



**ESCUELA UNIVERSITARIA DE  
INGENIERIA TÉCNICA  
INDUSTRIAL DE ZARAGOZA**



## **PROYECTO FINAL DE CARRERA**

### **REDUCCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE NITRATOS EN AGUAS PARA CONSUMO HUMANO**

**Diseño de una planta mediante la tecnología de  
biofiltración (UFBAF®)**



<b>ALUMNO:</b>	<b>MARINA PALACIOS BENITO</b>
<b>ESPECIALIDAD:</b>	<b>QUÍMICA INDUSTRIAL</b>
<b>DIRECTOR:</b>	<b>ROSA MOSTEO</b>
<b>CONVOCATORIA:</b>	<b>SEPTIEMBRE 2010</b>



## **Agradecimientos**

*Quiero dar mi más sincero agradecimiento a Rosa Mosteo como tutora de este proyecto final de carrera, por haber coordinado y dirigido todas las actividades con él relacionadas, además de por su paciencia y comprensión debido a la distancia y a la combinación de éste con mi vida laboral y personal.*

*Agradezco también, muy especialmente, el apoyo, la colaboración, el asesoramiento y la motivación de mi director, Antoni Ventura, que ha hecho de este proyecto un estímulo para seguir estudiando y abriendo nuevas oportunidades en el campo del tratamiento de nitratos en aguas.*

*Es necesario destacar también la colaboración con Air Water Technologies, empresa suministradora de la tecnología UFBAF® y sin la cual, este proyecto, no hubiera sido posible.*

*Y, en último lugar, decir, que este proyecto final de carrera se ha realizado gracias a los conocimientos y experiencias de un amplio abanico de reconocidos profesionales en el sector del agua, que desde especializaciones y ámbitos muy diversos me han ayudado a que éste fuera posible, ellos son:*

*Sergi Menendez, Jordi Barniol, Xavier Bosch, Carme Farré y todos mis compañeros de trabajo.*

## **Abstract**

*El presente proyecto final de carrera estudia de manera general la tecnología de biofiltración UFBAF®, como alternativa para la **reducción de la concentración de nitratos** en aguas prepotables, juntamente con otras tecnologías existentes en el mercado como la ósmosis inversa, el intercambio iónico o el proceso HIDRONITREX®. Además, realiza un estudio comparativo de viabilidad, más detallado, entre la tecnología UFBAF®, como proceso biológico, y la tecnología de ósmosis inversa, como proceso físico-químico para el caso concreto de la reducción de nitratos en el agua de abastecimiento en el municipio de Sant Climent (Menorca). En este estudio se comparan los aspectos técnicos, económicos medioambientales y sociales de cada uno de los dos procesos.*

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>UBICACIÓN Y ENTORNO.....</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>TECNOLOGÍAS APLICABLES .....</b>	<b>10</b>
3.1	PROCESOS BIOLÓGICOS.....	11
3.2	BIOFILTRACIÓN .....	18
3.3	ÓSMOSIS INVERSA .....	20
3.4	INTERCAMBIO IÓNICO .....	36
3.5	HIDRONITREX® .....	41
3.6	RESUMEN.....	44
<b>4</b>	<b>BASES DE PARTIDA .....</b>	<b>47</b>
4.1	CAUDALES DE AGUA A TRATAR .....	47
4.2	CALIDAD DEL AGUA A TRATAR.....	48
4.3	LEGISLACIÓN APLICABLE .....	50
<b>5</b>	<b>ESTUDIO Y DISEÑO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO MEDIANTE BIOFILTRACIÓN (UFBAF®).....</b>	<b>51</b>
5.1	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO.....	51
5.2	VERTIDO.....	77
5.3	COSTES DE INVERSIÓN .....	83
5.4	COSTES DE EXPLOTACIÓN.....	85
<b>6</b>	<b>ESTUDIO Y DISEÑO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO MEDIANTE ÓSMOSIS INVERSA .....</b>	<b>88</b>
6.1	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO.....	88
6.2	VERTIDO.....	96
6.3	COSTES DE INVERSIÓN .....	96
6.4	COSTES DE EXPLOTACIÓN.....	97
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES Y ESTUDIO COMPARATIVO .....</b>	<b>101</b>
<b>8</b>	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>104</b>
<b>9</b>	<b>ANEJOS.....</b>	<b>106</b>

## 1 INTRODUCCIÓN

La afección por nitrato constituye uno de los principales problemas de la contaminación de las aguas subterráneas en España. La existencia de acuíferos actualmente afectados, se debe a la persistente acción, entre otros factores, de los focos contaminantes relacionados con determinadas actividades industriales, agrarias y urbanas.

