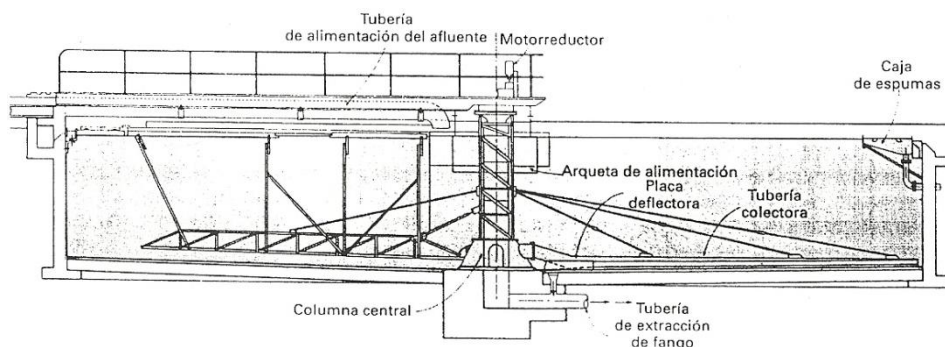
- Capacidad suficientemente elevada como para que cuando se trabaje con una relación de recirculación elevada, no se produzca la succión del líquido existente en la parte superior a través del fango.
- Mecanismo suficientemente robusto para poder transportar y extraer los fangos muy densos que se pueden acumular en el tanque de sedimentación en periodos de parada.



**Figura 14.** Tanque sedimentación de fangos.

La eficiencia de los decantadores convencionales o poco profundos se puede mejorar mediante la instalación de tubos o placas paralelas para establecer un régimen de flujo laminar. Estos decantadores construidos con paquetes de tubos o de placas dispuestas con ángulos determinados con la horizontal (normalmente  $60^\circ$ ). Dan lugar a una distancia de sedimentación muy pequeña, y las pequeñas dimensiones de los tubos ayudan a amortiguar el flujo. El fango que se recoge en estas placas o tubos tiende a salir por gravedad pero pueden presentarse casos de obstrucción de los tubos debido a la acumulación de grasas y crecimientos biológicos.

Para mejorar el rendimiento del proceso de fangos activados con canales de oxidación, se han desarrollado decantadores integrados. Este tipo de elementos permiten la separación de sólidos y la recirculación de fangos dentro del mismo canal de aireación.



**Figura 15.** tanque de sedimentación de fangos con canales de oxidación

## 9.2. Factores de diseño

Los sólidos de los fangos activados tienen un peso específico tan cercano al del agua que el aumento de la densidad y de la viscosidad que experimenta el agua en las épocas invernales afecta negativamente a las propiedades de sedimentación. Además, también pueden variar debido a cambios de la composición del agua residual, composición de la vida microbiana del flóculo, etc. Por este motivo es necesario adoptar criterios de proyecto conservadores que eviten el escape ocasional de sólidos del fango.

Para obtener un buen funcionamiento del tanque diseñado, se han desarrollado las siguientes funciones:

- Separación de los sólidos suspendidos del líquido de mezcla del agua residual tratada dando como resultado un efluente clarificado.
- Espesamiento del fango de recirculación.

Ambos factores están influenciados por la profundidad del decantador y por eso se critica la elección de ésta para tener una buena eficiencia en la eliminación de sólidos y en la concentración del fango de recirculación. La tendencia es aumentar la profundidad para mejorar el rendimiento global de la instalación, la flexibilidad de explotación y tener un mayor margen de seguridad ante los cambios en el proceso. La profundidad suele oscilar entre 3.7 m y los 6.1 m. en el momento de seleccionar una profundidad de agua, es necesario tener en cuenta los costes de construcción del tanque y que el rendimiento también depende de otros factores como el diseño de la entrada de agua o el espesor de la capa de fangos entre otros.

En general, el área necesaria para la decantación se ha de basar en la carga de superficie equivalente a la menor partícula a eliminar del líquido decantado en las zonas superiores del tanque de sedimentación para que no exista una distribución uniforme cuanto el tamaño y forma de la partícula sino que hay una gran variedad. Con frecuencia, la velocidad de sedimentación de los sólidos a separar se determina mediante el ensayo o la experimentación en plantas piloto con concentraciones similares a las de operación de la planta.

El área necesaria para el espesamiento del líquido mezcla depende del flujo de sólidos límite que puede ser transportado al fondo del tanque de sedimentación. Debido que el flujo de sólidos depende de las características del fango, se tienen que realizar ensayos de sedimentación. También es muy importante la profundidad de la zona de espesamiento porque se ha de asegurar un cierto espesor para evitar la recirculación de fangos no espesados y para almacenar temporalmente los sólidos.

El diseño de la entrada al tanque es también un factor a tener en cuenta ya que una mala distribución o la entrada del agua al tanque a gran velocidad puede aumentar la formación de corrientes de densidad y la resuspensión del fango sedimentado, reduciendo el rendimiento del decantador. Las velocidades de entrada típicas en orificios oscilan entre 0,075 y 0,150 m/s. los dispositivos de entrada al tanque tienen que:

- Disipar la energía del agua entrante.



- Distribuir uniformemente el flujo, tanto en sentido vertical como en sentido horizontal.
- Eliminar las corrientes de densidad.
- Minimizar las perturbaciones en la capa sedimentada.
- Favorecer el proceso de floculación.

El sistema de alimentación más común es el central y se utilizan pequeños deflectores con faldones. Para eliminar las corrientes se dispone de una campana difusora o bien de un clarificador-floculador y para minimizar las perturbaciones

Se suele colocar la entrada de la alimentación bastante lejos de la interfase de la capa de fango. La campana difusora tiene que tener un diámetro no inferior al 25% del diámetro del tanque. En casos de sedimentadores-floculadores con alimentación central, se favorece la floculación de un líquido mezcla poco avanzado en el proceso a base de una floculación lenta en la campana de alimentación (diámetro comprendido entre el 30 y el 35 % del diámetro del tanque).

La ubicación del desagüe también se tiene que estudiar porque la formación de corrientes de densidad puede hacer que el agua que salga del decantador presente fangos y otros sólidos en suspensión. Se comprueba experimentalmente que la ubicación óptima de los desagües para obtener un efluente bien clarificado se sitúa entre las dos terceras partes y las tres cuartas partes del radio medido desde el centro. Los decantadores circulares se construyen con desagües tan cerca del centro como del perímetro. Si se instalan desagües perimetrales o en la pared final de los tanques rectangulares, es necesario disponer de un deflector horizontal para desviar las corrientes de densidad hacia el centro del tanque y alejarlos del desagüe.

En muchas plantas de tratamiento secundario bien operadas se produce poca espuma. Aunque, a veces aparecen dificultades operacionales con los fangos, que se desarrollan más adelante, en las que aparecen materias flotantes que se tienen que eliminar. En las instalaciones en las que no existan decantadores finales es fundamental. Los métodos típicos de recogida incluyen las cajas de flotantes con rampa de rascado o rastrillo superficial periférico que empuja las materias hacia una tolva para su eliminación.

### *9.2.1. Carga de superficie y carga de sólidos*

Como se ha mencionado anteriormente, los fangos presentan un peso específico tan parecido al del agua que cualquier variación de las condiciones del agua afecta negativamente al rendimiento del decantador. Por este motivo, los criterios de diseño son conservadores para no tener pérdidas intermitentes de sólidos de fango en el efluente. Debido a la gran cantidad de sólidos que se pueden escapar, los cálculos se han de buscar en las condiciones de caudal punta.

Es recomendable la realización de estudios en planta piloto para evaluar las características de sedimentación del líquido mezcla o la concentración de sólidos suspendidos en condiciones que engloben una gamma de temperaturas que sea representativa de la media y más fría que puedan darse. Aunque, existen valores publicados de cargas de superficie y de sólidos en caso que no se puedan realizar

los ensayos de sedimentación, siempre referidos al caudal del agua residual por metro cuadrado de la superficie del tanque en lugar del caudal del líquido mezcla debido a que la carga de superficie es equivalente a una velocidad de flujo ascensional y no influye en ésta el caudal de fango de recirculación es extraído por la parte inferior.

La carga de sólidos en un tanque de sedimentación de fango puede calcularse dividiendo los sólidos totales aplicados, por el área superficial del tanque. Representa un valor característico de una determinada suspensión. En un tanque de sedimentación de una determinada superficie, se produce un deterioro del efluente.

# **CAPÍTULO 10: PARÁMETROS DE OPERACIÓN EN PLANTA BIOLÓGICA**

## **10.1. Parámetros de operación**

Los parámetros de operación más importantes en una planta biológica son los siguientes:

- MLSS: sólidos suspendidos del licor mezcla ( $SS_A$ ).
- $V_{30}$ : volumen ocupado por el fango decantado durante 30min.
- $O_2$ : medido con electrodo de  $O_2$ .
- $SS_R, SS_A$ : sólidos suspendidos de la recirculación.

El  $V_{30}$  es el parámetro que nos indica la decantabilidad del fango, y se calcula midiendo el volumen que ocupa en un cono IMHOFF (o en una probeta) 1 litro de fango que se deja decantar durante 30 min.

Los  $SS_R$  y  $SS_A$  son dos parámetros fundamentales que nos permiten calcular el caudal de pura y el caudal de recirculación. En este caso, un aumento de la

purga del decantador secundario implica una disminución en los  $SS_A$  (suponiendo  $SS_R$  constante) y a la inversa.

El  $O_2$  es el parámetro de operación más importante en un proceso biológico. Cualquier alteración produce efectos importantes sobre la población microbiana, modificando por tanto el proceso. En general, se tiene que trabajar con valores altos de  $O_2$ , entre 2 y 4 ppm o más, ya que a valores inferiores, tal como indica la bibliografía, se producen bajos rendimientos del proceso biológico, especialmente en invierno, y por otro lado se favorece el aumento de bacterias filamentosas, debido al riesgo que existan zonas anóxicas.

A partir de los parámetros anteriores, se pueden calcular otra serie de parámetros que, dependiendo de los anteriores, permiten reforzar el control del proceso. Son los siguientes:

### 10.1.1. Índice volumétrico de fangos (IVF)

$$IVF (ml/g) = 1000 \cdot [V_{30}(ml/l)/SS_A(mg/l)]$$

Los valores usuales del IVF/SVI oscilan entre 100 y 200 ml/g. aumentos graduales del IVF implican una peor decantabilidad y casi con seguridad un aumento de bacterias filamentosas que finalmente pueden provocar un bulking (fango ascendente).

Para cada planta existe un IVF determinado por el cual se produce generalmente un bulking (200-500 ml/g).

### 10.1.2. Tiempo de retención ( $t_R$ )

el tiempo de retención es el tiempo de contacto entre las aguas residuales y los fangos activados:

$$t_R = V_A/Q \rightarrow m^3/(m^3/h) = horas$$

Como  $V_A$  es constante, el tiempo de retención es inversamente proporcional al caudal. Por este motivo, durante la noche, el  $t_R$

Aumenta notablemente, y como la carga orgánica disminuye también considerablemente, la calidad del efluente es muy superior.

En general, para dar un valor determinado para una planta, se calcula el  $t_R$  medio diario:

$$T_{RM} = V_A/Q_m$$

Este término tiene que ser como mínimo un valor de 6 h, aunque en las plantas de media y alta carga, aumenta hasta a 8 h (6 h en el caudal punta). Lógicamente, cuanto mayor sea  $t_{Rm}$ , es decir  $V_A$ , mayor calidad de agua tendrá el efluente que se puede obtener, por este motivo este es un parámetro de diseño muy importante.

En el caso de tener una planta con valores muy pequeños de  $t_{Rm}$ , es decir, un volumen de aireación muy pequeño o una pequeña carga de entrada muy alta ( $DBO > 400$ ), se utilizará oxígeno puro para aumentar el rendimiento del proceso, o bien un tratamiento fisicoquímico de precipitación.

### 10.1.3. Carga másica ( $C_M$ )

Se define la carga másica como el cociente entre la cantidad de materia orgánica biodegradable a eliminar y la cantidad de sustrato que tenemos para realizarlo:

$$C_M = \frac{Q \cdot BOD}{V_A \cdot SS_A} = \text{kg BOD/kgSS}$$

Los valores usuales indican que la carga másica tiene que oscilar entre 0.3 y 0.5 kg DBO/kg SS. Suponiendo un caudal aproximadamente constante, un aumento en la carga de entrada implica un incremento de la carga másica, por lo que se tendrá que aumentar los  $SS_A$  para mantener  $C_M$  constante, es decir, se tendrá que aumentar la concentración de fangos activados para tener un mayor número de microorganismos capaces de eliminar el exceso de carga del efluente.

Cuanto menor sea la carga másica, mejor será la calidad del efluente tratado.

En algunos tipos de aguas, se tiene que utilizar el término  $SS_{AV}$ , sólidos suspendidos de aireación de volátiles, que nos indica el tanto por ciento efectivo de la concentración de fangos activados. Como en aguas residuales estos valores oscilan entre un 85-90 %, su inclusión en la fórmula no varía excesivamente los valores DE  $C_M$ .

### 10.1.4. Edad del fango (TRF)

La edad del fango o tiempo de residencia es uno de los parámetros de operación más importantes en el proceso biológico. Se define como la cantidad total de sólidos en los fangos activados del sistema, dividido por la tasa de pérdida de sólidos en los fangos del sistema.

$$TRF = \frac{V_A \cdot SS_A}{Q_P \cdot SS_P + Q \cdot SS_S} \text{ (dias)}$$

Teniendo en cuenta que  $SS_S \ll SS_P$ , y que  $SS_P = SS_R$ , la fórmula anterior se simplifica:

$$TRF = \frac{V_A \cdot SS_A}{Q_P \cdot SS_R}$$

Suponiendo  $SS_R = 2SS_A$  para un proceso de equilibrio se obtiene finalmente que:

$$TRF = \frac{V_A}{2Q_P}$$

Un valor bajo de TRF implica la existencia de un fango joven, con alta tasa de crecimiento y, por tanto, con alta actividad. Así, se puede considerar el significado del TRF como un parámetro opcional que permite controlar la actividad de los fangos.

### 10.1.5. Caudal de recirculación

El caudal de recirculación tiene que ser suficiente para que el fango activado no se acumule en el decantador, ya que las condiciones anóxicas en el fondo del mismo pueden provocar una disminución de la población microbiana, pero tampoco puede ser un valor muy alto porque entonces se aumenta la carga del decantador ( $Q+Q_R$ ), y podrían haber problemas de espesamiento de flóculos.

Para aguas residuales urbanas, el valor usual es  $Q_R=Q$ . En un sistema en equilibrio se cumple realizando el balance de masas:

$$(Q + Q_R) \cdot SS_A = Q_R \cdot SS_R$$

Por lo que sí:

$$Q_R = Q \rightarrow SS_R = 2SS_A$$

La finalidad de la recirculación de fango es mantener una concentración suficiente de fango activado en el tanque de aireación, de manera que se pueda obtener el grado requerido de tratamiento en el intervalo de tiempo deseado. La recirculación de fango activado desde el clarificador hasta la entrada del tanque de aireación es la característica esencial del proceso. El fango se ha de extraer de los tanques de sedimentación tan pronto como se formen. No es aconsejable utilizar un tiempo excesivo de retención para que se forme un fango denso con la finalidad de minimizar el bombeo, ya que esto puede dar lugar al deterioro del fango. La capacidad de la bomba de recirculación de fangos tiene que ser grande para no tener pérdidas de sólidos de fangos en el efluente. La razón de esto es que los sólidos tienden a formar una capa gruesa de fangos en el fondo del tanque que varía de grosor de tanto en tanto y puede llegar a llenar toda la profundidad del tanque en momentos de caudal punta, si fuera inadecuada la capacidad de la bomba de purga. Las capacidades del 20 al 30 %, que en el pasado se solían dar a este tipo de bombas son insuficientes, y actualmente se utilizan en plantas grandes del 50 al 75 % del caudal de agua residual, y del 100 % en plantas pequeñas.

En general, las bombas de recirculación de fango tienen que funcionar de manera que el caudal de recirculación sea aproximadamente igual a la relación porcentual del volumen ocupado por los sólidos sedimentables procedentes del efluente del tanque de aireación con el volumen del líquido clarificado después de una sedimentación durante 30 minutos en un cilindro graduado de 1000 ml. Esta relación no podrá ser menor del 15 % en ningún caso.

## 10.2. Control del proceso

A través de todos los parámetros descritos en el apartado anterior, que están relacionados entre sí, se pueden hacer una serie de consideraciones.

Un aumento de  $SS_A$  implica una disminución de carga másica y un aumento de la edad del fango, ya que para aumentar  $SS_A$  hay que disminuir  $Q_p$ . Es decir, por un lado tenemos una posible mejora en el tratamiento debido a la disminución de  $C_M$ , pero por otro lado disminuimos la actividad del fango al aumentar TRF. La bibliografía existente, y tal como funciona gran parte de las depuradoras biológicas, usa el criterio anterior, manteniendo los siguientes valores:

**Tabla 7.** Parámetros de operación

$SS_A$	2000-3000 ppm
$C_M$	0.3-0.5 kg DBO/kg SS
TRF	3-4 días
$O_2$	1-2 ppm

Este sistema de funcionamiento lleva generalmente a la formación de bacterias filamentosas y posterior bulking.

Por este motivo, se tiende a disminuir la edad del fango de forma que este tiempo sea inferior el de crecimiento de bacterias filamentosas. Al disminuir la edad del fango disminuyen proporcionalmente los  $SS_A$  y aumentan  $C_M$ , por lo que los parámetros característicos presentan los siguientes valores:

**Tabla 8.** *Parámetros característicos*

TRF	1.5-2 días
$C_M$	0.6-1.0 kg DBO/kg SS
$SS_A$	1000-1500 ppm

El gran aumento de la carga másica, compensado por la mayor actividad de los fangos, supone también un proceso equilibrado lo que permite obtener buenos resultados pero se tendrá que aumentar la cantidad de  $O_2$  disuelto a 2-4 ppm. Esto no supone un aumento del consumo, ya que al ser el fango mucho más joven, su rendimiento expresado en kg de oxígeno/kg de DBO es superior. Es decir, cuanto menor es la cantidad de fangos en el sistema ( $SS_A$ ), también es menor la aportación de energía.

La temperatura, que también afecta al rendimiento del proceso biológico, permite trabajar en verano con menos  $SS_A$  que en invierno, y por este motivo, con menor coste energético.

En general, hay que indicar que un aumento notable del IVF siempre es peligroso, por lo que se ha de pasar del sistema habitual al acelerado, ya que su eliminación mediante un aumento de purga es totalmente necesaria.

En resumen, en una planta biológica se ha de trabajar con la menor edad de fango posible de forma que el aumento de la carga másica no sea suficiente para producir el enturbado del efluente. En caso de entrar en una fase de bulking, generalmente se realizan cloraciones en la recirculación de fangos.

### 10.3. Control del efluente biológico

La mayor parte de los controladores utilizados para el influente, de tipo continuo o esporádico, se pueden usar con el efluente, de forma que se obtengan los rendimientos promedios de la estación depuradora, tanto en los parámetros de control básicos como aquellos que son debidos a los vertidos industriales.

En aquellas depuradoras biológicas en las que existan fenómenos de nitrificación-desnitrificación, es necesaria la determinación de nitritos y de nitratos para evitar problemas de desnitrificación. Por otro lado, se puede comprobar que en estas plantas con nitrificación disminuye notablemente el contenido de nitrógeno amoniacal, y se producen menos bacterias filamentosas, por lo que en cierto modo se puede considerar al  $NH_4^+$  como un tóxico.