El efecto que tales actividades tienen sobre las aguas subterráneas es el incremento de las concentraciones de compuestos nitrogenados, que pueden alcanzar niveles que suponen un riesgo, para la salud, si se utilizan sin el tratamiento adecuado en abastecimiento urbano.

El principal efecto perjudicial para la salud humana derivado de la ingesta de agua con elevadas concentraciones de nitratos y nitritos es la metahemoglobinemia, es decir, un incremento de metahemoglobina en la sangre, que es una hemoglobina modificada (oxidada) incapaz de fijar el oxígeno y que provoca limitaciones de su transporte a los tejidos.

En condiciones normales hay un mecanismo enzimático capaz de restablecer la alteración y reducir la metahemoglobina otra vez a hemoglobina, pero cuando la metahemoglobinemia es elevada, la primera manifestación clínica es la cianosis, generalmente asociada a una tonalidad azul de la piel.

En el año 2004, la Organización Mundial de la Salud (OMS) confirmó un valor máximo orientativo de 50 miligramos de nitratos por litro de agua de consumo humano. Valor que ya había sido fijado en el Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano (RD 140/2003), como límite para la concentración de nitratos admisible en el agua.

De este modo, se hace necesario, someter a las aguas destinadas a consumo humano y con un elevado contenido en nitratos a un tratamiento que permita verificar los niveles de calidad establecidos por la normativa.

El presente proyecto final de carrera de **reducción de la concentración de nitratos en aguas para consumo humano** estudia la tecnología de biofiltración UFBAF®, como alternativa para el tratamiento de los nitratos en aguas prepotables, juntamente con otras tecnologías existentes en el mercado como la ósmosis inversa, el intercambio iónico o el proceso HIDRONITREX®. Además, realiza un estudio comparativo de viabilidad entre la

tecnología UFBAF®, como proceso biológico, y la tecnología de ósmosis inversa, como proceso físico-químico para la reducción de nitratos en el agua de abastecimiento en el municipio de Sant Climent (Menorca). En este estudio se comparan los aspectos técnicos, económicos, medioambientales y sociales de cada uno de los dos procesos.

El suministro de agua potable al núcleo de Sant Climent se efectúa a través de una red de agua potable procedente de un pozo denominado también, Sant Climent. Actualmente, el agua de este pozo presenta, una elevada concentración de nitratos, habiéndose obtenido resultados de 143 mg/l de nitratos, este valor es claramente superior al límite máximo definido en el Real Decreto 140/2003.

En la actualidad, y ante la imposibilidad de suministrar el agua de dicho pozo a la población de Sant Climent, el agua de consumo humano se esta suministrando mediante camiones cisterna, lo que supone un coste muy elevado e imposible de repercutir en la factura del agua. Por todo ello, se hace necesario realizar un tratamiento de la misma para reducir su concentración por debajo de 50 mg/l.

La tecnología UFBAF®, es una novedosa tecnología de biofiltración que permite realizar el proceso de desnitrificación biológica en óptimas condiciones y en un espacio muy reducido. Debido a que es un proceso de eliminación del ión y no de separación del mismo de la corriente producto, no genera rechazos que contengan elevadas concentraciones de nitratos.

## 2 UBICACIÓN Y ENTORNO

Este proyecto final de carrera está ubicado en el municipio menorquín de Sant Climent.

La isla de Menorca con extensión total es de 701 km<sup>2</sup>, es la más oriental y septentrional del archipiélago balear.

Este archipiélago está situado este en el centro oeste del Mediterráneo Occidental y esta compuesto además por otras dos islas mayores: Mallorca (3.739 km<sup>2</sup>), y Ibiza, la más occidental (581 km<sup>2</sup>); dos islas menores, Formentera, la más meridional (82 km<sup>2</sup>) y Cabrera (15 km<sup>2</sup>).

La situación de las aguas subterráneas en el archipiélago balear se puede catalogar de aceptable en su conjunto, si bien localmente existen problemas, en algunos casos intensos de presencia de nitratos en contenidos elevados, como se refleja la siguiente tabla donde se representan los puntos según el contenido de nitratos en las cuencas hidrológicas de baleares.

Tabla 1: Distribución de puntos según el contenido en nitrato en las unidades hidrogeológicas de las cuencas baleares

UNIDAD HIDROGEOLÓGICA	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> < 25 mg/L		25 mg/L < NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> < 50 mg/L		50 mg/L < NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> < 100 mg/L		NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> > 100 mg/L		TOTAL
	Nº PTOS.	%	Nº PTOS.	%	Nº PTOS.	%	Nº PTOS.	%	
18.1. Andraitx	1	50,0	1	50,0					2
18.2. Valldemosa-Soller					1	100,0			1
18.4. Formentor	4	80,0	1	20,0					5
18.5. Almadrava	4	100,0							4
18.7. F. Vila i Na Pere	1	100,0							1
18.8. S Estremera	1	50,0			1	50,0			2
18.9. Alaró	4	100,0							4
18.11. Llano Inca-Sa Pobla	12	9,4	16	12,6	28	22,0	71	55,9	127
18.12. Calviá	8	100,0							8
18.13. Na Burguesa	5	100,0							5
18.14. Llano de Palma	6	33,3	4	22,2	7	38,9	1	5,6	18
18.15. Sierras Centrales	3	50,0	3	50,0					6
18.16. La Marineta	2	50,0	2	50,0					4
18.18. Manacor			2	11,8	7	41,2	8	47,1	17
18.19. San Lorenzo	2	40,0	3	60,0					5
18.20. Artá	1	50,0	1	50,0					2
18.21. Lluchmajor-Campos	4	18,2	12	54,5	6	27,3			22
18.22. Felanitx	2	40,0	2	40,0	1	20,0			5
TOTAL MALLORCA	60	25,2	47	19,7	51	21,4	80	33,6	238
19.1. Migjorn	8	13,8	24	41,4	25	43,1	1	1,7	58
19.3. Albaida	3	60,0	2	40,0					5
TOTAL MENORCA	11	17,5	26	41,3	25	39,7	1	1,6	63
20.1. San Miguel-Costa Norte	6	85,7	1	14,3					7
20.2. San Antonio	19	86,4	3	13,6					22
20.3. Santa Eulalia	13	76,5	3	17,6	1	5,9			17
20.4. San Carlos	10	90,9	1	9,1					11
20.5. San José	3	75,0	1	25,0					4
20.6. Ibiza	22	95,7			1	4,3			23
99	1	100,0							1
TOTAL IBIZA	74	87,1	9	10,6	2	2,4			85
TOTAL BALEARES	145	37,6	82	21,2	78	20,2	81	20,9	386

En la tabla 1 se observa que en la isla de Menorca, Migjorn, presenta una deficiente calidad, con cerca del 45% de puntos con contenidos superiores a 50 miligramos por litro (mg/l), situados en el entorno de las dos poblaciones principales Mahón y Ciudadella. Por el contrario, Albaida, no muestra indicios destacables de contaminación por nitrato.



El municipio Sant Climent, es un núcleo tradicional de Mahon, con 557 habitantes que se urbanizó en 1817 sobre terrenos de la antigua garriga de Mussuptà. En realidad, esta fecha tan reciente es la del intento de agrupar de forma estructurada una población dispersa existente, ya que la zona de Sant Climent ha estado muy poblada desde la época antigua.

En la siguiente figura se muestra una vista aérea del núcleo urbano de Sant Climent.



*Figura 1: Núcleo urbano de Sant Climent (imagen extraída de Google Earth)*

El suministro de agua potable al núcleo de Sant Climent que pertenece al municipio de Mahón en Menorca, se efectúa a través de una red de agua potable procedente de un pozo denominado también, Sant Climent que alimenta a un depósito con una capacidad de 300 metros cúbicos ( $m^3$ ).