Dentro del control de todo el proceso biológico existen diversos equipos que pueden darnos información del influente, del proceso y del efluente.

### 10.3.1. *Toxiguard*

El toxiguard es un equipo online ideal para la prevención del sistema biológico. su funcionamiento es muy sencillo:

- Se airea la muestra hasta la saturación (poca cantidad).
- Se pasa por un biológico pequeño con discos como soporte (se consume todo el O<sub>2</sub>).
- Se mide el O<sub>2</sub> final. Si existe alguna pequeña cantidad de oxígeno, significa que el biológico ha estado atacado por un biológico.

### 10.3.2. *Microtox (test de luminiscencia)*

Es una prueba rápida para determinar la toxicidad de sustancias líquidas (agua, soluciones) o sólidas (suelo, sedimentos), la cual utiliza una bacteria marina luminiscente (*Vibrio fischeri*), que se encuentra liofilizada. Se obtienen resultados en un máximo de 15-30 minutos. Este procedimiento incluye la medición de la luminiscencia en una suspensión de bacterias y la posterior medición de este parámetro en varias diluciones de la muestra a distintos periodos de tiempo (los más comunes son 5 y 15 minutos). Los cambios en la emisión de luz en cada dilución son ajustados con los cambios que ocurren naturalmente en la muestra control. Es posible determinar la toxicidad aguda de una muestra, debido a que la emisión de luz de la bacteria decrece en la presencia de sustancias tóxicas, ya que éstas interfieren en su metabolismo.

- <100 %      —> muestras no tóxicas.
- 10-100 %    —> muestras poco tóxicas.
- 1-10 %      —> muestras tóxicas.
- 0,1-1 %     —> muestras muy tóxicas.
- <0,1 %      —> muestras altamente tóxicas y peligrosas.

### 10.3.3. *Plantas piloto*

Dan una idea del efluente que obtendremos, aunque existen problemas de escala, en general únicamente son útiles como estudios iniciales. También son necesarias por los diferentes estudios que se pueden realizar.

Respecto al control de proceso en previsión de posibles problemas en la cantidad del efluente, se ha de destacar la posibilidad de realización de estudios microbiológicos tanto a nivel básico de protozoos como de bacterias filamentosas, y otros derivados con la formación y tipo de flóculos. Este tema es fundamental para el control global de una estación depuradora.

Respecto al efluente en sí, el control mínimo necesario que nos indica el estado y funcionamiento de la planta son los SS y la DBO. Realmente existe una relación clara de los SS con la DBO en una planta depuradora en condiciones normales, por lo que el control de los SS es generalmente suficiente, ya que el análisis de la DBO no se obtiene pasados 5 días, con lo que el resultado es puramente informativo.

Además, existe una relación precisa (superior al 90% de correlación) entre los SS y la turbidez, especialmente en las muestras del efluente. Por tanto, la utilización de turbidímetros en continuo nos permite conocer en cada momento el estado de nuestra planta y modificar el proceso en cuanto se observa el mínimo problema.

En general, para los procesos biológicos se cumple que:

$$SS = 1 + 1.8T$$

Y en los procesos fisicoquímicos:

$$SS = 7 + 1.1T$$

Indica que no se pueden obtener valores muy bajos de SS en los procesos fisicoquímicos, mientras que en los biológicos no existe prácticamente límite inferior, ya que la turbidez puede llegar a valores de 1-2 NTU.

En una planta biológica con bulking filamentoso, se observan aumentos exponenciales de turbidez en las horas punta de caudal.

En una depuradora biológica con falta de oxígeno, se observa un aumento gradual de la turbidez a medida que transcurre el día (mayor carga).

Un proceso biológico en perfecto estado implica una medida de turbidez prácticamente idéntica durante las 24 horas del día.

# **CAPÍTULO 11: TRATAMIENTO DE LOS FANGOS**

Los cuerpos contaminantes y sus productos de transformación, retirados de la fase líquida de cualquier tipo de tratamiento de agua, cualquiera que sea su naturaleza, se reúnen finalmente en suspensiones más o menos concentradas, denominados fangos.

La característica común de todos los fangos es que constituyen un residuo líquido viscoso, de valor escaso o nulo. Por otro lado, todos son fermentables y pueden producir olores nauseabundos, por lo que es necesario su tratamiento antes de su vertido al medio natural.



Normalmente os fangos se presentan en forma líquida o líquida semisólida conteniendo entre el 0.25-12 % de sólidos.

## 11.1. Características del fango

Las características del fango varían según su lugar de origen, el envejecimiento que tenga lugar y el tipo de proceso al que esté sometido.

El fango activado tiene normalmente un aspecto marrón floculento. Si su olor es muy oscuro, es posible que esté en condiciones sépticas. Si el color es más claro

Que el normal, puede haber existido una falta de aireación, con tendencia a que los sólidos se depositen lentamente. Mientras el fango esté en buen estado tiene un olor característico no molesto. Tiene una tendencia a volverse séptico muy rápidamente y entonces desprende un olor muy desagradable de putrefacción.

El fango digerido es marrón oscuro, y contiene una cantidad excepcionalmente grande de gas. Cuando está totalmente digerido no es perjudicial, siendo su olor relativamente débil y parecido a la del alquitrán caliente, goma quemada o lacre. Conforme el fango se va secando, los gases se escapan dejando una superficie con grietas y un olor que recuerda al fango del jardín.

## 11.2. Características de los fangos

Los fangos resultantes de la separación sólido-líquido (decantación) se conocen como fangos primarios, y los provenientes de los procesos biológicos como fangos secundarios.

Una fracción importante de las sustancias que se separan en los procesos de tratamiento de aguas residuales se encuentra finalmente en los fangos. En el caso de los fangos primarios, entre un 30 % (decantación primaria) y un 60 % (fisicoquímico) de la DBO soluble del efluente de entrada se separa en los fangos del sedimentador primario como DBO insoluble. En las plantas de fangos activados, alrededor de dos tercios de la DBO soluble separada corresponde a compuestos orgánicos oxidados ( $\text{CO}_2$ ) para producir la energía de mantenimiento, pero el tercio restante corresponde a las células microbianas que se encuentran en el fango en exceso purgado.

Para reducir este contenido orgánico de putrefacción, se somete a los fangos a una digestión anaerobia o aerobia. El fango resultante de la digestión, con un contenido considerablemente inferior en materia orgánica, se denomina fango estabilizado. Los objetivos de la estabilización son:

- Reducción o eliminación de olores molestos.
- Reducción de la materia orgánica.
- Reducción de los microorganismos patógenos.

Por otro lado, dado el elevado volumen de fangos a tratar, son necesarias una serie de operaciones para reducir este volumen. Estos procesos incluyen básicamente:

- Espesamiento (concentración del fango).

- Deshidratación del fango.

En resumen, el tratamiento del fango dado su volumen y composición, supone un problema grave para la solución final, además del elevado porcentaje de coste que supone el tratamiento del agua residual.

Los parámetros básicos que caracterizan la naturaleza del fango son los siguientes:

- Concentración en materia seca (MS): se expresa generalmente en ppm o en % y se determina por secado a 105 °C.
- Contenido en materias volátiles (MV): se expresa en % en peso de materia seca, determinándose por calcinación de éstas en un horno a 500-550 °C. su valor se aproxima al contenido en materia orgánica.

## 11.3. Dificultades operacionales con el fango

Los problemas más frecuentes en el funcionamiento de una planta de fangos activados son el fango ascendente, el fango voluminoso (bulking) y la Nocardia.

### 11.3.1. *Fango ascendente*

A veces, el fango con buenas características de sedimentación sube a la superficie y flota en ella, después de un periodo de sedimentación relativamente corto. La causa. La causa de este fenómeno es la desnitrificación, los nitritos y los nitratos del agua residual se convierten nitrógeno gaseoso. Cuando se forma este gas en el fango, una gran parte queda atrapada en la masa del fango. Si se forma suficiente gas la masa se vuelve ligera y sube o flota a la superficie. El fango que sube se puede distinguir porque se observa la presencia de pequeñas burbujas de gas adheridas a los sólidos que flotan.

Los problemas que presenta el fango ascendente se pueden solucionar:

- Aumentando el caudal de bombeo del fango activado al retorno.
- Disminuyendo el caudal de líquido mezcla en el tanque de sedimentación, sino, se puede reducir la profundidad del fango en el tanque, aumentando el caudal de extracción de fango activado de retorno.
- Aumentando la velocidad del mecanismo colector de fango en los tanques de sedimentación.
- Disminuyendo el tiempo medio de retención celular aumentando el caudal de purga de fango.

### 11.3.2. *Fango voluminoso o bulking*

Un fango voluminoso es aquel que posee malas características de sedimentación y de compactibilidad. Los tipos principales de fango voluminoso son: el causado por el crecimiento de organismos filamentosos u organismos que pueden crecer de forma filamentosa en condiciones adversas, y el otro es el causado por el agua ligada al flóculo, a la que las células bacterianas que componen éste se inflan por la adición de agua hasta tal punto que reducen su densidad y no

sedimentan. Las causas pueden ser las características físicas y químicas del agua residual (fluctuaciones del caudal, pH, temperatura, grado de septicidad, contenido de nutrientes y naturaleza de los componentes), las limitaciones del diseño de la planta de tratamiento (capacidad de suministro de aire, diseño del clarificador, limitaciones de la capacidad de bombeo del fango de retorno, formación de cortocircuitos y un mal grado de mezclado) y mala operación de la planta (poco oxígeno disuelto en el tanque de aireación, sobrecarga de materia orgánica de los tanques de aireación y operación del clarificador final).

### *11.3.3. Nocardia*

En plantas de fangos activados, la formación de una espuma viscosa, marrón, que cubre los tanques de aireación y los decantadores secundarios ha provocado problemas de seguridad, efluentes de baja calidad y malos olores. La formación de esta espuma está asociada a la presencia de un organismo filamentoso de crecimiento lento del grupo de los actinomicetos, normalmente de la familia *Nocardia*. Algunas de las probables causas de los problemas provocados por esta espuma son:

- Relaciones F/M bajas en los tanques de aireación.
- Concentraciones elevadas de sólidos suspendidos en el líquido mezcla (aumentando por tanto la edad del fango) debido a una purga de fango insuficiente.
- Reaireación del fango.

El suministro de mayores cantidades de aire para cubrir la mayor demanda de oxígeno generada por las elevadas concentraciones de SSLM tenderá a expandir la espuma y a agravar el problema.

Las posibles medidas para el control de la *Nocardia* incluyen:

- Reducción de la edad del fango.
- Reducción del suministro de aire para reducir el espesor de la capa de la espuma.
- Incorporación de un selector para controlar el crecimiento de organismos filamentosos.
- Inyección de un aditivo que provoca la mutación de bacterias.
- Cloración del fango de retorno.
- Rociado del pH del líquido de mezcla por adición de productos químicos o iniciando el proceso de nitrificación.

El método más utilizado para el control de la *Nocardia* es la reducción de la edad de fango.

## **11.4. Pretratamientos de fangos**

Antes de las operaciones de deshidratación o secado de fango, éste tiene que ser bombeado, tamizado y espesado para reducir la masa de agua a tratar y

proporcionar una alimentación relativamente constante y homogénea en las instalaciones de tratamiento de fangos.

El bombeo de fangos se suele hacer con bombas volumétricas ( $V=\text{constante}$ ) de desplazamiento positivo denominadas "bombas mono". Estas bombas tienen un caudal constante, por lo que no sufren variaciones según la diferente concentración del fango. Están constituidas por un rotor de aleación metálica que gira alrededor de una coraza de goma denominada estator. El problema principal es que no pueden funcionar al vacío, ya que el estator se funde por sobrecalentamiento. El rotor es muy duradero y solamente se ralla, al igual que los rodillos en las bombas centrífugas, debido al rozamiento con la arena.

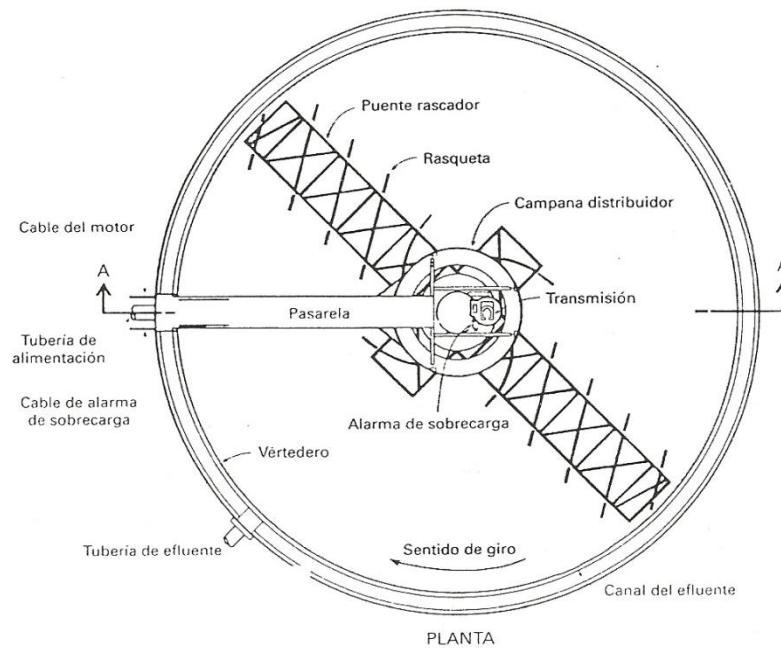
Antes de llegar al espesador, los fangos normalmente son tamizados (si no existen tamices en el pretratamiento) para evitar el paso de sólidos gruesos en las siguientes etapas del tratamiento. Esta criba se puede realizar con tamices fijos o rotatorios.

El espesado de los fangos, que es necesario para ahorrar costes en las etapas de tratamiento posteriores, se realiza por medios físicos, incluida la sedimentación por gravedad (decantación), por flotación en aire disuelto o por centrifugación.

#### *11.4.1. Espesado por gravedad*

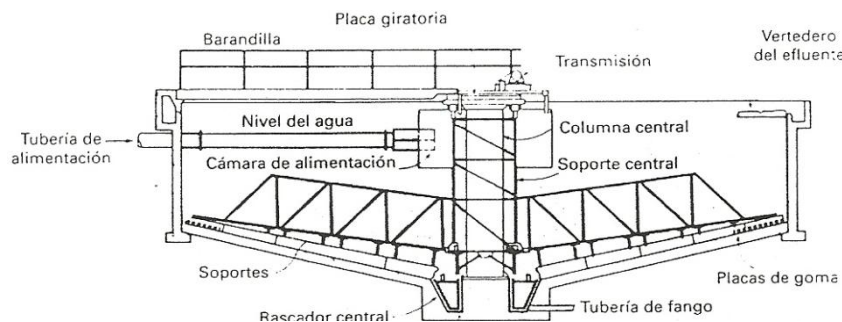
El espesado por gravedad se realiza en un tanque de diseño similar al de un tanque de sedimentación convencional. Normalmente, se utiliza un tanque circular. El fango diluido se conduce a una cámara de alimentación central y a continuación sedimenta y se compacta extrayéndose el fango espesado desde el fondo del tanque. Los mecanismos convencionales de recogida del fango consisten en puentes rascadores del fondo o bien mediante puentes giratorios dotados de piquetas verticales que agitan el fango suavemente dando lugar a la apertura de canales para el escape del agua promoviendo, su compactación. El flujo continuo del sobrenadante producido se devuelve al tanque de decantación primaria. El fango espesado que se recoge en el fondo del tanque de decantación es bombeado a los digestores o al equipo de deshidratación.

El consumo de energía necesaria para este tipo de concentraciones de fangos es muy inferior al necesario para la flotación, por lo que son más utilizados a excepción de aquellos casos en que no sea posible la decantación del fango.



**Figura 16.** *Espesador por gravedad.*

La carga del espesador se calcula de forma similar que un decantador primario, por lo que son menores en superficie debido al menor caudal que circula por ellos. Es conveniente que los espesadores se construyan con suficiente altura, con la finalidad de facilitar la concentración del fango por el propio peso de la masa sólida. Una altura de 3.5 m representa un mínimo para fangos de aguas residuales urbanas. Por otro lado, cuanto más grande sea esta altura mayor es la capacidad de almacenado de fangos del espesador.



**Figura 17.** *Perfil espesador.*

El inconveniente de los espesadores, además de exigir una inversión en obra civil suplementaria, es la producción de malos olores y un aspecto poco agradable. Por este motivo, es normal que estos depósitos estén cubiertos.

#### 11.4.2.

#### *Espesado por flotación*

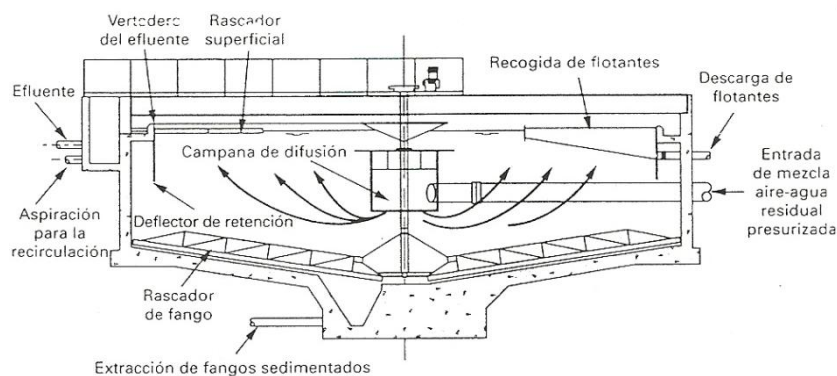
Hay cuatro variantes básicas del espesado por flotación: flotación por dispersión de aire, flotación por aire disuelto, flotación al vacío y flotación biológica. Pero solo la flotación por aire disuelto tiene uso generalizado en EEUU. En la flotación por aire disuelto el aire se disuelve en el agua, manteniendo la solución a una presión elevada. Cuando se despresuriza la solución, el aire disuelto se libera en forma de burbujas finamente divididas que arrastran el fango hasta la parte

superior desde donde es extraído. En los lugares donde las heladas puedan ser un problema, los espesadores por flotación se ubican generalmente en el interior de un edificio dotado de calefacción.

El uso más eficaz del espesador por flotación se consigue con los fangos con excesos procedentes de los procesos de tratamiento biológicos de cultivos en suspensión, como el proceso de fangos activados. El grado de espesado depende de la concentración inicial del fango. Las concentraciones finales mayores se obtienen con fangos mas diluidos.

Esta técnica tiene la ventaja de la reducción de superficie y el volumen de los tanques de espesado y la obtención, con fangos activados, de concentraciones superiores a las obtenidas por espesado estático.

En los procesos biológicos es extraño pasar del 2 % en MS mediante el espesado por gravedad, mientras por el de flotación se llega a un 3-4 %, que son valores normales obtenidos en los fangos primarios por gravedad.



**Figura 18.** Esquema espesador por flotación

Es difícil de todas formas predecir la concentración de MS obtenida por cualquier sistema de espesado, ya que depende básicamente del agua residual y el fango a tratar, pero está claro que el fango activado es muy difícil de espesar por gravedad, aunque la mayoría de depuradoras biológicas han utilizado este sistema. En la actualidad, prácticamente todas las depuradoras biológicas se construyen con espesadores por flotación.

Como contrapartida, esta técnica exige gastos de explotación elevados (consumo eléctrico) y no permite un gran almacenaje de fangos espesados.