Actualmente, el agua del pozo Sant Climent, en base a los resultados analíticos efectuados por el laboratorio de análisis, diagnóstico y certificación medioambiental de LABAQUA presenta una elevada concentración de nitratos. En el caso más desfavorable, se ha obtenido un contenido en nitratos de 143 miligramos por litro. *(Ver anejo II)*

La planta de tratamiento de agua para la reducción de los nitratos se pretende ubicar dentro del emplazamiento de las actuales instalaciones para el suministro de agua (pozo de

extracción, depósito de suministro y central de bombeo), ya que se dispone del espacio suficiente para ello.

Este emplazamiento sito, como puede verse en la figura 2, en el mismo núcleo urbano de Sant Climent, muy cercano a las viviendas, por lo que es muy importante a la hora de hacer el diseño, implantación y ubicación de la misma, tener en cuenta los aspectos visuales y la estética.



*Figura 2: Emplazamiento de las instalaciones de tratamiento de agua de Sant Climent (imagen extraída de Google Earth)*

En la figura 2, también se puede ver un depósito de planta circular, encargado de recibir las aguas bombeadas procedentes de la impulsión del pozo. Este depósito y mediante un grupo de presión situado en la caseta adjunta al depósito, alimenta a la red de abastecimiento del núcleo de Sant Climent en función de la demanda.

### 3 TECNOLOGÍAS APLICABLES

La disminución de la concentración de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) en el agua puede hacerse mediante diferentes tecnologías, basadas en dos principios claramente diferenciados, el biológico y el físico-químico.

Los procesos biológicos están fundamentados en la actividad que llevan a cabo ciertos microorganismos para modificar las características del agua. Existen importantes términos utilizados en la clasificación de éstos, que dependen de algunas características propias, como es la función metabólica y de otras externas, como es el entorno.

Dentro de las diferentes alternativas de tratamientos biológicos se distinguen los procesos realizados con **biomasa fija o residente** en algún tipo de soporte, sea natural o artificial, y los procesos realizados con **biomasa en suspensión**

- **Biomasa fija:** donde la biomasa se encuentra adherida a un soporte.

Dentro de este tipo de tratamiento encontramos diferentes configuraciones;

- Filtros percoladores
- Anillos carrier
- Biofiltración
- Membranas

- **Biomasa en suspensión** (fangos activos): donde la biomasa se encuentra en suspendida en el agua y repartida por todo el volumen del reactor.

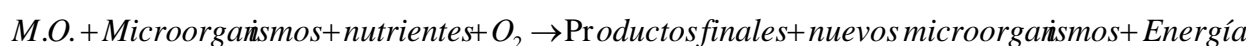
Dentro de los procesos para eliminación de nitratos basados en principios físico-químicos, están el **intercambio iónico** y la **ósmosis inversa**, entre otros. Se ha querido incluir en este apartado la tecnología **HIDRONITREX®**, tecnología propia de Agbar, consistente en una previa concentración del nitrato mediante intercambio iónico y posterior tratamiento del rechazo en un reactor electroquímico.

A continuación, se describen brevemente los fundamentos teóricos de las tecnologías anteriormente comentadas, así como el proceso de nitrificación/desnitrificación en particular.

### 3.1 PROCESOS BIOLÓGICOS

Los procesos biológicos utilizan reacciones asociadas a los microorganismos que crecen utilizando los contaminantes del agua como fuente de carbono y/o fuente de energía, convirtiéndolos en nuevos microorganismos (biomasa), dióxido de carbono y otros compuestos inocuos.

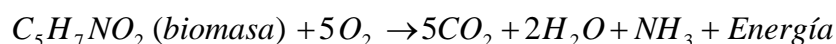
La oxidación biológica es el mecanismo mediante el cual los microorganismos degradan la materia orgánica (M.O.). De esta forma, estos microorganismos, se alimentan de dicha materia orgánica en presencia de oxígeno u otro aceptor de electrones y de nutrientes, de acuerdo con la siguiente reacción:



Para que la reacción anterior se lleve a cabo, son necesarias dos tipos de reacciones fundamentales totalmente acopladas: síntesis o asimilación y respiración endógena u oxidación.