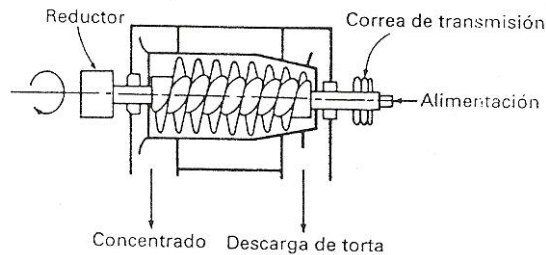
La adición de polielectrolito catiónico mejora el rendimiento de la instalación, consiguiendo secados del orden del 4-6 %.

La carga hidráulica del flotador puede ser superior que en el espesado por gravedad y está alrededor de 3 m/h.

#### 11.4.3. *Espesado por centrifugación*

Las centrifugas se utilizan tanto para espesar como para deshidratar fangos. Su aplicación se limita generalmente al fango activado en exceso. El espesado por centrifugación supone la sedimentación de las partículas del fango bajo influencia de las fuerzas centrífugas. Los tres tipos básicos de centrífugas normalmente disponibles para el espesado de fangos son la centrífuga de discos, la de camisa maciza y la de cesta.

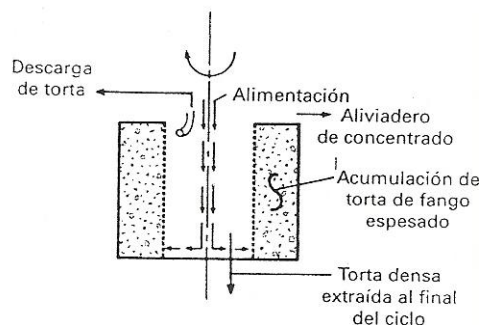
El funcionamiento de la centrífuga de discos es continuo. La centrífuga consiste en una unidad, montada verticalmente, que contiene varios discos cónicos superpuestos. Cada disco actúa como una centrífuga independiente de baja capacidad. El líquido asciende entre los discos finos y el eje central sufriendo una clarificación gradual mientras que los sólidos se concentran en la periferia de la camisa, descargándose a través de unas boquillas. Dado el pequeño tamaño de las aperturas de las boquillas, estas unidades tienen que ir precedidas por un equipo de dilaceración y desbaste del fango para prevenir obturaciones.



**Figura 19.** Centrífuga de camisa maciza

La centrífuga de camisa es también de funcionamiento continuo. Consiste en una camisa maciza montada horizontalmente con forma troncocónica en un extremo. El fango se introduce en forma continua en la unidad y los sólidos se concentran en la periferia. El fango acumulado es arrastrado por medio de un tornillo helicoidal que gira a velocidad ligeramente diferente a la de la camisa, hacia el extremo troncocónico donde se produce una concentración adicional de los sólidos que son seguidamente descargados de la unidad.

La centrífuga de cesta funciona de forma discontinua. El fango líquido se introduce en una camisa giratoria montada verticalmente. Los sólidos se acumulan contra la pared de la camisa produciéndose la decantación del líquido. Cuando se ha llegado a la capacidad de captura de sólidos de la máquina, se reduce la velocidad de la camisa y se posiciona un rascador en la misma para la extracción de los sólidos acumulados.



**Figura 20.** Centrífuga de cesta

Los costes de mantenimiento y energético del proceso de espesado por centrifugación pueden ser importantes. Por tanto, el proceso es solamente aplicable en plantas grandes (por encima de  $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$ ) en las que el espacio sea limitado y donde se disponga de operadores cualificados, o bien para fangos que son difíciles de espesar por métodos más convencionales.

## 11.5. Tratamiento del fango

### 11.5.1. Estabilización

Los fangos se estabilizan por:

- a) Reducir los gérmenes patógenos.
- b) Eliminar los olores desagradables.
- c) Inhibir, reducir o eliminar su potencial de putrefacción.

Hay cuatro medios de eliminar estas condiciones perjudiciales a través de la estabilización.

- a) La reducción biológica del contenido volátil.
- b) La oxidación química de la materia volátil.
- c) La adición de productos químicos al fango para evitar la supervivencia de los microorganismos.
- d) La aplicación de calor con objeto de desinfectar o esterilizar el fango.

Las tecnologías disponibles para la estabilización del fango incluyen la oxidación con cloro, la estabilización con cal, el tratamiento térmico, la digestión anaerobia y la digestión aerobia.

Para la estabilización de los fangos por vía biológica (aerobia o anaerobia), es necesario realizar obras de importantes dimensiones. Cuando se tiende preferentemente a reducir los gastos de primera instalación o cuando no se tiene otra opción, puede disminuirse notablemente el poder fermentable mediante la adición de agentes químicos.

Esta aportación de reactivos no modifica la cantidad de materias orgánicas biodegradables, sino que realiza esencialmente una acción bactericida. Por su reducido coste, la cal es el reactivo que más se utiliza. La aportación de cal, no produce el mismo efecto, según se realice sobre fangos o fangos deshidratados.

En el caso de fangos líquidos, se consigue la elevación del pH y el bloqueo de las fermentaciones nauseabundas. Con esto también se mejora la capacidad de deshidratación del fango. Las dosis utilizadas para fangos frescos son del orden del 10 % de la cantidad de materia seca. Este hecho produce la alcalinización de los fangos hasta un pH superior a 11, lo que hace disminuir notablemente el contenido de bacterias y la desaparición de gérmenes patógenos.

El principal problema de este tipo de tratamiento es el desprendimiento de  $\text{NH}_3$ , que provoca olores molestos.

En el caso de fangos deshidratados, la estabilización con cal viva es mucho más duradera, ya que las fermentaciones ácidas se desarrollan con gran dificultad en el fango seco. Como contrapartida, la mezcla fango-cal, es mucho más difícil de conseguir al tratarse de productos sólidos.

Dada la gran importancia de los procesos de digestión aerobia y anaerobia los explicamos más detalladamente a continuación:

- Digestión aerobia

La digestión aerobia es un proceso en el cual se produce una aireación durante un periodo largo de tiempo (10-15 días), una mezcla de fango de la



sedimentación primaria y del fango del tratamiento biológico, con el resultado de una destrucción de células (respiración endógena) y una disminución, por tanto, del contenido en sólidos en suspensión volátiles (MV).

Cuanto mayor sea la proporción de los fangos primarios, más lenta es la digestión, ya que la relación alimento/microorganismo disminuye (alta DBO).

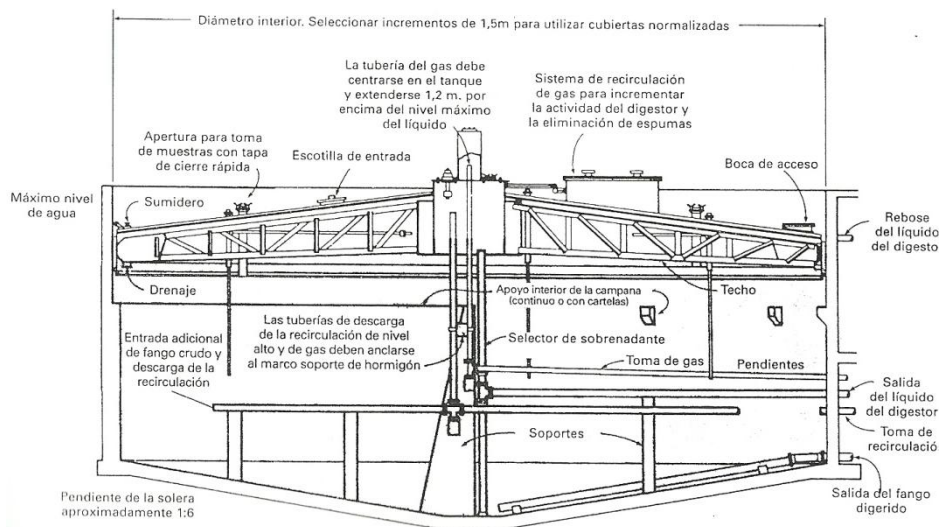
Teniendo en cuenta que la digestión aerobia de fangos tiene lugar en la fase de respiración endógena, no hay prácticamente disminución de la DBO soluble. El objetivo fundamental de la digestión aerobia es la reducción de la masa volátil del fango a evacuar, más que la reducción de la DBO soluble.

Respecto a la digestión anaerobia, este sistema tiene la ventaja que los tiempos de residencia son mucho menores, cosa que significa menores inversiones en volumen de construcción, así como una instalación poco complicada. Resulta, que tiene un coste de energía asociado al suministro de oxígeno necesario ( $0.021 \text{ kWh/m}^3$  de tanque).

El contenido de oxígeno oscila entre 1 y 2 ppm, aunque en dosis superiores se consigue un mejor rendimiento. Las reducciones típicas de sólidos volátiles varían del 35 al 45 % en verano, y en invierno estos valores disminuyen (20-35%).

- Digestión anaerobia

La digestión anaerobia es una fermentación en ausencia de oxígeno que estabiliza la materia orgánica transformándola en gas metano y  $\text{CO}_2$ .



**Figura 21.** Digestión anaerobia.

Un primer grupo bacteriano transforma los compuestos orgánicos complejos en otros más simples (acético, propiónico y butírico), los cuales sirven de alimento a un segundo grupo, denominado, bacterias mecánicas.

Estos últimos son los organismos clave de la digestión anaerobia. Se desarrollan muy lentamente y son muy sensibles a las variaciones de temperatura y de pH (6.8-7.2).

Normalmente el fango se calienta mediante un intercambiador de calor hasta la temperatura de 35 °C, temperatura de mayor actividad para las bacterias mecánicas.

El gas producido se compone esencialmente de CH<sub>4</sub> (70 %) y O<sub>2</sub> (25 %). El resto de gases se encuentran en muy pequeña proporción (CO, N<sub>2</sub>, SH<sub>2</sub>). La producción de gas es el criterio más representativo de la calidad de la digestión.

Es importante también una agitación intensiva en el digestor, que multiplica el encuentro de los microorganismos con la materia a degradar y homogeniza la masa de los fangos. Por este motivo se obtienen mejores resultados en el laboratorio que a escala real.

El tiempo de residencia ha de ser muy alto, del orden de 30 días o más, y teniendo en cuenta que únicamente la mitad del volumen del digestor es útil, los digestores anaerobios tienen un coste de construcción muy elevado. Por otro lado, tenemos que asegurarnos que no existen fugas hidráulicas y que existen los mínimos riesgos debido al gas metano. Todo esto hace que la explotación de estos digestores sea delicada y difícil.

En invierno es más normal el calentamiento del fango y en verano normalmente no es necesario. Por este motivo los gastos de explotación son inferiores en la digestión aerobia. Se consiguen reducciones en volátiles del 40-50 % a pleno rendimiento.

El gas producido se quema y en algunos casos se utiliza como productor de energía suplementaria en la propia planta.

## 11.6. Acondicionamiento

El acondicionamiento del fango se hace con la finalidad de mejorar sus características de deshidratación. Los dos métodos más frecuentemente utilizados suponen la adición de productos químicos y del tratamiento térmico. Se tienen que estudiar también las posibilidades que ofrecen la congelación y la irradiación. La elutriación, operación física de lavado, se utiliza para reducir la cantidad necesaria de producto químico de acondicionamiento.

### 11.6.1. *Acondicionamiento químico*

El uso de productos químicos para acondicionar el fango para su deshidratación resulta económico por el mayor rendimiento y flexibilidad obtenidos. El acondicionamiento químico tiene como resultado la coagulación de los sólidos y la liberación del agua absorbida. El acondicionamiento se hace antes de la filtración al vacío y la centrifugación. Los productos químicos utilizados son cloruro férrico, cal, sulfato de alúmina y polímeros orgánicos.

Los productos químicos se aplican fácilmente en forma líquida. Se necesitan tanques de disolución si los productos llegan en forma de polvo. Estos tanques son suficientemente grandes como para contener el suministro de un día de productos químicos, tienen que haber dos. Están forrados de material anticorrosivo, como PVC, polietileno y caucho para soluciones ácidas. Las bombas medidoras son anticorrosivas y generalmente son de desplazamiento positivo con accionamiento de velocidad variable y de carrera regulable para controlar el caudal.

La dosis de producto químico requerida para cualquier tipo de fango se determina en el laboratorio mediante ensayos del tipo filter-leaf.

El mezclado íntimo del fango y del coagulante es esencial para un acondicionamiento correcto. El mezclado no tiene que romper el flóculo después de haberse formado y el tiempo de retención tiene que ser mínimo, de forma que el fango llegue al filtro tan pronto como sea posible una vez acondicionado.

### *11.6.2. Elutriación*

La elutriación es una operación unitaria en la que se mezcla íntimamente un líquido o mezcla de sólido y líquido con otro líquido con objeto de transferir ciertos componentes desde la mezcla a los componentes añadidos. Un ejemplo típico es el lavado del fango digerido antes de su acondicionamiento químico para eliminar ciertos componentes solubles orgánicos e inorgánicos, que consumirían grandes cantidades de productos químicos.

El coste de la operación de lavado del fango en general es mayor que la compensación debida al ahorro resultante de una menor demanda de productos químicos para el acondicionamiento actualmente esta operación está en desuso.

### *11.6.3. Tratamiento térmico*

El tratamiento térmico es un proceso de acondicionamiento que consiste en calentar el fango durante cortos periodos a baja presión. El tratamiento térmico da como resultado la coagulación de los sólidos, ruptura de la estructura del hiello y una reducción de la afinidad para el agua por parte de los sólidos del fango. Este proceso tiene mayor aplicación en los fangos biológicos que pueden ser difíciles de estabilizar o adicionar por otros medios. Los altos gastos de inversión del equipo limitan, generalmente su uso en grandes plantas (más de 0.2 m<sup>3</sup>/s) o instalaciones en las que el espacio sea reducido.

## **11.7. Desinfección**

La desinfección del fango está adquiriendo una gran importancia debido a que la utilización de esta materia está ganando cada vez mayor aceptación. La aplicación del fango al terreno exige disminuir al máximo el riesgo de contacto con organismos patógenos por razones de protección de la salud pública.

Hay muchos medios para destruir los organismos patógenos presentes en los fangos líquidos y deshidratados. Los métodos que se señalan a continuación se han utilizado para conseguir una reducción superior a la obtenida por medio de estabilización:

1. Pasteurización durante 30 min a 70 °C.
2. Tratamiento a pH elevado, normalmente con cal, a un pH por encima de 12,0 durante 3 horas.
3. Almacenaje a largo plazo del líquido digerido (60 días a 20 °C o 120 día a 4 °C).
4. Compostaje completo a temperaturas superiores a 55 °C y curado por almacenaje durante un mínimo de 30 días.

5. Adición de cloro para estabilizar y desinfectar el fango.
6. Desinfección con otros productos químicos.
7. Desinfección por radiación de alta energía.

## 11.8. Deshidratación

La deshidratación del fango tiene por objetivo la reducción del volumen de agua hasta conseguir que ésta se pueda manipular como un semisólido en lugar de cómo un líquido.

El encarecimiento de las tasas de vertido y del transporte de fangos ha hecho que se desarrollen técnicas sofisticadas para conseguir una mayor sequedad.

Los procesos de deshidratación de fangos son los siguientes:

1. Filtración al vacío.
2. Centrifugación.
3. Filtros prensa.
4. Filtros de banda,
5. Eras de secado.
6. Lagunaje.

### 11.8.1. Filtración al vacío

La función de la operación unitaria de filtración al vacío consiste en reducir el contenido de agua presente en un fango tanto crudo, digerido o elutriado, de forma que el contenido en sólidos aumente desde el intervalo 5-10 % al 20-30 %. Con éstos últimos porcentajes de contenido de materia seca, el fango tiene la consistencia de una coca húmeda, fácilmente manejable.

### 11.8.2. Centrifugación

El proceso de centrifugación es muy utilizado, debido al coste relativamente bajo del equipo y de bajo mantenimiento.

Las centrífugas utilizadas para el espesamiento ya se han explicado en un apartado anterior (camisa maciza, de cesta y de discos). La deshidratación del fango puede conseguirse por medio de centrífugas de camisa maciza y de cesta.

Las centrífugas consiguen aceleraciones de 1000 a 3000 de la gravedad, y necesitan de la adición de polielectrolitos catiónicos para un mayor rendimiento. Los valores de sequedad y consumos habituales son los siguientes:

Tabla 9. Valores habituales de del proceso de centrifugación.

tratamiento	sequedad	Consumo polielectrolito
Fisicoquímico	20-30 %	3-4 kg/TMS
Biológico	15-25 %	6-8 kg/TMS

En las depuradoras biológicas se pueden utilizar centrífugas sin adición de polielectrolito en sustitución de los espesadores por flotación.

### *11.8.3. Filtros prensa*

La utilización de filtros prensa está restringida a plantas depuradoras grandes debido a su elevado coste. Son también complicadas tanto de mantenimiento como de operación, pero tiene la ventaja de duplicar la sequedad del fango (35-50 %), con el consiguiente ahorro de explotación.

Necesitan la adición de  $\text{Ca(OH)}_2$  como condicionante hasta  $\text{pH} > 11$ , y en algunos casos también de  $\text{FeCl}_3$ . No necesitan la adición de polielectrolito.

Un filtro prensa se compone de una serie de placas yuxtapuestas de medidas hasta 2 m de lado, de un número incluso superior a 100, por lo que se pueden conseguir cargas de hasta 10 TM de fango. Sobre las dos caras acanaladas de estas placas se aplican telas filtrantes. Los fangos a filtrar se cargan en las cámaras creadas entre dos placas contiguas.

Posteriormente se aplica una presión de 10-15  $\text{kg/cm}^2$  que se mantiene durante una hora, forzando al agua a que pase a través de la tela filtrante. Finalmente, las placas filtrantes se separan cayendo las cocas de fango que tienen un grueso de 3 a 4 cm. La duración total del filtrado es de unas 3 horas.

### *11.8.4. Filtros de banda*

Este sistema de filtración se adapta principalmente a instalaciones pequeñas o medianas. Obtienen sequedades un poco superiores a las centrifugas, pero su coste es superior y su mantenimiento es más complejo y delicado.

El fango acondicionado con polielectrolito, se distribuye sobre una tela filtrante y es prensado por un tambor formándose una coca de fango seca mientras el agua pasa por la tela filtrante o banda.

Los consumos de polielectrolito son un poco inferiores a los de las centrifugas y la sequedad obtenida para un mismo tipo de fango es de un 3-5 % superior, no compensa su elevado coste y los problemas de mantenimiento en muchos casos (descentrado, ruptura y obstrucción de la banda). Se tiene que estudiar muy bien si la instalación es, o no, económica.

### *11.8.5. Eras de secado*

El secado de fangos en eras exige grandes extensiones de terreno y se utiliza especialmente en instalaciones pequeñas.

Por razones lógicas, esta deshidratación natural se tiene que realizar a los fangos bien estabilizados y no putrescibles (oxidación total).

Los rendimientos obtenidos son muy variables, y dependen esencialmente de la climatología. Puede obtenerse una mejora del rendimiento mediante un acondicionamiento químico (principalmente polielectrolito catiónico), que reduce también el tiempo de residencia, que generalmente es de un mes.

Las eras de secado están constituidas por una capa de 10 cm de arena y de 0,5 a 1.5mm, dispuesta sobre una capa soporte de 20 cm de grava de 15 a 25 mm.

Por debajo de la grava se produce el drenaje, y sobre la arena se deposita el fango.

La capa de fango que se extiende es de 20-30 cm. El agua se elimina mediante el drenaje a través del filtro de arena y grava, y por evaporación, lo que hace que en verano se consigan sequedades de hasta un 30 % con facilidad. El tiempo de residencia es un factor determinante en el rendimiento final.

#### *11.8.6. Lagunaje*

Las lagunas de secado pueden utilizarse como sustitutivo de las eras de secado por la deshidratación de fango digerido. Las lagunas no son convenientes para la deshidratación de fangos crudos, ni de fangos estabilizados con cal, o fangos que den lugar a efluentes de agua de alta concentración a causa de su potencial de olores y molestias. El rendimiento de las lagunas, al igual que el de las eras de secado, depende del clima; la precipitación y las bajas temperaturas inhiben la deshidratación. La aplicación más efectiva es en zonas donde la evaporización sea intensa.

El fango digerido se esparce sin acondicionamiento previo en la laguna de forma que se lleva a término una distribución uniforme. El grueso de la capa varía generalmente entre 0,75 y 1,25 m. la evaporación es el mecanismo principal de la deshidratación. Generalmente se incluyen instalaciones para la decantación del agua superficial y su recirculación a la planta de tratamiento.

## **11.9. Secado térmico**

El secado del fango es una operación que consiste en reducir el contenido de agua por vaporización de ésta en el aire ambiente. En las eras de secado, las diferencias de presión del vapor son la causa de la evaporación en la atmósfera. En los dispositivos mecánicos de secado se suministra calor adicional para aumentar la capacidad de retención del vapor del aire ambiente y proporcionar así calor latente de evaporación. El objeto del secado térmico es extraer la humedad del fango, de manera que pueda incinerarse o bien ser procesado para su transformación en fertilizante. El secado es necesario en la fabricación de fertilizantes para poder triturar el fango, reducir su peso y evitar la continuación de la actividad biológica. El contenido en humedad del fango seco es inferior al 10 %.

Pueden utilizarse cinco procesos mecánicos para el secado del fango:

1. Secado instantáneo (flash dryers). Se pulveriza el fango y las partículas entran en contacto con gases calientes turbulentos el tiempo necesario para la transferencia de humedad del fango a los gases. Es el más utilizado de los sistemas de secado térmico en las plantas de tratamiento de aguas residuales.
2. Secado por pulverización. Un secador por pulverización utiliza una cuba centrífuga de alta velocidad en la que se introduce el fango líquido. La fuerza centrífuga sirve para pulverizar el fango en partículas finas y para difundirlas en la parte superior de la cámara de secado donde tiene lugar la transferencia constante de humedad a los gases calientes.

3. Secado rotativo. En los sistemas térmicos directos, el material a secar está en contacto con los gases calientes. En los secadores térmicos indirectos, los gases calientes están separados del material a secar y posteriormente pasan a través de él cuando la temperatura se ha reducido. Normalmente se instalan placas deflectoras para levantar y agitar el material durante el giro del tambor.
4. Secado de pisos múltiples: el horno de pisos se utiliza para secar e incinerar fangos que han sido parcialmente secados por filtración al vacío. La operación se realiza a contracorriente haciendo pasar aire caliente y los productos de la combustión a través de un fango finamente pulverizado que es rastrillado continuamente para renovar la superficie de exposición.
5. Deshidratación por emersión en aceite. Es el llamado proceso Carver Greenfield. El proceso implica la mezcla de un aceite ligero con el fango deshidratado. La mezcla aceite-fango, la cual puede bombearse fácilmente y tiene efectos positivos en la reducción de incrustaciones y corrosión, se hace pasar a continuación a través de un evaporador. El agua se elimina debido a que tiene un punto de ebullición menor que el aceite. Un vez que la evaporación se ha realizado, lo que queda es esencialmente una mezcla de aceite y de fango seco, eliminándose los sólidos mediante una centrifuga.

## 11.10. Vertidos de fangos

El destino final de los fangos tratados y su rentabilidad es generalmente problemático y su evacuación constituye siempre una carga de explotación considerable.

Posiblemente, la incineración sea el paso, más costoso pero reduce el volumen de fangos a los límites más pequeños en depuradoras de gran tamaño. La incineración conduce a un residuo inocuo, a la eliminación total del agua intersticial y a la combustión de la materia orgánica de los fangos. De momento, se tiene que buscar un destino final al vertido de los fangos. A continuación se detallan algunos destinos del fango.

### *11.10.1. Adobo para la tierra. Compostaje*

La utilización del fango deshidratado para la agricultura es una perfecta salida en el caso de los fangos estabilizados no contaminados con vertidos industriales. El problema son las dificultades de transporte y manipulación, que han hecho que esta forma de evacuación sea poco utilizada debido a la falta de demanda.

Por este motivo, se ha desarrollado la técnica del compostaje, que consiste en la adición de fangos procedentes de aguas residuales urbanas a abonos domésticos, con un enriquecimiento en materias húmedas. La relación C/N de la mezcla, del orden de 25 a 30, se adapta bien a la fermentación aerobia termófila. El compost facilita la posterior asimilación por parte del suelo, y reduce notablemente el contenido en gérmenes patógenos. Por otro lado, el producto final es más presentable.

También puede realizarse el compost directo de los fangos después de la adición de un material rico en carbono (paja, etc.), que tiene la ventaja que no se producen olores tan desagradables en la fermentación.

El valor del fango como fertilizante, cuando se utiliza como acondicionador del suelo, se basa principalmente en el contenido de nitrógeno, fósforo y potasa.

### *11.10.2. Descarga en el vertedero. Vertido al mar*

La descarga o vertido terrestre es el destino más frecuente de los fangos. La falta de vertederos hace que el coste del vertido aumente, porque son necesarios métodos de deshidratación más sofisticados para reducir el volumen del fango al máximo.

El vertido realizado a una zona tal como una mina abandonada es un método solo para fangos que han sido previamente estabilizados, de forma que no se produzca una descomposición y molestias derivadas de ellos.

Un vertedero controlado puede utilizarse para la eliminación del fango, grasa y arena, tanto estabilizados como no. La economía del transporte de fangos dicta, en la mayoría de casos la conveniencia de realizar una deshidratación para reducir su volumen. Este método es muy aconsejable si al mismo tiempo se utiliza para eliminación de abono y otros residuos sólidos de la comunidad.

Los residuos se vierten en una zona prefijada y se prensan in situ con un tractor o una apisonadora, tapándose después con una capa de 0.30 m de arena limpia. Cubriendo cada día los nuevos residuos que se van depositando, las condiciones anteriormente mencionadas causantes de problemas (olores y moscas) se reducen al mínimo.

Después de unos años, durante los cuales los residuos se descomponen y se compactan, el terreno resultante se puede utilizar como lugar de esparcimiento u otras finalidades siempre que no haya asentamientos graduales que imposibiliten hacerlo.

Los camiones que transportan fango húmedo o arena llegan al lugar escogido sin atravesar zonas densamente pobladas o comerciales. El lugar escogido ha de tener un buen drenaje de forma que el corrimiento del agua no afecte al desplazamiento de vehículos. Se evita también que el drenaje de la zona produzca polución de aguas subterráneas o corrientes superficiales.

El vertido al mar mediante emisario submarino es una solución que se utiliza en grandes plantas depuradoras próximas al mar, especialmente en Inglaterra y USA. Su uso está prohibido por la CEE desde el año 1999.

Por otro lado, el contenido térmico de un fango es importante cuando se considera la posibilidad de incineración o algún otro proceso de combustión, y se han de realizar ensayos muy precisos con una bomba calorimétrica con la finalidad de establecer un balance térmico para el sistema de combustión.



# **CAPÍTULO 12: TRATAMIENTOS AVANZADOS DEL AGUA RESIDUAL**

Se define como el tratamiento adicional necesario para la eliminación de los sólidos suspendidos y de las sustancias disueltas de cualquier tipo que permanecen en el agua después del tratamiento secundario convencional. El número de instalaciones ha aumentado notablemente debido a que las normativas de vertidos son cada vez más estrictas.

Dentro de estos tratamientos encontramos:

- Filtración en medio granular.
- Control de nutrientes.
- Eliminación de nitrógeno.
- Eliminación de fósforo.
- Adsorción sobre carbón activo.
- Desinfección.

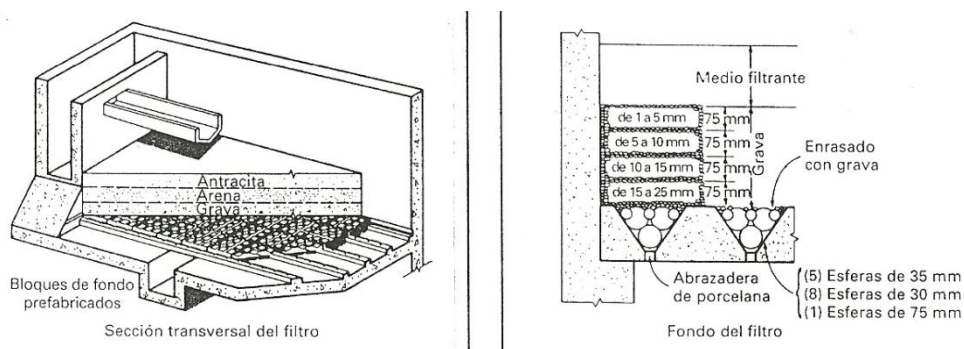
## **12.1. Filtración en medio granular**

La filtración se utiliza, de modo generalizado, para conseguir una mayor eliminación de sólidos en suspensión (incluida la DBO) de los efluentes de los procesos de tratamiento biológico y químicos.

La operación completa de filtración consta de dos fases: filtración y lavado o regeneración. Mientras que la descripción de los fenómenos que se producen durante la fase de filtración es idéntica para todos los sistemas de filtración que se utilizan, la fase de lavado es diferente en función si el filtro es de funcionamiento continuo o semicontinuo. Normalmente suelen ser de flujo descendente aunque también hay de flujo ascendente y, para vencer la fricción creada, puede usarse la fuerza de la gravedad o aplicar presión al agua a filtrar.

En el caso de filtros semicontinuos, la filtración perdura hasta que, a causa de los sólidos depositados, se produce una pérdida de carga prefijada en la circulación a través del lecho filtrante. A continuación se hace circular una mezcla de aire y

agua a contracorriente con un caudal lo suficientemente grande como para expandir el lecho filtrante y arrastrar los sólidos depositados. En cambio, en los procesos continuos no existen los conceptos de turbidez límite del efluente ni de pérdida de carga admisible de circulación. En éstos, el agua fluye por gravedad y sale, filtrada, a través de unos orificios de salida situados por debajo de cada celda de filtración del filtro pero también se realiza simultáneamente el lavado del filtro con un puente móvil que se desplaza por encima del lecho filtrante limpiando cada una de las celdas.

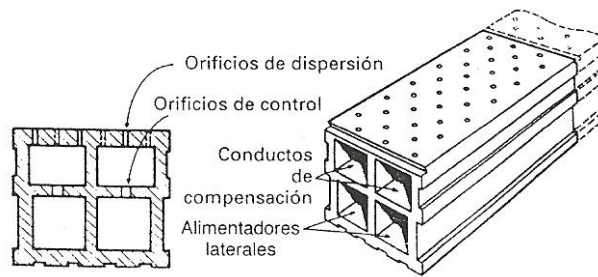


**Figura 22.** Lecho filtrante.

Los lechos filtrantes pueden estar constituidos por una o varias capas de material granuloso, estratificado o no, pero todos ellos desarrollados con la finalidad que los sólidos en suspensión penetren a la mayor profundidad posible dentro del lecho para aprovechar al máximo la capacidad de almacenaje. Si tienen una población de partículas de distinto tamaño de grano diremos que se trata de sistemas estratificados, de no ser así, se habla de sistemas no estratificados pero, además, estas capas pueden estar constituidas por material de distinto tipo (arena, antracitas, carbón, etc.). Dependiendo de las necesidades de depuración o de la disponibilidad económica, se puede decantar por un sistema u otro ya que cada uno de ellos tiene sus ventajas e inconvenientes.

Los inconvenientes o problemas que comúnmente nos podemos encontrar con un filtro son:

- Aumento de la turbidez. Niveles inaceptables de turbidez en el efluente pero no se llega a la máxima pérdida de carga. Hay que adicionar productos químicos en el agua a la entrada.
- Formación de bolas de fango. Aglomeraciones de flóculos. Pueden llegar a formar grandes masas dentro del filtro, reduciendo la efectividad del proceso.
- Acumulación de grasas emulsionadas. La acumulación de grasas en el interior del lecho aumenta la pérdida de carga disminuyendo la duración del ciclo.
- Pérdida del material filtrante. Es posible que determinados flóculos se aferren a partículas del lecho filtrante lo suficientemente pequeñas como para que sean eliminadas en el lavado.

**Figura 23.**

- Amontonamiento de grava. Cuando las diferentes capas del soporte de grava se vean alteradas por el paso de caudales en la operación de lavado.

## 12.2. Control de nutrientes

El nitrógeno y el fósforo son los principales nutrientes de importancia en el vertido de aguas residuales tratadas. Estos vertidos pueden acelerar los procesos de eutrofización en lagos y embalses, estimulando el crecimiento de algas y plantas acuáticas. Además de resultar estéticamente desagradable, su presencia puede interferir con los usos beneficiosos de los recursos hidráulicos, especialmente cuando se utiliza para el abastecimiento, crecimiento ictiológico, y usos recreativos.

Las elevadas concentraciones de nitrógeno en efluentes tratados también puede tener otros efectos como son la reducción de la concentración de oxígeno disuelto en las aguas receptoras, toxicidad para la vida acuática, efectos negativos sobre la efectividad de la desinfección con cloro, peligro para la salud pública, etc. Por tanto, el control de nitrógeno y fósforo está ganando importancia en la gestión de la calidad del agua.

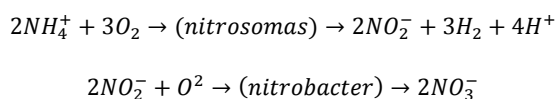
A la hora de seguir una estrategia de control, es importante conocer las características del agua residual, el tipo de instalación de tratamiento de agua residual, y el nivel de control de nutrientes necesario. Las posibles actuaciones para el control de nutrientes pueden suponer la adición de un único proceso para el control de un nutriente específico, o comportar la integración de la eliminación de nutrientes en el sistema biológico principal. El tipo de actuación adoptada dependerá de la fiabilidad del cumplimiento de los objetivos de calidad del efluente, de la flexibilidad de funcionamiento y del coste.

Se han desarrollado varios métodos de tratamiento que se basan en el uso de sistemas químicos, físicos y biológicos, para limitar o controlar la cantidad y forma de los nutrientes vertidos. Los procesos más utilizados eran al principio, la nitrificación biológica para la oxidación y control del amoníaco, la desnitrificación biológica con adición de metanol para la eliminación del nitrógeno, y la precipitación química para la eliminación del fósforo. En los últimos años, se han desarrollado varios sistemas de tratamiento biológico para la eliminación única del fósforo o conjunta del fósforo y nitrógeno.

## 12.3. Eliminación del nitrógeno

La nitrificación es un proceso autotrófico ya que la energía necesaria para el crecimiento bacteriano se obtiene de la oxidación de compuestos nitrogenados,

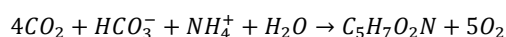
principalmente del amoníaco. Este proceso se realiza en dos etapas, en el que toman parte dos familias de microorganismos, los Nitrosomas y los Nitrobacter. En la primera etapa, el amonio se convierte en nitrito; en la segunda, el nitrito se convierte en nitrato:



Las dos reacciones son las que llevan a cabo las bacterias para obtener energía para el crecimiento y mantenimiento celular. La reacción energética global será:



Junto a la producción de energía, una fracción del ion amonio es asimilado con parte del tejido celular. La reacción de síntesis de biomasa se puede representar de la siguiente manera, teniendo en cuenta que la expresión de  $C_5H_7O_2N$  se utiliza para representar las células bacterianas sintetizadas:



Si el agua residual, antes o después de un tratamiento, se vierte al medio ambiente con contenidos elevados de nitrógenos en forma orgánica, amoniacal o nitritos, existirá una fuerte demanda de oxígeno (DNO) para producir naturalmente la reacción de nitrificación.

Al primer proceso de oxidación se le conoce como nitrificación y a las bacterias que lo llevan a cabo se les llama bacterias nitrificantes. Estos organismos suelen estar presentes en todos los procesos aerobios de tratamiento biológico pero su número suele estar limitado. Si esta operación se tiene que conseguir en un proceso de fangos activados es necesario introducir algunas modificaciones como administrar una cantidad de oxígeno adicional para el proceso de nitrificación y dedicar un tiempo de retención celular más elevado ya que las bacterias responsables de la nitrificación tienen una velocidad de crecimiento menor que las bacterias responsables de la degradación de la materia orgánica.

El proceso de nitrificación depende de las siguientes variables:

- Relación DBO/NKT (nitrógeno Kjeldahl total).
- Concentración de oxígeno disuelto.
- Temperatura.
- pH.

La fracción de microorganismos nitrificantes depende de la relación DBO/NKT, de manera que para valores comprendidos entre 1 y 3, la fracción de microorganismos nitrificantes está entre 0,21 y 0,083 (estos valores de DBO/NKT corresponden aproximadamente a los sistemas de nitrificación para fases independientes). Para relaciones de DBO/NKT mayores de 5, la fracción de microorganismos nitrificantes decrece a partir de un valor aproximado de 0,054 y para estas relaciones ya se considera que el proceso de nitrificación es de fase única, es decir, existe la nitrificación, pero tiene un peso importante la transformación de materia orgánica. Cuanto al oxígeno y la temperatura, un aumento de éstos provoca un aumento de las tasas de nitrificación o de la tasa

especifica de crecimiento máximo de los microorganismos nitrificantes. Para un pH comprendido entre 7,2 y 9 se observa que la tasa de nitrificación es máxima, manteniendo las otras variables.

La desnitrificación es el proceso mediante el cual los nitratos se convierten, en presencia de bacterias, en nitrógeno gas y óxido de nitrógeno. Esta eliminación también se puede llevar a cabo biológicamente en ausencia de oxígeno.

Se puede realizar una clasificación atendiendo si la desnitrificación se consigue en sistemas de oxidación de carbono y nitrificación-desnitrificación conjunta utilizando fuentes de carbono internas (sistemas de fango único) o en reactores separados utilizando metanol u otra fuente de carbono externa (sistema de dos fangos). Evidentemente, los fangos que se producen en cada sistema son diferentes.

### 12.3.1. *Sistemas de nitrificación-desnitrificación conjunta*

Debido al alto coste que representan las fuentes externas de carbono, se han desarrollado sistemas en los que las etapas de eliminación de la materia orgánica y del nitrógeno se llevan a cabo conjuntamente en un único proceso en el que se consume el carbono presente de forma natural, en el agua residual. La mayoría de estos procesos son capaces de eliminar entre el 60 y el 80 % del nitrógeno total, aunque también se han conseguido eficacias comprendidas entre el 85 y el 95 %. En la desnitrificación se consiguen zonas anóxicas controlando los niveles de oxígeno del tanque y se utiliza el carbono presente en el agua residual y lo que queda en los fragmentos de tejido celular bacteriano después de la degradación endógena de los organismos.