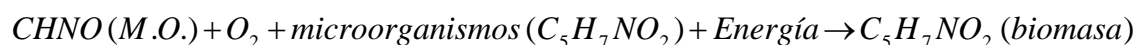
#### 3.1.1 Reacciones de oxidación y respiración endógena

Los microorganismos al igual que nosotros, necesitan de energía para poder realizar sus funciones vitales (moverse, comer etc.), dicha energía la obtienen transformando la materia orgánica asimilada y aquella acumulada en forma de sustancias de reserva en gases, agua y nuevos productos de acuerdo con la siguiente reacción:



#### 3.1.2 Reacciones de síntesis o asimilación

Las reacciones de síntesis consisten en la incorporación del alimento (materia orgánica y nutrientes) al interior de los microorganismos. Estos microorganismos, también llamados biomasa, con el alimento y la energía generada en la respiración endógena, forman nuevos microorganismos reproduciéndose rápidamente según la siguiente reacción:

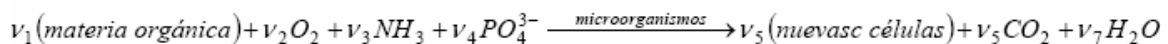


Como se puede observar, después de un tiempo de contacto suficiente entre la materia orgánica del agua y los microorganismos (bacterias), la cantidad de la materia orgánica disminuye considerablemente transformándose en nuevas células, gases y otros productos. Este nuevo cultivo microbiano seguirá actuando sobre el agua. A todo este conjunto de reacciones se les denomina de **oxidación biológica**.

El interior celular, aparte de, carbono (C), hidrógeno (H) y oxígeno (O), contiene otros elementos como son el nitrógeno (N), fósforo (P), azufre (S), calcio (Ca), magnesio (Mg) e.t.c., denominados nutrientes y que a pesar de que muchos de ellos se encuentran en el organismo sólo en pequeñas cantidades, son fundamentales para el desarrollo de la síntesis biológica.

Los microorganismos necesitan para su crecimiento: carbono, nitrógeno, fósforo, energía y poder reductor (electrones). Los microorganismos obtienen la energía y el poder reductor de las reacciones de oxidación del sustrato.

El rol de los microorganismos en procesos aerobios es oxidar la materia orgánica carbonosa disuelta en productos simples y en nuevas células denominadas biomasa, como se representa en la siguiente ecuación.



Donde  $v_n$  es el coeficiente estequiométrico. El oxígeno ( $O_2$ ), el amoníaco ( $NH_3$ ) y el fosfato ( $PO_4^{3-}$ ) representan la necesidad de nutrientes de los microorganismos para poder realizar la conversión de la materia orgánica productos finales simples como son el dióxido de carbono y agua. El término que refiere a nuevas células se utiliza para representar la biomasa producida como resultado de la oxidación de la materia orgánica.

En función del tipo de fuente de carbono los microorganismos, se clasifican en autótrofos y heterótrofos.

Los seres **autótrofos** (a veces llamados **productores**) son organismos capaces de sintetizar todas las sustancias esenciales para su metabolismo a partir de sustancias inorgánicas, de manera que para su nutrición no necesitan de otros seres vivos. El término autótrofo procede del griego y significa "que se alimenta por sí mismo".

Los organismos autótrofos producen su masa celular y materia orgánica, a partir del dióxido de carbono, que es inorgánico, como única fuente de carbono, usando la luz o sustancias químicas como fuente de energía.

Los organismos **heterótrofos** (del griego hetero, otro, desigual, diferente y trofo, que se alimenta), en contraste con los organismos autótrofos, son aquellos que deben alimentarse con las sustancias orgánicas sintetizadas por otros organismos, bien autótrofos o heterótrofos a su vez. Entre los organismos heterótrofos se encuentra multitud de bacterias y predominantemente los animales, como los humanos.

Un organismo heterótrofo es aquel que obtiene su carbono y nitrógeno de la materia orgánica de otros y también en la mayoría de los casos obtiene su energía de esta manera.

En función de las características del medio, éste se puede clasificar en aerobio (existe presencia de oxígeno libre) y anóxico (ausencia de oxígeno libre) y en función del tipo de aceptor de electrones los microorganismos se clasifican según su metabolismo en **aerobios y anaerobios**. Los anaerobios sólo pueden crecer en ausencia de oxígeno molecular y, los aerobios en presencia del mismo.