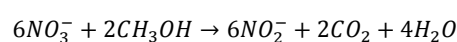
Las ventajas específicas que presenta este sistema son:

- Reducción del volumen de aire necesario para llevar a cabo la eliminación de la DBO y del nitrógeno.
- Eliminación de fuentes de carbono externas necesarias para la desnitrificación.
- Eliminación de los decantadores-clarificadores intermedios y sistemas de recirculación de fangos necesarios para procesos de nitrificación/desnitrificación para etapas separadas.

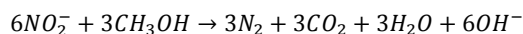
### 12.3.2. *Sistemas de desnitrificación de etapas separadas*

Debido a que la oxidación del carbono y nitrificación conjuntas y la desnitrificación se producen en reactores independientes, el fango se genera por separado en cada reactor. Además, como la desnitrificación necesita de una fuente de carbono y como el efluente de la nitrificación es pobre en contenido orgánico, hay que añadir algún reactivo externo que haga esta función. Si utilizamos el metanol como fuente de carbono, la estequiometría del proceso se puede describir de la siguiente manera:

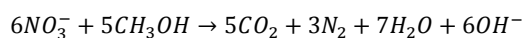
*Reacción energética, primer paso:*



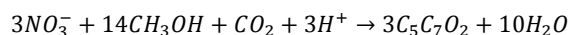
Reacción energética, segundo paso:



Reacción energética total:



La siguiente reacción, desarrollada por Mc Carty, representa una reacción de síntesis típica:



En el proceso de desnitrificación es necesario disponer de un elemento de eliminación del nitrógeno gas generado y que se adhiere a los sólidos biológicos. La liberación de las burbujas se puede realizar aireando los canales de conexión de los tanques de procesos biológicos con los decantadores o por aireación en un tanque independiente. Las variables que influyen en el proceso de desnitrificación son:

- Concentración de nitración: se ha observado que la concentración de nitrato afecta al crecimiento máximo de los microorganismos.
- Concentración de carbono.
- Temperatura: el efecto de la temperatura sobre el rendimiento del proceso es muy importante ya que depende la calidad del efluente.
- pH: el intervalo óptimo se sitúa entre 6,5 y 7,5.

Existen otros procedimientos a parte de los nombrados para eliminar el nitrógeno pero son más caros y con un funcionamiento más irregular. Dentro de estos procesos encontramos el stripping, o arrastramiento por aire, la cloración en el breakpoint y el intercambio iónico.

## 12.4. Eliminación del fósforo

El fósforo está presente en el agua residual en forma de ortofosfato ( $PO_4^{-3}$ ), polifosfato ( $P_2O_7$ )<sup>-4</sup> y formas orgánicas del mismo. Los dos últimos términos engloban hasta el 70 % del fósforo contenido en el agua residual. Los microbios utilizan este fósforo para la síntesis y mantenimiento celular, para el transporte de energía y se almacena en determinadas condiciones para usos posteriores. Como consecuencia de esto, entre un 10 y 30 % del fósforo presente se elimina durante el tratamiento biológico. Para conseguir niveles de fósforo más bajos en el efluente, es necesario eliminar más cantidad de la estrictamente necesaria para el mantenimiento y síntesis celular. Bajo ciertas condiciones aerobias, los microorganismos pueden consumir más fósforo que el necesario y liberarla en condiciones anóxicas.

Ahora bien, existen dos grandes tendencias en cuanto a los procedimientos de eliminación del fósforo: eliminación mediante mecanismos biológicos y la eliminación por precipitación química.

### 12.4.1.

### Sistemas biológicos

Ciertos microorganismos tienen la capacidad de almacenar una cantidad mayor de fósforo de la habitual cuando una zona aeróbica (óxica) sigue a una zona anaeróbica. Las bacterias no solo utilizan el fósforo para el mantenimiento celular, síntesis celular y transporte de energía sino que también la almacenan para usos posteriores. Estos organismos, dentro de los cuales encontramos el *Acinetobacter*, liberan el fósforo almacenado como respuesta, en condiciones anaerobias, a la presencia en el agua residual de ácidos grasos volátiles (AGV). El fango que contiene un exceso de fósforo se purga o se evacua a una línea de fango auxiliar en condiciones anóxicas. Por tanto, el proceso biológico de eliminación de fósforo hace necesario disponer de reactores con la posibilidad de crear zonas aerobias y zonas anaerobias dentro del mismo. Es precisamente este aspecto el factor crítico en la eliminación biológica: la exposición de los microorganismos en condiciones aerobias y anaerobias.

La exposición en condiciones aerobias y anaerobias alternadas se puede conseguir en el tratamiento biológico principal (sistema patentado A/O) o en la línea de recirculación del fango (sistema patentado PhoStrip).

El proceso A/O permite llevar a cabo conjuntamente la eliminación del fósforo, oxidación del carbono y la nitrificación si, para éste último, tiene un tiempo de retención suficiente en la fase aerobia. Consiste en un proceso de cultivo en suspensión de fango único que combina secuencialmente etapas aerobias y anaerobias. Bajo condiciones de ausencia de oxígeno, el fósforo presente en el agua residual y en la masa celular se libera en forma de fosfatos solubles y se reduce en una pequeña cantidad la DBO. Este fósforo es asimilado, a continuación, por la masa celular en la zona aerobia y el fango, rico en fósforo, se separa de la corriente líquida a través de la purga. En el decantador, parte del fango sedimentado se recircula a la entrada del reactor.

La concentración de fósforo en el efluente depende principalmente de la relación DBO/fósforo en el agua residual a tratar. Se puede conseguir reducir el contenido de fósforo hasta niveles iguales o inferiores a 1 ppm si la relación es superior a 10:1. De no ser así, se pueden llegar a concentraciones bajas añadiendo sales metálicas al proceso.

Como ventajas, este sistema presenta:

- Operación relativamente sencilla.
- El fango purga tiene una proporción de fósforo tal que permite su uso como fertilizante (3-5 %).
- Tiempo de retención relativamente corto.
- En casos en que se requieren niveles bajos de fósforo, el proceso permite una nitrificación completa.

Como inconvenientes:

- Proceso incapaz de conseguir simultáneamente elevados niveles de eliminación de nitrógeno y fósforo.
- Funcionamiento en condiciones de clima frío incierto. Es necesario disponer dispositivos que permitan una tasa de transferencia de oxígeno elevada en caso de tiempos de retención celular bajos en la fase aerobia.

- No se dispone de gran flexibilidad en el control del proceso.

El proceso Phostrip consiste en la desviación de parte del caudal de recirculación de fangos a un tanque aislado anaerobio. El fango con bajo contenido en fósforo se recircula al tanque de aireación mientras que el fango es tratado en un tanque independiente donde se adicionan reactivos coagulantes para mejorar la separación de los sólidos en el tanque clarificador independiente. Los tiempos de retención suelen oscilar entre 8 y 10 h consiguiéndose reducciones del nivel de fósforo hasta el 1.5 ppm en el efluente del tanque anaerobio.

Como ventajas encontramos:

- Fácil incorporación a las plantas de fango activado existentes.
- Proceso flexible y no está gobernado por la relación DBO/fósforo.
- Consumo de reactivos sensiblemente inferior al de plantas de precipitación en la línea principal.

Como inconvenientes:

- La precipitación del fósforo implica la adición de cal.
- La respiración anaerobia requiere tanques adicionales.
- Las formaciones de incrustaciones calcáreas pueden presentar problemas de mantenimiento.

#### *12.4.2.*

#### *Procedimientos químicos*

La adición de determinados productos químicos al agua residual, y su combinación con el fosfato presente, da lugar a la formación de sales insolubles o de baja solubilidad. Los principales productos químicos utilizados con esta finalidad son la alúmina, el aluminato de sodio, el cloruro férrico y la cal. También se utiliza el sulfato ferroso y el cloruro ferroso que se pueden obtener como subproductos en transformaciones siderúrgicas (licores de decapado). Al añadir sales de aluminio o de hierro al agua residual, reaccionan con el ortofosfato soluble para producir un precipitado mientras que el fósforo orgánico y el polifósforo se elimina con reacciones más complejas y por adsorción sobre los flóculos formados. Los polímeros se han utilizado con éxito, conjuntamente con la alúmina a la cal, como agentes coadyuvantes de la floculación.

Los factores que influyen en la elección de productos químicos para la eliminación del fósforo son:

- Nivel de fósforo en el efluente.
- Sólidos en el agua residual
- Alcalinidad.
- Coste de los reactivos (transporte incluido).
- Seguridad de suministro de productos químicos.
- Instalaciones de tratamientos de fangos.
- Método de evacuación final.



- Compatibilidad con otros procesos de tratamiento de la planta.

El proceso de eliminación del fósforo con este método puede aplicarse en distintos puntos de la línea principal de la planta. En función de esto se puede distinguir la pre-precipitación cuando se aplica la adición de productos químicos en las instalaciones de sedimentación primaria; coprecipitación cuando se aplica la adición de productos antes, después o bien en el tratamiento biológico y la postprecipitación cuando la adición es en el efluente de sedimentación secundaria.

En el primer caso se produce un mayor volumen de fangos encareciendo la explotación, en la coprecipitación se mejora la decantación del fango activo en el clarificador secundario pero parece ser que los reactivos químicos dañan a largo plazo las células biológicas, por lo que disminuye el rendimiento del proceso. El tercer caso es el más favorable en todos los aspectos ya que produce pocos fangos, las dosis son muy bajas y no queda afectado el proceso biológico. Es decir, se suman todas las ventajas del tratamiento terciario de postprecipitación y el rendimiento es un poco mayor dejando niveles de fósforo residual inferiores a 0.6 ppm aunque requiere la construcción de un clarificador adicional.

Para esclarecer las ventajas de la aplicación en diferentes puntos de la planta de tratamiento:

#### 1. Pre-precipitación

- Aplicable en la mayoría de las plantas.
- Aumento de la eliminación de la DBO y de SS.
- Pérdida mínima de metales.
- Posibilidad demostrada de recuperar la cal.

#### 2. Coprecipitación

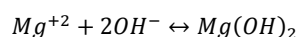
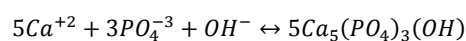
- Menor coste.
- Menor dosificación de reactivos.
- Mejora la estabilidad del fango activado.
- No es necesario el uso de polímeros.

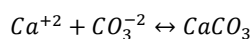
#### 3. Postprecipitación

- Menor presencia de fósforo en el efluente.
- Uso más eficaz de los metales.
- Posibilidad de recuperar la cal.

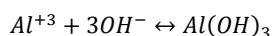
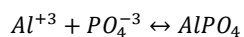
Las reacciones químicas que se llevan a cabo con los diferentes reactivos:

*Cal*

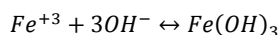
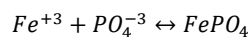




*Alúmina*



*Hierro*



La química de eliminación del fosfato con cal es muy diferente a la del aluminio o hierro ya que se presentan problemas, un considerable aumento respecto a las sales metálicas y problemas de explotación y mantenimiento asociados con el almacenaje y dosificación de la cal. Cuando se añade el álcali, éste reacciona con el bicarbonato para precipitar hidroxiapatita, es decir, se ataca la dureza del agua. Por esto, las principales variables que controlan la dosificación son el grado de eliminación deseado y la alcalinidad del agua residual por lo que el grado de dosificación óptimo de funcionamiento se tiene que determinar con ensayos.

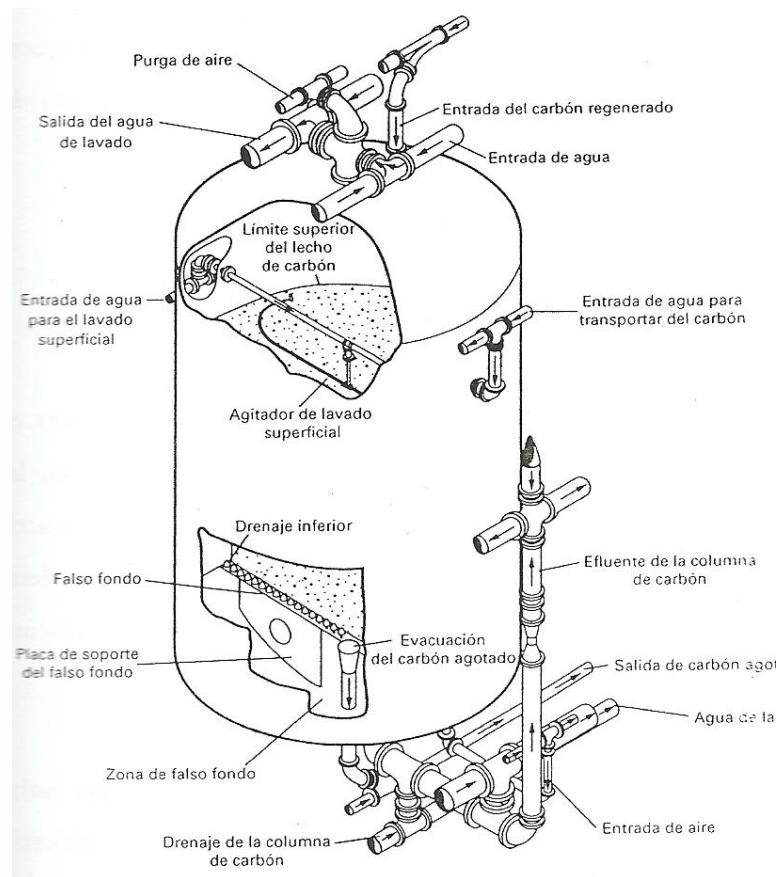
En el caso del aluminio y del hierro, teóricamente 1 mol reacciona con 1 mol, que precipitará. Estas reacciones son engañosamente simples por lo que se tienen que tener en cuenta numerosas reacciones secundarias y sus constantes de equilibrio asociadas. La precipitación con estos compuestos está sujeta al intervalo de pH de trabajo por lo que a veces será necesaria la adicción de álcalis.

## 12.5. Adsorción sobre carbón activo

El proceso de adsorción consiste, en términos generales en la captación de sustancias solubles presentes en la interfase de una solución. Este tipo de tratamiento suele estar considerado como un proceso de refinamiento de aguas que ya han recibido un tratamiento biológico normal. Tiene aplicación en la eliminación de gases malolientes, sobretodo el sulfuro de hidrógeno y los de origen orgánico, pesticidas, metales pesados y contaminantes orgánicos a niveles de trazas. En condiciones normales, después del tratamiento, la DBO del efluente varía entre 2 y 7 ppm, y la DQO se sitúa entre 10 y 20 ppm.

El carbón tiene que ser activado con la exposición de la partícula a un gas oxidante desarrollando una estructura porosa favoreciendo la aparición de grandes superficies internas aumentando las posibilidades de contacto interfacial entre el carbón y las sustancias a eliminar.

El tratamiento con carbón puede hacerse estando éste de forma granular o bien en forma de polvo. No obstante, la viabilidad económica del proceso está regida por la regeneración y recuperación del carbón una vez se ha agotado su capacidad de adsorción. La capacidad de adsorción de un carbón virgen es mayor que la de un carbón regenerado. Si se trata de carbón granular, su regeneración se lleva a cabo con la oxidación de la materia orgánica y su posterior eliminación de la superficie del carbón en un horno, por lo que no presenta grandes dificultades y solo se destruye entre un 5 y 10 % del carbón.



**Figura 24.** Tratamiento con carbón activo

### 12.5.1.

### Tratamientos con carbón activo granular

Es la disposición del tratamiento más común: se utiliza una columna como medio de contacto entre el agua residual y el carbón activo. Éste está dispuesto sobre un sistema de drenaje situado en la parte inferior. Los sistemas típicos pueden funcionar a presión o por gravedad, y pueden ser de flujo ascendente o descendente, de lecho fijo, expandido o conectados con dos o tres columnas en serie. Las posibilidades que esta variante ofrece son bastante amplias y la elección de un tipo u otro dependerá de factores de diseño y económicos únicamente.

Las columnas de flujo ascendente se disponen de manera que el líquido fluya

Desde la parte inferior hacia la superior. A medida que el carbón va adsorbiendo la materia orgánica, la mayor densidad de las partículas más pesadas o más desgastadas hace que se vayan hacia el fondo. Como el flujo ascendente tiende a expandir el flujo, el efluente presenta una mayor proporción de finos debido a las colisiones entre partículas.

Las columnas de flujo descendente suelen presentar grupos de dos o tres columnas en serie, empleando soportes de arenan o grava para el carbón. Presenta la ventaja que permite la eliminación de la materia orgánica y de los sólidos suspendidos en un solo paso pero suelen requerir de lavados frecuentes para eliminar la materia acumulada y el taponamiento de los poros del carbón hace que haya que regenerarlo, reduciendo su vida útil.

### 12.5.2.

### *Tratamientos con carbón activo en polvo*

Es una alternativa a los sistemas de columna con carbón granular. Consiste en añadir carbón activado en polvo a los efluentes de los tratamientos biológicos, directamente en las unidades de tratamiento, o en un tanque aparte. En el caso de la adición en el efluente, el carbón activo en polvo se añade a un tanque de contacto. Transcurrido el tiempo deseado de contacto, se deja que el carbón sedimente en el fondo pudiéndose utilizar algún coagulante auxiliar para favorecer este proceso.

Existe un proceso denominado PACT que combina el uso del carbón activo en polvo con el proceso de fangos activados por la que la oxidación biológica y la adsorción química se producen simultáneamente. La adición de carbón directamente al tanque de aireación es muy efectiva para la eliminación de ciertos materiales orgánicos refractarios solubles, da mayor estabilidad al sistema frente a cargas de choque; eliminación del color y el amoníaco mejora la sedimentabilidad del fango. Aunque, no es aplicable siempre ya que la presencia de ciertos compuestos inhiben el proceso de nitrificación y el uso del carbón limita o reduce estos efectos.

## 12.6. Desinfección

La desinfección consiste en la destrucción selectiva de microorganismos. No todos los organismos se destruyen durante el proceso ya que, a diferencia con la esterilización, no se produce la destrucción de la totalidad de los microorganismos. En el campo de las aguas residuales, los tres tipos de microorganismos que son patógenos para el ser humano son las bacterias, virus y amebas.

Los requisitos que tiene que cumplir un desinfectante ideal son:

- Elevada toxicidad para los microorganismos a temperatura ambiente pero o lo tiene que ser para las formas de vida superiores.
- Tiene que ser soluble en el agua o en el tejido celular y su disolución ha de ser homogénea.
- Presentar una estabilidad prolongada y tiene que desodorizar a la vez.
- Tiene que tener la capacidad de penetrar a través de las superficies de la materia orgánica bacteriana solamente.
- Se tiene que disponer en grandes cantidades y a un precio razonable.

### 12.6.1.

### *Mecanismos de acción de los desinfectantes*

El hecho que una sustancia o método (físico o químico) sea nocivo para un microorganismo indica que la acción de los agentes desinfectantes se centra en atacar ciertas reacciones o mecanismos que tienen una importancia vital de la célula bacteriana. Los mecanismos de acción de los diferentes desinfectantes se pueden resumir en los cuatro siguientes:

- Daños a la pared celular: da lugar a la lisis celular y a la muerte de la célula.

- Alteración de la permeabilidad de las células: destruyen la permeabilidad de la célula dejando escapar algunos nutrientes esenciales como el nitrógeno o el fósforo.
- Alteración de la naturaleza coloidal del protoplasma: ocasiona alteraciones en las proteínas del interior de la célula.
- Inhibición de la actividad enzimática: se trata de alterar la estructura espacial de la enzima dando lugar su desactivación.

### 12.6.2. Factores que influyen en la acción desinfectante

En cualquier sistema de desinfección, existen unos parámetros los cuales determinarán la eficacia de la desinfección. Es importante nombrarlo ya que de ellos depende la calidad biológica. Dentro de estos factores encontramos:

- Tiempo de contacto: posiblemente sea la variable más importante en el proceso de desinfección. Se demuestra que, para una concentración dada de microorganismos, la tasa de mortalidad de éstos aumenta cuando aumenta el tiempo de contacto, si bien puede haber desviaciones. Desarrollando la expresión de Chick, tenemos que la relación de microorganismos entre el instante t y el instante inicial, es:

$$\ln \frac{N_t}{N_0} = -kt \text{ donde } k \text{ es una constante (tiempo}^{-1}\text{)}$$

- Tipo y concentración del agente químico: según el tipo de agente químico utilizado, y dentro de ciertos límites, se ha podido demostrar que la efectividad de la desinfección está relacionada con la concentración.
- Intensidad y naturaleza del agente físico: se utilizamos el calor o la radiación electromagnética como agente de desinfección, es evidente que la efectividad está relacionada con la intensidad de aplicación de éstos.
- Temperatura: el aumento de la temperatura produce un aumento de la velocidad de mortalidad. Este efecto puede explicarse mediante una forma de la relación de Van't Hoff-Arrhenius.
- Número y naturaleza de los microorganismos: es evidente afirmar que el número de microorganismos presentes en una determinada cantidad de agua está directamente relacionado con el tiempo de aplicación del sistema de desinfección, que tendrá una mayor o menor efectividad dependiendo del tipo de microorganismos que se traten.
- Naturaleza del medio líquido: en determinados procedimientos de desinfección, es importante que el agua a tratar sea perfectamente cristalina o que el grado de turbidez sea el menor posible ya que estos factores pueden reducir sensiblemente la efectividad del método.

### 12.6.3. Desinfección con cloro

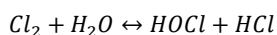
Es el desinfectante más conocido y de aplicación más corriente debido a que cumple una gran parte de los requisitos que se suponen a un buen agente y que se han nombrado anteriormente. Los compuestos de cloro que se utilizan

habitualmente en las plantas depuradoras son el cloro gas ( $\text{Cl}_2$ ), hipoclorito sódico ( $\text{NaOCl}$ ) y el dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ). Los hipocloritos solo tienen aplicación en plantas de tamaño reducido.

El cloro se suministra en forma de gas licuado a alta presión en distintos recipientes, la capacidad de los cuales depende de varios factores como el coste de transporte, espacio disponible o cantidad de cloro necesaria.

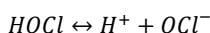
Debido a las propiedades químicas de la sustancia, es posible la disolución de grandes cantidades de cloro en el agua. Cuando se añade cloro al agua se producen dos reacciones: la reacción de hidrólisis y la de ionización:

*La reacción de hidrólisis se puede escribir de la siguiente manera:*

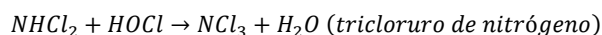
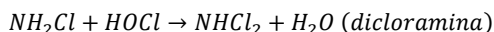
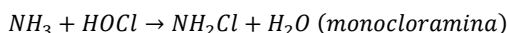


En la práctica, el ácido clorhídrico formado reaccionará con la alcalinidad del agua residual por lo que la caída del pH, en la mayoría de los casos, será pequeña.

*La reacción de ionización se puede definir como:*



A la cantidad de HOCl y de  $\text{Cl}^-$  se le denomina cloro libre disponible pero la cantidad de otra especie en el agua es muy importante dado que no tienen la misma capacidad destructiva. Una reacción muy frecuente del ácido hipocloroso es la de formación de cloraminas debido a la presencia de amoníaco o nitrato (si la planta desarrolla la nitrificación) según estas reacciones:



Todas estas reacciones dependen del pH, de la temperatura y del tiempo de contacto. El cloro presente en este tipo de compuestos recibe el nombre de cloro combinado y también tiene aplicación como desinfectante aunque su eficacia es muy reducida ya se necesitan concentraciones mayores a tiempo de contacto más prolongado para llegar al mismo poder bactericida. No obstante, con tiempo de contacto adecuado, la monocloramina puede ser tan efectiva como el cloro.

#### REACCION AL BREAKPOINT

Como se ha visto hasta ahora, el cloro presenta una gran facilidad para reaccionar con el nitrógeno dependiendo de las condiciones de pH y temperatura y esto hace que sea complicado que el agua tenga una cantidad de cloro suficiente para llevar a cabo la desinfección. Por este motivo, es necesaria la adición de cloro hasta un nivel que se conoce como el Breakpoint a partir del cual se asegura la presencia de cloro libre para llevar a cabo la desinfección.

Al ir adicionando cloro al agua, éste se reduce a ión cloruro por reacción con iones metálicos,  $\text{H}_2\text{S}$  o materia orgánica. Al continuar la adición, el cloro continuará reaccionando pero con el amoníaco para formar cloraminas según las reacciones anteriores. Dependiendo de la relación entre el cloro y el amoníaco, predominará una especie u otra. A continuación, algunas cloraminas se

convierten en tricloruro de nitrógeno mientras que las otras se oxidan a óxido nitroso ( $N_2O$ ) y nitrógeno ( $N_2$ ) y el cloro se reducirá a ion cloruro. Si se continua añadiendo cloro, todas las cloraminas se oxidarán en el breakpoint y a partir de aquí, cualquier adición de cloro será proporcional a la cantidad de cloro libre presente en el agua residual (hipoclorito sin reaccionar).

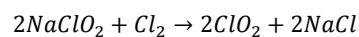
Este proceso se puede representar en una curva en la que en ordenadas representamos los ppm de cloro residual y en abscisas la cantidad de cloro añadido (ppm). La forma de esta curva puede variar significativamente si existen otros compuestos que puedan reaccionar con el cloro.

La experiencia demuestra que para una misma carga de DBO, DQO y de contenido en nitrógeno, la eficacia puede variar bastante entre una planta y otra. La causa parece ser la estructura de la materia orgánica como sus grupos funcionales, características químicas, etc. pueden afectar el proceso de desinfección. De igual forma pasa con la edad de los microorganismos en el que una población joven es más fácilmente atacada por la sustancia, por lo que son necesarios tiempos de retención menores.

#### 12.6.4. *Desinfección con dióxido de cloro*

El dióxido de cloro es otra sustancia bactericida que presenta un poder de desinfección igual o superior al cloro, sobretodo en la inhibición e inactivación del virus debido que puede actuar sobre la estructura proteica de éstos. En el pasado, el uso de dióxido de cloro no era viable debido a su elevado coste económico. El  $Cl_2O$  comercial suele tener un 80 % de pureza.

La generación del dióxido de cloro se tiene que llevar a cabo in situ porque es un gas inestable y explosivo. En el proceso es necesario hacer reaccionar al clorito de sodio ( $NaClO_2$ ) con cloro en una columna de porcelana para producir el dióxido en forma gaseosa de acuerdo a la siguiente reacción:



El sistema de actuación del dióxido de cloro no es del todo conocido en la actualidad. En sistemas acuosos, el agente desinfectante que se presenta es el dióxido de cloro libre disuelto. Esta sustancia presenta un potencial de oxidación extremadamente alto lo que puede explicar su gran poder bactericida ya que parece ser que los mecanismos bactericidas tienen que ver con la inactivación de los sistemas enzimáticos críticos, o con la interrupción y destrucción del proceso de síntesis de proteínas.

De igual forma, tampoco se conocen con exactitud los posibles problemas a nivel ambiental que esta sustancia puede provocar para se considera que no son tan nocivos como los derivados del proceso de cloración pues el dióxido de cloro no reacciona con el agua ni se disocia con ella. Teniendo en cuenta, que el agente oxidante se obtiene a partir del cloro y del clorito sódico, es posible que exista una cantidad remanente de cloro libre en la solución de dióxido de cloro con lo que el impacto sobre el medio ambiente acuático sería parecido al producido por el cloro residual. También existiría una cantidad residual de dióxido de cloro, pero se ha demostrado que su influencia no es tan nociva para el ecosistema acuático. La utilización del dióxido de cloro puede dar lugar a productos finales potencialmente tóxicos, como el clorito o el clorato, y la presencia en forma de componentes con cloro en el agua residual. No obstante, estos productos se

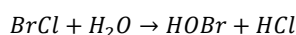
degradan a una velocidad mayor que el cloro residual por lo que no pueden representar una amenaza tan directa para la vida acuática.

Una ventaja que presenta esta sustancia es que no reacciona con el amoníaco para dar cloraminas ni se forman compuestos halogenados en cantidades apreciables. Este hecho es importante en cuanto a la formación de cloroformo que es una sustancia que se sospecha que tiene efectos cancerígenos.

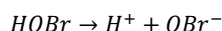
#### 12.6.5. *Desinfección con cloruro de bromo*

El cloruro de bromo es un producto químico corrosivo y peligroso. No es posible clasificar el cloruro de bromo como un desinfectante de eficacia demostrada pero parece ser que es tan fiable, flexible y efectivo como el cloro. Aunque no se han llegado a establecer valores estándar de tiempo de contacto, sí es posible afirmar que suele ser inferior al necesario por la desinfección con cloro. Es preciso llevar a cabo más investigaciones para verificar las cantidades de cloruro de bromo necesarias para obtener efluentes de determinada calidad; determinar el método de aplicación más conveniente en cada caso y obtener datos sobre los efectos a corto y largo plazo, del cloruro de bromo sobre la vida acuática, entre otros.

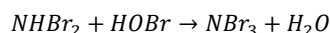
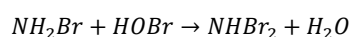
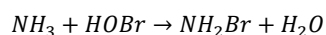
Esta sustancia también sufre la hidrólisis en agua:



Dado que el ácido hipobromoso es un ácido débil, se disocia de acuerdo a la siguiente reacción:



Al igual que pasaba con la cloración, la bromocloración también genera aminas halogenadas. El cloruro de bromo reacciona con el amoníaco para formar bromaminas de la siguiente forma:



Las bromaminas son menos estables que las cloraminas, y se descomponen en sales de cloro y bromo inocuas en menos de una hora. No obstante, las bromaminas son germicidas más efectivos.

A parte de las bromaminas, también se producen otras sustancias orgánicas bromadas que son susceptibles de experimentar una degradación hidrolítica y fotoquímica por lo que no es previsible que perduren en cantidades significativas en las aguas receptoras. Se ha podido comprobar que se bioacumulan en peces expuestos a este tipo de sustancias si bien están en concentraciones inferiores a las de otros tóxicos.

Debido a las similitudes entre el cloro y el bromo, era de esperar que los efectos ambientales relacionados con el uso del cloruro de bromo fueran parecidos a los relacionados con el uso del cloro. Las investigaciones realizadas afirman que el bromo residual es menos tóxico que el cloro residual, por lo que las limitaciones en cuanto a la presencia de bromo residual no son tan estrictas.



### 12.6.6.

### *Desinfección con ozono*

El uso del ozono se centraba en el control de los agentes responsables de la producción de sabores, olores y colores. Debido a que el ozono es un oxidante extremadamente reactivo, se usa como desinfectante en la destrucción de las bacterias por desintegración de la pared celular. También es un virucida muy efectivo, con una efectividad mayor que el cloro. Además, la ozonización no produce sólidos disueltos ni se ve afectada por la presencia del ion amonio ni del pH del agua que entra en el proceso de desinfección. Por estas razones se considera la ozonización como una alternativa viable a la cloración, especialmente en aquellos casos en los que es preciso declorar el agua desinfectada.

Debido a que el ozono es químicamente inestable, se descompone en oxígeno muy rápidamente después de su generación. Esto permite elevar la concentración de oxígeno disuelto del efluente hasta valores próximos a la saturación, por lo que no será necesario reaerar el efluente para cumplir las normativas de calidad. No obstante, también requiere que la síntesis del ozono se lleve a cabo in situ.

El ozono se puede generar a partir de aire, o de oxígeno puro, al hacer circular una corriente de alto voltaje entre dos electrodos separados por un espacio muy pequeño. La corona de alta energía que se produce con este sistema permite disociar una molécula de oxígeno para que, al juntarse con otras dos, produzca dos moléculas de ozono.

La corriente de gas que se produce en el proceso puede contener entre 0,5 y 3% de ozono si se trabaja con aire, el doble si se trabaja con oxígeno.

Los efectos del ozono sobre el medio ambiente son esencialmente beneficiosos. La formación de subproductos tóxicos durante la ozonización depende de la dosis de ozono, del tiempo de contacto y de los componentes inicialmente presentes. Si bien, hay textos que indican que el ozono puede ser un tóxico agudo para la vida acuática, el ozono se suele disipar muy rápidamente en el efluente por lo que no es probable que quede una cantidad apreciable de ozono residual en el efluente en el momento de ser vertido.

### 12.6.7.

### *Desinfección con rayos ultravioleta*

La desinfección de aguas de abastecimiento basada en la radiación emitida por fuentes de rayos ultravioleta (UV) se centraba en la desinfección de aguas de suministro de alta calidad. En aguas residuales, se ha podido comprobar que una correcta dosificación de rayos UV es un eficaz bactericida y virucida, además de no contribuir a la formación de compuestos tóxicos. La radiación con longitud de onda entorno a 254 nm penetra en la pared celular y es absorbida por el ADN y ARN, lo cual puede impedir la reproducción o producir directamente la muerte de la célula. No obstante, para que el sistema sea efectivo, es conveniente que el agua no presente turbidez, que podría absorber la radiación ya que se ha comprobado que no es un desinfectante eficaz en aguas residuales que presenten altas concentraciones de sólidos.

El principal método de generación de radiación ultravioleta es la luz de arco de mercurio a baja presión. Ésta presenta la ventaja que el 85 % de la luz emitida es monocromática, con una longitud de onda de 253,7 nm. Para producir energía

UV, la luz se carga por contacto con un arco eléctrico que produce la excitación del vapor contenido en la luz.

Puesto que no se trata de un agente químico, la radiación UV no produce residuos tóxicos. Puede provocar la alteración de determinados compuestos químicos pero existe la seguridad que se transforman en formas más inofensivas. Por tanto, se puede afirmar que la desinfección mediante radiación UV no tiene efectos positivos ni negativos sobre el medio ambiente.

# **CAPÍTULO 13:**

# **BIBLIOGRAFIA**

## **13.1. Bibliografía de Consulta**

- J.L. Bueno, H. Sastre, A.G. Lavin. "Contaminación e ingeniería ambiental: contaminación de las aguas". Ficyt, 1997
- Lary W. Canter. "Manual de evaluación de impacto ambiental". Editorial Mc Graw Hill, USA, 1997.
- Aurelio Hernández Muñoz. "Depuración De Aguas Residuales". Editorial Paraninfo. 4a edición, 1998. Madrid
- Robertt A. Corbitt. "Manual de referencia de la ingeniería ambiental". Editorial Mc Graw Hill, 2003
- Aurelio Hernández Muñoz, Aurelio Hernández Lehmann y Pedro Galán Martínez. "Manual De Depuración Uralita". Editorial Paraninfo. 1ª Edición 1995. Madrid
- Degremont, "Manual técnico del agua", Editorial Grijelmo, 1.999
- Jose Maria Martí Deulofeu. "Tratamientos de aguas". Stenco, 2ª edición. 2003
- Metcalf & Eddy, "Ingeniería de aguas residuales" 3ª Edición, Editorial McGraw-Hill, Aravaca (Madrid) 1.995
- José Catalán Lafuente. "Depuradoras, bases científicas". Editorial Bellisco, Madrid, 1997.
- "Directiva 91/271/CEE" sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas.
- Xavier Doménech. "Química ambiental. El impacto ambiental de los residuos". Editorial Miraguano. 3ª edición. Madrid. 1997.
- Metcalf-Edy. "Ingeniería sanitaria, tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales". Editor Centeneri (Colombo), Colombia. 1994.
- R.S. Ramalho. —Tratamiento de aguas residuales. Editorial Reverté, S.A..Segunda edición. 2003
- Mariano Seoáñez Calvo, "Depuración de las aguas residuales por tecnologías ecológicas y de bajo costo". Publicat per Mundi-Prensa Libros, 2005 .

Fair-Okun. "Abastecimiento de aguas y remoción de aguas residuales". Editorial Limusa, s.A. México. 1994.

<http://www.municat.gencat.cat>

<http://www.ccmareme.es>

[http://es.wikibooks.org/wiki/Ingenier%C3%ADa\\_de\\_aguas\\_residuales](http://es.wikibooks.org/wiki/Ingenier%C3%ADa_de_aguas_residuales)

<http://www.miliarium.com>

<http://aca.web.gencat.cat>

<http://civil.udg.es/normacivillestatal/real/LAguas.htm>

<http://www.currenta.es>





Escola Universitària d'Enginyeria  
Tècnica Industrial de Barcelona  
Consorci Escola Industrial de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

**Anexos**

PROYECTO FINAL DE CARRERA

A detailed illustration of a large, multi-story building with a central tower and arched windows, serving as the background for the title.

# "ESTACION DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES"

PFC presentado para optar al título de Ingeniero  
Técnico Industrial especialidad QUÍMICA  
por **Jose Antonio Cerezo Castro**

Barcelona, 15 de Junio de 2011

Tutor proyecto: Leopoldo de Miguel Gisbert  
Departamento de Ingeniería Química (DEQ)  
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)



# ÍNDICE MEMÒRIA

Índice memòria .....	1
1. Introducció.....	5
2. Historia de la depuració de aguas residuales.....	7
3. La agencia catalana del agua.....	8
4. La contaminación de aguas .....	10
<b>Sección 4.01 Sustancias contaminantes del agua .....</b>	<b>11</b>
(a) Microorganismos Patógenos. ....	11
(b) Desechos Orgánicos. ....	11
(c) Sustancias Químicas Inorgánicas. ....	11
(d) Nutrientes Vegetales Inorgánicos. ....	11
(e) Compuestos Orgánicos. ....	12
(f) Sedimentos y Materiales Suspendidos. ....	12
(g) Sustancias Radiactivas. ....	12
(h) Contaminación Térmica. ....	12
5. Tipos de aguas residuales. ....	12
<b>Sección 5.01 Aguas Blancas.....</b>	<b>12</b>
<b>Sección 5.02 Aguas negras .....</b>	<b>13</b>
<b>Sección 5.03 Aguas Residuales Industriales .....</b>	<b>13</b>
6. Análisis de los vertidos .....	15
7. Que es una E.D.A.R.....	15
8. Tipos de E.D.A.R.....	16
9. Tratamientos que realiza una E.D.A.R.....	16
<b>Sección 9.01 Pretratamiento: .....</b>	<b>18</b>
<b>Sección 9.02 Tratamiento primario:.....</b>	<b>18</b>
<b>Sección 9.03 Tratamiento secundario:.....</b>	<b>19</b>
(a) Fangos activos.....	19
(b) Camas bacterianas.....	19
(c) Biodiscos .....	19
<b>Sección 9.04 Tratamientos terciarios:.....</b>	<b>20</b>
(a) 8.4.1. Adsorción. ....	20
(b) 8.4.2. Intercambio iónico. ....	21

(c)	8.4.3. Ultrafiltración. ....	21
(d)	8.4.4. Osmosis inversa. ....	21
(e)	8.4.5. Electrodialisis. ....	21
(f)	8.4.6. Stripping. ....	22
(g)	8.4.7. Oxidación-reducción. ....	22
(h)	8.4.8. Desinfección. ....	22
10.	Esquema de una E.D.A.R. ....	23
11.	Bibliografía ....	25







# 1. Introducción

El agua es un recurso natural escaso, indispensable para la vida y para el ejercicio de la inmensa mayoría de las actividades económicas; es irremplazable, no ampliable por la mera voluntad del hombre, irregular en su forma de presentarse en el tiempo y en el espacio, fácilmente vulnerable y susceptible de usos sucesivos.