Existe una serie de microorganismos catalogados como **facultativos** que utilizan oxígeno libre cuando esta presente pero pueden utilizar otro aceptor de electrones cuando no lo está.

Existe una tendencia en el mundo de la ingeniería a clasificar los procesos biológicos en tres tipos, teniendo en cuenta el aceptor de electrones, aerobios, anaerobios y anóxicos, aunque esta clasificación desde el punto de vista biológico no es del todo correcta. En la tabla 2, se muestra esta clasificación y que se tomará como base para este proyecto.

Tabla 2: Clasificación de los procesos biológicos según el aceptor de electrones

Conceptos y términos empleados en los procesos biológicos	
Procesos aerobios	Procesos biológico en que el aceptor de electrones es el oxígeno libre
Procesos anaerobios	Procesos biológico que ocurre en ausencia de oxígeno. El aceptor de electrones no contiene oxígeno
Procesos anóxicos	Proceso biológico donde el aceptor de electrones es una molécula con oxígeno combinado, por ejemplo los nitratos.



Dentro de la gran variedad de microorganismos, existen determinadas bacterias capaces de oxidar el amoníaco en nitritos y nitratos (proceso de nitrificación), mientras que existen otras que pueden reducir el nitrógeno oxidado a nitrógeno gas (proceso de desnitrificación).

La **eliminación biológica del nitrógeno** es diferente en función del estado de oxidación de éste, no es lo mismo, si el nitrógeno se encuentra en forma de amoníaco o de nitrato. Los fundamentos para la eliminación biológica de nitrógeno son los siguientes:

**Nitrificación:** es el proceso de oxidación del amoníaco a nitrato. Éste proceso se produce mediante bacterias autotróficas, es decir, que utilizan el carbono inorgánico para la síntesis de diferentes compuestos, en dos etapas, la nitritación y la nitratación.

- Nitritación:  $NH_4^+ + \frac{3}{2} O_2 \rightarrow NO_2^- + 2 H^+ + H_2O$  Proceso realizado por bacterias AMONIOXIDANTES, del género de las NITROSOMAS, que obtienen la energía de la oxidación del amonio a nitrito.
- Nitratación:  $NO_2^- + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow NO_3^-$  Proceso realizado por bacterias NITRITOXIDANTES, del género de las NITROBACTER, que obtienen la energía de la oxidación del nitrito a nitrato.

Aunque se haya dividido el proceso de nitrificación en dos reacciones químicas, el proceso biológico real ocurre en una sola etapa, donde la formación del nitrito ( $NO_2^-$ ) es inapreciable.

**Desnitrificación:** Proceso que permite la reducción del nitratos (N con valencia +5) en  $N_2$  gas que será liberado a la atmósfera. Éste es realizado por bacterias heterotróficas facultativas, es decir, que obtienen la energía de la oxidación de la materia orgánica utilizando oxígeno o nitrato como aceptor de electrones.

En el caso de las bacterias heterótrofas capaces de realizar la desnitrificación, encontramos especies de los géneros *Achromobacter*, *Acinetobacter*, *Agrobacterium*, *Alcaligenes*, *Arthrobacter*, *Bacillus*, *Chromobacterium*, *Corynebacterium*, *Flavobacterium*, *Halobacterium*, *Hypomicrobium*, *Methanomonas*, *Moraxella*, *Neisseria*, *Paracoccus*, *Propionibacterium*, *Pseudomonas*, *Rhizobium*, *Rhodopseudomonas*, *Spirillum* y *Vibrio*.

De estos géneros, las *Pseudomonas* (microorganismos móviles con flagelación polar, presentan una versatilidad metabólica muy grande que se traduce en su capacidad de utilizar como fuente de carbono substratos muy variados) es el género más común y más extensamente distribuido. Se ha demostrado que las especies del género *Pseudomonas* con capacidad para realizar desnitrificación, pueden hacerlo con una gran cantidad de fuentes de carbono orgánicas.

En el caso del municipio de Sant Climent, y como se ha comentado anteriormente, es la concentración de nitratos, en el agua, el parámetro que supera el límite fijado en la legislación vigente, de lo que se deduce que el proceso biológico que debe producirse para su reducción es la desnitrificación.

Seguidamente se describe más en detalle dicho proceso biológico.