Asimismo el agua constituye un recurso unitario, que se renueva a través del ciclo hidrológico y que conserva, a efectos prácticos, una magnitud casi constante dentro de cada una de las cuencas hidrográficas del país.

Consideradas, pues, como recurso, no cabe distinguir entre aguas superficiales y subterráneas. Unas y otras se encuentran íntimamente relacionadas, presentan una identidad de naturaleza y función y, en su conjunto, deben estar subordinadas al interés general y puestas al servicio de la nación. Se trata de un recurso que debe estar disponible no sólo en la cantidad necesaria, sino también con la calidad precisa, en función de las directrices de la planificación económica, de acuerdo con las previsiones de la ordenación territorial y en la forma que la propia dinámica social demanda.

Esta disponibilidad debe lograrse sin degradar el medio ambiente en general, y el recurso en particular, minimizando los costes socio-económicos y con una equitativa asignación de las cargas generadas por el proceso, lo que exige una previa planificación hidrológica y la existencia de unas instituciones adecuadas para la eficaz administración del recurso.

Se considera que las propiedades físicas y químicas del agua son las responsables de que la Tierra sea tal como se conoce y que la vida misma es consecuencia de las propiedades tan especiales de la molécula de agua, ya que se considera que las primeras formas primitivas de vida comenzaron en una solución acuosa.

El agua forma una capa que cubre cerca del 71 % de la superficie del planeta Tierra, la mayor parte es salobre y una parte muy pequeña es agua dulce. Contribuye a mantener el clima en la Tierra, disuelve a una gran cantidad de sustancias, que pueden llegar a ser contaminantes, y es esencial para las formas de vida conocidas en la Tierra.

El agua disponible en la Tierra se encuentra principalmente formando parte de los océanos. Del total de la masa de agua sólo el 2.8 % (36 millones de km<sup>3</sup>) es agua dulce y de ésta cerca del 75% forma el hielo de los casquetes polares de las zonas ártica y antártica. De las aguas que fluyen en los continentes, cerca del 0.63 % (8 millones de km<sup>3</sup>) se encuentran en lagos, ríos y lagunas, y el 0.2 % flota en la atmósfera.

Se considera que el agua es un recurso renovable porque se recicla y se renueva continuamente mediante el ciclo hidrológico del agua y los humanos poco nos preocupamos por hacerla disponible y aprovechable con tratamientos para eliminarle los contaminantes que le

arrojamos, por el contrario se fomenta el desperdicio y contaminación de este vital recurso renovable.

El agua se presenta principalmente como un líquido de características poco comunes, es un recurso natural indispensable para todos los seres vivos y en general forma parte de toda la materia viva, y el hombre la utiliza para realizar muchas de sus actividades como la agricultura, la industria, el transporte y otras actividades diarias.

Se considera al cuerpo humano como un sistema muy complejo y estructurado. El agua es el compuesto químico más abundante en las células vivas, contienen de 65 a 90 % en peso. El agua es la fase dispersante en el estado coloidal de la célula y la fase dispersa la forman las proteínas solubles en el agua. En los organismos vivos los alimentos son transportados a las células en solución o en medio acuoso y los desechos son removidos con la eliminación del agua.

El agua no es un alimento, pero se considera como uno de los componentes de la dieta porque es indispensable para muchos de los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en la naturaleza.

El agua tiene un punto normal de ebullición de 100°C y un punto normal de fusión de 0°C y son muy altos y muy bajos respectivamente con relación a los compuestos de masa molecular semejante y en general a todas las sustancias líquidas. Esto hace que las aguas superficiales de la Tierra y la de los tejidos de los seres vivos se encuentren en fase líquida en condiciones ambientales por lo que resulta de gran importancia para los procesos vitales, y sería un gran problema para que se realizaran estos procesos si se encontrara en fase sólida o vapor.

El agua líquida debido a su gran capacidad calorífica (1 cal/g °C) puede almacenar gran cantidad de energía calorífica sin cambiar mucho su temperatura. Esta propiedad del agua permite que grandes cantidades de agua no se calienten ni se enfríen con mucha rapidez, y en consecuencia protege a los seres vivos de los cambios bruscos de temperatura y además contribuye a mantener un clima moderado en la Tierra. También hace que el agua sea un buen regulador de temperatura corporal de los seres vivos y un refrigerante muy eficiente en procesos industriales que liberan mucho calor y en sistemas de enfriamiento de automotores.

El agua líquida es la única sustancia común que cuando se congela se expande, al contrario de lo que ocurre con las demás sustancias, y en consecuencia el agua sólida (hielo) tiene una densidad menor que el agua líquida, debido a que forma enlaces por puente de hidrógeno y se forma una estructura hexagonal. Esta propiedad del agua hace que el hielo flote en el agua líquida y en consecuencia las grandes cantidades de agua se congelan de arriba hacia abajo, lo que hace posible la vida acuática en los lugares de clima frío (calor de fusión del hielo 79.7 cal/g). Otras consecuencias de la expansión del agua al congelarse son las cuarteaduras en rocas, suelo, calles, ruptura de tuberías y grietas en los motores de autos en lugares de climas fríos (para evitarlo se utilizan anticongelantes en el sistema de refrigeración de los autos).

El agua líquida tiene un calor de vaporización muy grande (539.6 cal/g), lo que significa

que absorbe 539.6 cal por cada gramo de agua que se evapora y la libera al condensarse. Esta es la razón por la que el proceso de evaporación en plantas y animales es un proceso de enfriamiento eficiente, se percibe la sensación de frescura cuando se evapora el sudor de la piel. Los procesos de evaporación y condensación del agua contribuyen a la distribución del calor en la Tierra.

El agua es un compuesto con propiedades físicas y químicas muy diferentes a otros compuestos formados por moléculas de masa molecular semejante a la del agua. El agua es un solvente de gran cantidad de sales inorgánicas, de compuestos orgánicos y de gases. Debido a su polaridad y a la formación de enlaces por puente de hidrógeno, el agua facilita la realización de muchas de las funciones biológicas. Disuelve a compuestos iónicos y moléculas neutras, las soluciones acuosas diluidas influyen en la disociación de macromoléculas como las proteínas y los polinucleótidos, es decir, que el agua sirve como medio dispersante y ejerce una influencia importante sobre los componentes estructurales y funcionales de las células.

El agua tiene la capacidad de disolver una gran cantidad y variedad de sustancias lo que le proporciona la posibilidad de ser un buen medio de transporte de muchas sustancias, en los seres vivos transporta nutrientes y productos de desecho. Esta propiedad también implica que sirve como medio de transporte de contaminantes de los océanos, ríos, lagos, suelo y aire.

El agua líquida tiene una gran tensión superficial debido a las fuerzas de atracción entre sus moléculas (hace que la superficie de un líquido se contraiga) y una gran capacidad humectante (capacidad para adherirse y recubrir a un sólido). La gran tensión superficial del agua hace posible el fenómeno de la capilaridad, que junto con su capacidad disolvente hacen posible que las plantas puedan tomar los nutrientes del suelo necesarios para su crecimiento.

## **2. Historia de la depuración de aguas residuales**

Los primeros principios mecánicos y biológicos para la depuración de las aguas del alcantarillado público se establecieron ya a finales del siglo XIX. El tratamiento mecánico, biológico y químico de las aguas residuales industriales comenzó aproximadamente a mediados de la década de 1950. Anteriormente se partía en general de la base de que las aguas residuales químicas no podían depurarse biológicamente.

1901: Bayer crea una «Comisión de Aguas Residuales» en el centro de producción de Leverkusen.

1909: Las aguas residuales emitidas por la fábrica se registran mensualmente.

1928: Se analizan periódicamente determinados parámetros (29 componentes) de las aguas residuales.

1954: Se crea un laboratorio para el análisis de aguas residuales y emisiones de gases (conocido como laboratorio A W ALU).

1958 Se construye la primera depuradora de Bayer AG en la factoría de Dormagen de forma conjunta con EC (Erdolchemie GmbH).

1966 Una depuradora mecánico-biológica en la zona de Flittard de la factoría de Leverkusen sucede al proyecto precursor del año 1958. La experiencia obtenida con esta planta se utiliza posteriormente en la construcción de la depuradora común de Leverkusen. En esta depuradora común se depuran las aguas residuales del CHEMPARK y de la cuenca inferior del Wupper (Confederación del Wupper).

1971 Se pone en marcha la primera fase de ampliación (actualmente segunda etapa de depuración).

1975 Comienza a funcionar la depuradora biológica del CHEMPARK de Uerdingen.

1978 Creación de la segunda depuradora mecánico-biológica en el CHEMPARK de Dormagen.

1980 Segunda fase de la planta de Leverkusen, con incorporación de una biocolumna de Bayer.

2002 El acuerdo de cooperación existente entre Bayer Industry Services (actualmente CURRENTA) y la Confederación del Wupper para la depuración de las aguas del alcantarillado público se prorroga hasta el año 2011.

2007 Concluye con éxito la primera fase de construcción de la nueva biocolumna. El proyecto «Biología de cascada» deberá concluir en 2010 y reducir el contenido de nitrógeno de las aguas residuales en más del 40%.

### **3. La agencia catalana del agua**

En Cataluña la encargada de legislar lo correspondiente al agua es la Agencia que se regula mediante el Decreto legislativo 3/2003, de 4 de noviembre, por el cual se aprueba el texto refundido de la legislación en materia de aguas de Cataluña, el cual ordena las competencias de la Generalitat y las de los entes locales en materia de aguas y obras hidráulicas. También se regula mediante los estatutos, los cuales despliegan su estructura organizativa y el régimen de

funcionamiento.

El principio básico que rige la política y la gestión del agua es el principio de sostenibilidad en sus cuatro aspectos: el ambiental, el de garantía, el económico y el social.

La gestión del agua del Gobierno de la Generalitat tiene como principal objetivo incorporar plenamente los criterios que motivan la Directiva Marco del Agua aplicados a las circunstancias específicas de Cataluña, entre los que destacan la prevención del deterioro de los ecosistemas, la consecución del buen estado ecológico de las masas de agua superficiales y el buen estado químico y cuantitativo de las aguas subterráneas.

La Agencia Catalana del Agua asume estos objetivos mediante el desarrollo de un sistema de gestión sostenible de los recursos existentes, de forma que se satisfagan las necesidades - razonablemente expresadas- de la población y de los agentes económicos sin dañar los sistemas acuáticos, y velando por un uso racional y eficiente de los recursos que garantice la preservación y la disponibilidad futuras.

En este sentido, la Administración del agua de la Generalitat, cumpliendo los criterios establecidos en la directiva marco y del calendario de actuaciones previsto en ella, está implantando diversas medidas de gestión destinadas a:

- prevenir las afecciones ambientales en el origen
- ordenar los comportamientos (ahorro)
- gestionar el recurso y la demanda (reutilización), de forma que se dé a cada tipo de agua el uso más adecuado, y
- garantizar el acceso a la cantidad y calidad de agua adecuadas de todos los ciudadanos.

Estas medidas son tanto de oferta como de demanda, infraestructurales o de gestión, o bien combinaciones de ambas, a escalas igualmente distintas y con horizontes temporales diferentes. La única exigencia es que aporten mejoras significativas al sistema de abastecimiento y, sobre todo, de garantía y mejora de la calidad de las cuencas internas de Cataluña, siempre a partir de las pautas establecidas por la política del agua de la Generalitat y la legislación vigente.

De esta forma, la gestión del agua implica un cambio en la filosofía del que gobierna, del que la gestiona y del que la consume.

Sin este cambio cultural no puede tener éxito ningún conjunto de medidas técnicas destinadas a ganar recurso o disminuir el consumo de agua. Por este motivo, se han establecido mecanismos de amplia participación que impliquen a la población. Asimismo, la gestión eficiente del agua y su uso racional exigen un análisis global del entorno y del territorio. La mejor política de gestión sostenible del agua debe ir acompañada de un modelo territorial sostenible que incluya medidas de fomento del ahorro de agua en todos los sectores.

## 4. La contaminación de aguas

La OMS ha establecido, también, los límites máximos para la presencia de sustancias nocivas en el agua de consumo humano:

**Tabla 1. Límites máximos.**

Sustancias	Concent. Máxima (mg/l)
Sales totales	2000
Cloruros	600
Sulfatos	300
Nitratos	45
Nitritos	No debe haber
Amoniaco	0.5
Mat. Org.	3
Calcio	80
Magnesio	50
Arsénico	0.05
Cadmio	0.01
Cianuros	0.05
Plomo	0.1

De acuerdo a la definición que da la OMS para la contaminación debe considerarse también, tanto las modificaciones de las propiedades físicas, químicas y biológicas del agua, que pueden hacer perder a ésta su potabilidad para el consumo diario o su utilización para actividades domésticas, industriales, agrícolas, etc., como asimismo los cambios de temperatura provocados por emisiones de agua caliente (polución térmica).

En realidad, siempre hay una contaminación natural originada por restos animales y vegetales y por minerales y sustancias gaseosas que se disuelven cuando los cuerpos de agua atraviesan diferentes terrenos.

Los materiales orgánicos, mediante procesos biológicos naturales de biodegradación en los que intervienen descomponedores acuáticos (bacterias y hongos), son degradados a sustancias más sencillas. En estos procesos es fundamental la cantidad de oxígeno disuelto en el agua porque los descomponedores lo necesitan para vivir y para producir la biodegradación.



## **Sección 4.01 Sustancias contaminantes del agua**

Hay un gran número de contaminantes del agua que se pueden clasificar de muy diferentes maneras. Una posibilidad bastante usada es agruparlos en los siguientes ocho grupos:

### **(a) Microorganismos Patógenos.**

Son los diferentes tipos de bacterias, virus, protozoos y otros organismos que transmiten enfermedades como el cólera, tifus, gastroenteritis diversas, hepatitis, etc. En los países en vías de desarrollo las enfermedades producidas por estos patógenos son uno de los motivos más importantes de muerte prematura, sobre todo de niños.

Normalmente estos microbios llegan al agua en las heces y otros restos orgánicos que producen las personas infectadas. Por esto, un buen índice para medir la salubridad de las aguas, en lo que se refiere a estos microorganismos, es el número de bacterias coliformes presentes en el agua. La OMS (Organización Mundial de la Salud) recomienda que en el agua para beber haya 0 colonias de coliformes por 100 ml de agua.

### **(b) Desechos Orgánicos.**

Son el conjunto de residuos orgánicos producidos por los seres humanos, ganado, etc. Incluyen heces y otros materiales que pueden ser descompuestos por bacterias aeróbicas, es decir en procesos con consumo de oxígeno. Cuando este tipo de desechos se encuentran en exceso, la proliferación de bacterias agota el oxígeno, y ya no pueden vivir en estas aguas peces y otros seres vivos que necesitan oxígeno. Buenos índices para medir la contaminación por desechos orgánicos son la cantidad de oxígeno disuelto, OD, en agua, o la DBO (Demanda Biológica de oxígeno).

### **(c) Sustancias Químicas Inorgánicas.**

En este grupo están incluidos ácidos, sales y metales tóxicos como el mercurio y el plomo. Si están en cantidades altas pueden causar graves daños a los seres vivos, disminuir los rendimientos agrícolas y corroer los equipos que se usan para trabajar con el agua.

### **(d) Nutrientes Vegetales Inorgánicos.**

Nitratos y fosfatos son sustancias solubles en agua que las plantas necesitan para su desarrollo, pero si se encuentran en cantidad excesiva inducen el crecimiento desmesurado de algas y otros organismos provocando la eutrofización de las aguas. Cuando estas algas y otros vegetales mueren, al ser descompuestos por los microorganismos, se agota el oxígeno y se hace imposible la vida de otros seres vivos. El resultado es un agua maloliente e inutilizable.

### **(e) Compuestos Orgánicos.**

Muchas moléculas orgánicas como petróleo, gasolina, plásticos, plaguicidas, disolventes, detergentes, etc..., acaban en el agua y permanecen, en algunos casos, largos períodos de tiempo, porque, al ser productos fabricados por el hombre, tienen estructuras moleculares complejas difíciles de degradar por los microorganismos.

### **(f) Sedimentos y Materiales Suspendidos.**

Muchas partículas arrancadas del suelo y arrastradas a las aguas, junto con otros materiales que hay en suspensión en las aguas, son, en términos de masa total, la mayor fuente de contaminación del agua. La turbidez que provocan en el agua dificulta la vida de algunos organismos, y los sedimentos que se van acumulando destruyen sitios de alimentación o desove de los peces, rellenan lagos o pantanos y obstruyen canales, rías y puertos.

### **(g) Sustancias Radiactivas.**

Isótopos radiactivos solubles pueden estar presentes en el agua y, a veces, se pueden ir acumulando a lo largo de las cadenas tróficas, alcanzando concentraciones considerablemente más altas en algunos tejidos vivos que las que tenían en el agua.

### **(h) Contaminación Térmica.**

El agua caliente liberada por centrales de energía o procesos industriales eleva, en ocasiones, la temperatura de ríos o embalses con lo que disminuye su capacidad de contener oxígeno y afecta a la vida de los organismos.

## **5. Tipos de aguas residuales.**

### **Sección 5.01 Aguas Blancas**

Están constituidas fundamentalmente por aguas de lluvia, que son generadas de las grandes aportaciones intermitentes de caudales. Sin embargo, con el progresivo avance y desarrollo del urbanismo subterráneo (aparcamientos, centros comerciales y de ocio, vías de comunicación, galerías de servicios, etc.) Las aguas de drenaje han ido teniendo una mayor importancia, especialmente por estar muy frecuentemente afectadas por la contaminación

producida por fugas en las redes de alcantarillado.

Las aguas blancas se componen por los siguientes elementos de suciedad:

- Elementos de contaminación atmosférica: deposición húmeda de las vías ácidas.
- Restos de la actividad humana y asociada: papeles, colillas, excrementos de animales (perros, gatos, ... ), restos de la recogida y evacuación de la basura.
- Residuos del tráfico: aceites, grasas, hidrocarburos, compuestos fenólicos y de plomo, etc.
- Arenas, residuos vegetales y biocidas (insecticidas, herbicidas, abonos , ... )
- Contaminación aportada por las aguas de drenaje: aguas salobres, fugas de alcantarillado, etc.

### **Sección 5.02 Aguas negras**

En las aguas negras o urbanas, los compuestos químicos que se encuentran presentes son muchos. Por citar algunos, podríamos mencionar:

microorganismos, urea, albúmina, proteínas, ácido acético y láctico; bases jabonosas y almidones; aceites animales, vegetales y minerales; hidrocarburos; gases: sulfúrico, metano, ... ; sales: bicarbonatos, sulfatos, fosfatos, nitritos, nitratos, ...

### **Sección 5.03 Aguas Residuales Industriales**

Las industrias se clasifican en cinco grupos según sus vertidos:

- Industrias con efluentes principalmente orgánicos: papeleras, azucareras, mataderos, curtidos, conserveras, lecherías y subproductos, fermentaciones, preparación de productos alimenticios, bebidas y lavanderías.

- Industrias con efluentes orgánicos e inorgánicos: refinerías y Petroquímicas, coquerías, químicas y textiles.
- Industrias con efluentes principalmente inorgánicos: Químicas, limpieza y recubrimiento de metales, explotaciones mineras y salinas.
- Industrias con efluentes con materias en suspensión: lavaderos de mineral y carbón, corte y pulido de mármol y otros minerales, laminación en caliente y colada continua.
- Industrias con efluentes de refrigeración: centrales térmicas y centrales nucleares.

El vertido de aguas residuales, según el proceso productivo, será continuo, con una entrada y salida continua de aguas, procesos de transporte, refrigeración, etc., o discontinuo, de menor caudal pero mucho más contaminado.

Cada tipo de actividad industrial, según el proceso, vierte un agua residual caracterizada por una contaminación tipo determinada. De modo general se conocen los parámetros característicos de cada una de ellas, pero es precisa su determinación detallada para valorar su tratamiento y posterior incidencia en el medio receptor

En resumen, las contaminaciones básicas, según el tipo de industria son:

- Industria lechera: concentración de materia orgánica.
- Industria petroquímica: concentración de materia orgánica, aceites, fenoles, amoníaco y sulfuroso
- Industria del curtido: alcalinidad, concentración de materia orgánica, materia en suspensión, materia decantable, sulfuros y cromo.
- Industria papelera: color, concentración de materia orgánica, materia en suspensión y materia decantable, **pH** y AOX-EOX.
- Industrias de lavado de mineral: concentración de productos tóxicos empleados, sólidos en suspensión y sedimentables.
- Industria de acabado de metales: pH, concentración de cianuros y metales pesados.
- Industria siderúrgica: concentración de materia orgánica, fenoles, alquitranes, cianuros libres y complejos, sulfuros, materias en suspensión, hierro, aceites, grasas y pH.
- Industria de laminación en caliente: concentración de aceites, grasas y sólidos en suspensión.
- Plantas de ácido sulfúrico: concentración de ácidos, sólidos sedimentables, arsénico, selenio y mercurio.

Por otro lado, existen otros contaminantes, denominados "contaminantes específicos", los cuales, proceden de industrias muy concretas y, normalmente, punteras, y se caracterizan por ser altamente contaminantes a concentraciones de partes por billón. En este grupo se encuentran agentes tensoactivos, pesticidas, derivados halogenados o fosforados de hidrocarburos, compuestos orgánicos específicos, sales metálicas, compuestos eutrofizantes, etc. Es muy difícil establecer parámetros medios de concentraciones de agentes contaminantes en las distintas industrias, ya que, incluso en el mismo sector, existen diferencias entre dos instalaciones. Con el objetivo de generalizar la carga contaminante contenida en las aguas residuales, por lo menos en lo que respecta a la concentración de materia orgánica, en previsión a tratamientos en plantas depuradoras, se recurre al concepto de "población equivalente", determinado por la relación entre la DBO del agua residual y la que aporta un habitante por día; aproximadamente 60 gr. Todos los parámetros mencionados sirven básicamente para comenzar a clasificar y caracterizar las aguas procedentes de cualquier industria. A partir de aquí, la legislación obliga a su tratamiento previo al vertido con el objeto de reducir al mínimo los impactos negativos sobre los cauces que soporten tales vertidos.

## **6. Análisis de los vertidos**

Es uno de los puntos claves a la hora de plantear un tratamiento de vertidos, ya que una correcta determinación de las características físico-químicas de los mismos, hará más efectivo el tratamiento seleccionado posteriormente. La elección de los laboratorios y de los métodos de análisis es fundamental para conseguir el objetivo de la caracterización del vertido.

A la hora de conocer la carga contaminante de los efluentes industriales es necesario recurrir al análisis físico-químico más o menos exhaustivo, según los casos de los mismos. Los contaminantes en las aguas industriales son normalmente una mezcla compleja de compuestos orgánicos e inorgánicos. Normalmente no es ni práctico ni posible obtener un análisis completo de la mayoría de los efluentes industriales.

Por las razones anteriores se han desarrollado una serie de métodos empíricos para evaluación de la concentración de contaminantes en aguas, cuya aplicación no requiere un conocimiento completo de la composición química específica de las aguas consideradas. Los métodos normalizados más importantes para el análisis de aguas son:

- Determinación de parámetros físico-químicos: turbidez, color, olor, sólidos totales.
- Determinación de contaminantes inorgánicos específicos: metales, aniones.
- Determinación de contaminantes orgánicos: DQO, DBO, COT.

## **7. Que es una E.D.A.R**

Tal como su nombre indica una EDAR es una estación depuradora de aguas residuales, en estas instalaciones se pueden recoger y tratar tanto las aguas residuales como las industriales, ya sea conjunta o separadas, dependiendo de los municipios.

Así pues, resulta evidente que los pequeños núcleos de población precisan de una tecnología de depuración de aguas residuales sostenible y que, en la medida de lo posible, haga uso de la capacidad de depuración del medio natural.

## **8. Tipos de E.D.A.R**

Existen dos clases de E.D.A.R:

- Urbanas, reciben agua residual mayoritariamente de una aglomeración humana.
- Industrial, reciben agua residual de una o varias industrias

## **9. Tratamientos que realiza una E.D.A.R**

Los tratamientos que se pueden realizar en una E.D.A.R se pueden clasificar según el nivel de tratamiento en:

- Pretratamiento
- Primarios
- Secundarios
- Terciarios

**Tabla 2. Etapas del proceso de tratamiento de aguas residuales.**

<b>Etapa</b>	<b>Función</b>	<b>Tipo de procesos</b>
<b>Pretratamiento</b>	Eliminación de sólidos	Físico y/o químico
<b>Tratamiento primario</b>	Eliminación de materia en suspensión	Físico
<b>Tratamiento secundario</b>	Eliminación de materia orgánica biodegradable	Biológico
<b>Tratamiento terciario</b>	Eliminación de sales disueltas, nutrientes, patógenos, materia orgánica refractaria y afino en la reducción de sólidos y demanda biológica de oxígeno	Físico y/o químico y/o biológico
<b>Tratamiento de lodos</b>	Estabilización y reducción de volumen de los lodos o fangos producidos en el tratamiento del agua	Físico y/o químico

### **Sección 9.01    *Pretratamiento:***

El primer caso en la depuración del agua residual tiene que consistir, lógicamente, en una eliminación de materias grandes, cuerpos grandes y arenosos, que su presencia en el afluente perturbaría el tratamiento total y el funcionamiento eficiente de las máquinas, equipos e instalaciones de la estación depuradora.

El pretratamiento suele tener los siguientes pasos (aunque también hay otros):

- Aliviadero de agua en exceso, para evitar sobrecargas hidráulicas en el proceso.
- Desbaste, para la eliminación de las sustancias de medida excesivamente grande.
- Tamizado, para la eliminación de partículas en suspensión.
- Trituración de los elementos retenidos en el aliviadero, sistema útil cuando se quiere evitar la problemática de las rejillas y extracción de subproductos.
- Desarenado, por eliminación de arenas y sustancias sólidas densas en suspensión.
- Desnatado, por eliminación de los diferentes tipos de grasas y aceites presentes en el agua residual, así como de elementos flotantes.

### **Sección 9.02    *Tratamiento primario:***

Principalmente se pretende la reducción de los sólidos en suspensión del agua residual. Dentro de estos SS pueden distinguirse:

- Los sólidos sedimentables: son los que sedimentan al dejar el A.R. en condiciones de reposo durante una hora, este tiempo también depende del tamaño del sedimentador.
- Los sólidos flotantes: definibles por contraposición a los sedimentables.
- Los sólidos coloidales (tamaño entre 10-3-10 micras).
- Como, en general, parte de los SS están constituidos por materia orgánica consecuencia del tratamiento primario suele ser la reducción de la DBO.
- El grado de reducción de éstos índices de contaminación depende del proceso utilizado y de las características del A.R.



### **Sección 9.03 Tratamiento secundario:**

Normalmente los tratamientos secundarios se refieren a tratamiento biológicos aunque también se puede producir tratamientos biológicos. En este segundo tratamientos se produce la degradación de la materia orgánica. Los procesos aerobios pueden ser aerobios y anaerobios. En el tratamiento aerobio los microorganismos utilizan el oxígeno para degradar la materia orgánica que llega con las aguas residuales, y en el tratamiento anaerobio, la oxidación de la materia orgánica se produce en ausencia del oxígeno.

Las bacterias metabolizan y destruyen la materia orgánica disuelta y coloidal que reduce la DBO y la DQO. Son procesos similares a la autodepuración natural consiguiendo una reducción de sólidos disueltos y suspendidos del 90%.

Procesos biológicos principales:

#### **(a) Fangos activos**

Es el sistema más utilizado i consiste en provocar el desarrollo de una bacteria de un cultivo bacteriano disperso en forma de floculos en un deposito agitado, aireado y alímetro en afluencia.

#### **(b) Camas bacterianas**

Se crea una biopelícula aerobiana que se fija en el soporte que está en contacto con el agua, dejando el aire en los intersticios que quedan entre los soportes, cosa que favorece la oxigenación de la biopelícula. El oxígeno y los nutrientes se mezclan con el barro y se metabolizan. Son de diseño y operación fácil pero tienen difícil pronóstico de funcionamiento.

#### **(c) Biodiscos**

Contactores biológicos rotativos, se hace crecer la biomasa sobre su superficie regulándose el movimiento, son discos de 2 a 3 metros de diámetro que gira entre 1 y 7 vueltas

por minuto utilizan menos espacio que la anterior aunque los tiempos de retención son más grandes.

## **Sección 9.04 Tratamientos terciarios:**

Durante muchos años se ha considerado el tratamiento terciario como un tratamiento de afino para sustraer los contaminantes que no podían ser eliminados en las fases de tratamiento anteriores, y dependía mucho del uso posterior que se iba a hacer del agua ya depurada. Sin embargo en los últimos años, este tipo de tratamiento se ha convertido en uso corriente y en el caso de aguas industriales muchas veces es el único que se realiza ya que se trata de eliminar contaminantes muy específicos.

### **(a) 8.4.1. Adsorción.**

Consiste en la propiedad que presentan ciertos materiales (adsorbentes) de fijar en su superficie determinados compuestos del agua residual. Este procedimiento se utiliza con compuestos como fenoles, hidrocarburos aromáticos, derivados clorados, etc., y en episodios en los que se generan problemas de olores. El más usado es el carbón activo que se emplea en forma de polvo y granular, debiéndose regenerar posteriormente.

**(b) 8.4.2. Intercambio iónico.**

Consiste en la sustitución de uno o varios iones presentes en el agua por otros que forman parte de una fase sólida (intercambiador), siendo esta reacción de intercambio reversible. Esta técnica es muy cara, por lo que sólo se utiliza para elementos tóxicos o por su alto valor para recuperados, como por ejemplo: eliminación de isótopos radioactivos, mercurio, cromatos, cianuros, recuperación de oro, platino y otros metales preciosos.

**(c) 8.4.3. Ultrafiltración.**

Se trata de una técnica basada en la separación de las moléculas en función de su tamaño, para ello se utiliza una membrana porosa de tamaño definido, quedando retenidas las moléculas que lo superen. Este procedimiento se utiliza en el tratamiento de aguas de lavado de pinturas, aceites usados, recuperación de sueros de efluentes de queserías, etc.

**(d) 8.4.4. Osmosis inversa.**

Consiste en hacer pasar el agua a través de membranas semipermeables, para ello se debe aplicar una presión hidrostática que venza la presión osmótica del agua a tratar. La ósmosis inversa se utiliza para recuperar metales, para eliminar las sales presentes y para reciclar agua a los procesos.

**(e) 8.4.5. Electrodialisis.**

Consiste en aplicar a efluentes con una alta carga de iones, una diferencia de potencial de forma que los cationes se vayan hacia el cátodo y los aniones al ánodo, entre ambos se introducen membranas de diálisis selectivas, unas permeables a cationes y otras aniones, consiguiendo por lo tanto una parte de agua con alta concentración de iones y agua dulce por otra.

**(f) 8.4.6. Stripping.**

Consiste en la eliminación de ciertos compuestos volátiles por medio de un arrastre con gas. Puede utilizarse vapor de agua (eliminación de amoníaco) ya que la solubilidad de los gases disminuye con la temperatura, y aire a presión para la eliminación de VOC's.

**(g) 8.4.7. Oxidación-reducción.**

Estas reacciones se utilizan para modificar el estado de ciertos metales o compuestos (nitrogenados, sulfurados, cianurados, etc.), con objeto de hacerlos insolubles o no tóxicos.

Así por ejemplo se utiliza el bisulfito o el sulfato ferroso en medio ácido para convertir el Cr VI en Cr III, mucho menos tóxico o bien oxidantes como el cloro para transformar el cianuro en cianato, compuesto no tóxico.

**(h) 8.4.8. Desinfección.**

Se utiliza sobre todo si se pretende realizar posteriormente una reutilización del agua. Su objetivo consiste en destruir los gérmenes patógenos mediante la utilización de procesos normalmente químicos. Se emplea para ello de forma prioritaria el cloro, ozono, etc.

## 10. Esquema de una E.D.A.R.

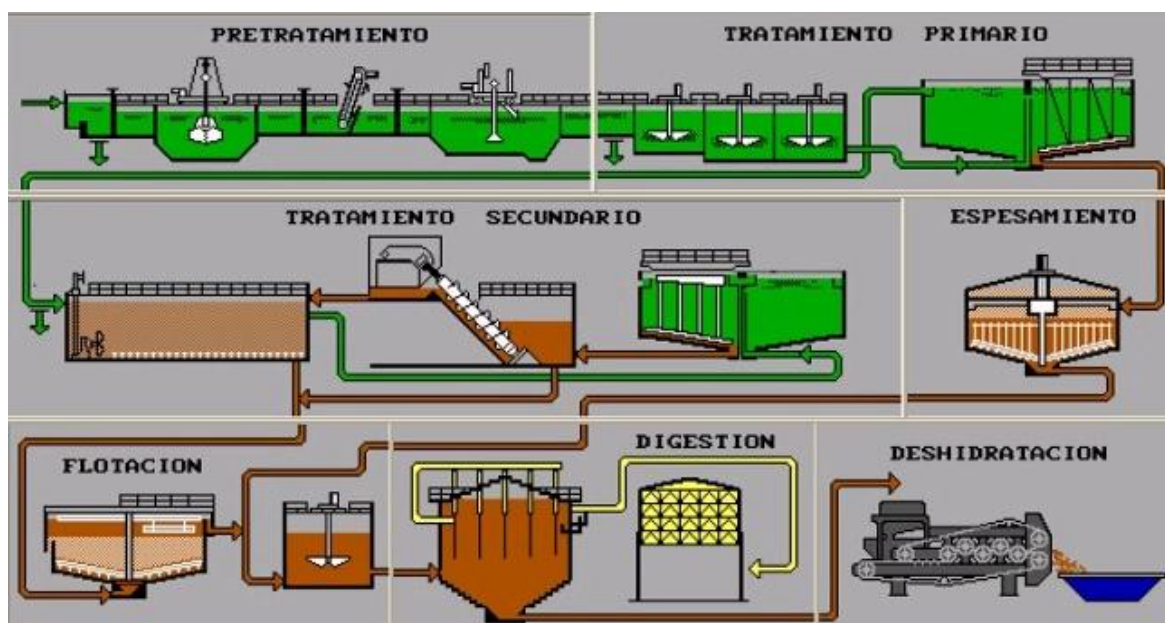
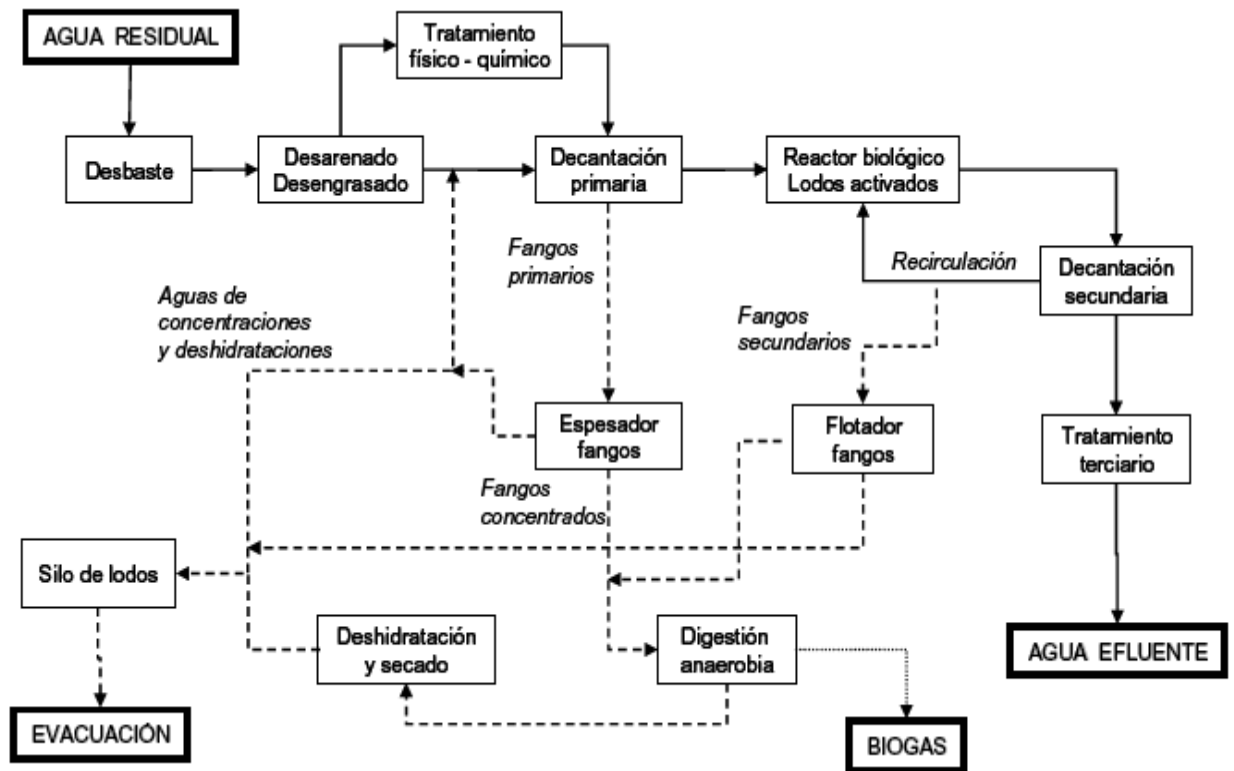


FIGURA 1.ESQUEMA BÁSICO DE UNA ESTACIÓN DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES (EDAR)



## 11. Bibliografía

Agencia Europea del Medio Ambiente. Ministerio de Medio Ambiente - Dirección general de calidad y evaluación ambiental "Señales ambientales 2000" - Informe de la Agencia Europea del Medio Ambiente basado en indicadores.

<http://aca.web.gencat.cat>

<http://civil.udg.es/normacivillestatal/real/LAguas.htm>

J.L. Bueno y otros. "Contaminación E Ingeniería Ambiental. TOMO CONTAMINACIÓN DEL AGUA". Editorial FYDSA. 2a Edición 1997. Madrid.

Degremont, "Manual técnico del agua", Editorial Grijelmo, 1.999

<http://www.curenta.es>

<http://www.miliarium.com>