### **3.1.3 Desnitrificación**

Antes de explicar en detalle el proceso de desnitrificación, se definen algunos conceptos básicos para su entendimiento.

#### **3.1.3.1 Conceptos básicos**

**DQO (Demanda Química de Oxígeno):** Parámetro que mide la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas por medios químicos que hay disueltas o en suspensión en el agua. Se utiliza para medir el grado de contaminación y se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro ( $\text{mg O}_2/\text{l}$ ).

**DBO (Demanda Biológica de Oxígeno):** Parámetro que mide la cantidad de materia susceptible de ser consumida u oxidadada por medios biológicos. Se utiliza para medir el grado de contaminación, normalmente se mide transcurridos cinco días de reacción ( $\text{DBO}_5$ ), y se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro ( $\text{mg O}_2/\text{l}$ ).

**TOC (Carbono Orgánico Total):** Es la cantidad de carbono unido a un compuesto orgánico y se usa frecuentemente como un indicador no específico de calidad del agua. Se mide por la cantidad de dióxido de carbono que se genera al oxidar la materia orgánica en condiciones especiales.



**Nutrientes:** Los alimentos posibilitan que los seres vivos crezcan y se desarrollen, y a la vez, suministran la energía que nos permite realizar otras actividades vitales.

**Carga Másica:** Es la relación de kilogramos de DQO presentes por metro cúbico y día en el sistema.

$$C_m = \frac{kg \ DQO}{m^3 \cdot día}$$

**Carga hidráulica o velocidad de flujo:** Es la relación entre los metros cúbicos de agua tratados y la superficie de filtración por hora.

$$C_m = \frac{m^3/día}{m^2}$$

#### 3.1.3.2 Fundamento

La **desnitrificación** tiene lugar bajo condiciones de anoxia en ecosistemas acuáticos. Esta condición se da cuando el oxígeno disuelto se encuentra en poca cantidad y su papel como aceptor de electrones es poco significativo.

En estas condiciones, las bacterias con capacidad para realizar la desnitrificación toman como aceptor de electrones al nitrato (o el nitrito en algún caso) con el objetivo de obtener la energía necesaria para el crecimiento.

Dada la gran concentración de oxígeno en la atmósfera terrestre la desnitrificación sólo tiene lugar en ambientes dónde el consumo de oxígeno excede la tasa de entrada, tales como algunos suelos y humedales, lugares pobremente oxigenados de los océanos y sedimentos del fondo marino.

La clave, pues, para favorecer la actividad desnitrificante de las bacterias heterótrofas presentes en el biofiltro, consistirá en garantizar unas condiciones adecuadas de anoxia. Hace falta tener en cuenta que muchas de estas especies bacterianas son aeróbicas facultativas y pueden utilizar, a menudo, de manera más eficiente el oxígeno disuelto como aceptor de electrones. Energéticamente, es más favorable la utilización de oxígeno que de nitrato, por eso la presencia de oxígeno inhibe la desnitrificación<sup>1</sup>. En algunos casos, estas

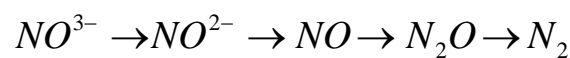
---

<sup>1</sup> La utilización del nitrato como aceptor de electrones libera una energía de 71.67 KJ/electrón equivalente, mientras que si se tiene el oxígeno como aceptor esta reacción libera 93.23 KJ/ electrón equivalente de energía (Metcalf and Eddy, 4ª edición pag. 572)

especies bacterianas pueden dar lugar a procesos de fermentación en el caso de ausencia de  $O_2$  disuelto y de  $NO_3^-$ .

En ausencia de  $O_2$  disuelto o en concentraciones limitadas, se induce la actividad nitrato reductasa (enzima) de la cadena de transporte de electrones de la bacteria. Esto colabora en la transferencia de hidrógeno y electrones al  $NO_3^-$  que actúa como aceptor de electrones reduciéndose.

Los pasos que tienen lugar a lo largo del proceso de reducción del nitrato se presentan a continuación.



El primer paso tiene lugar gracias a la actividad del enzima nitrato reductasa desasimiladora. La reducción del nitrito ( $NO_2^-$ ) se da en el periplasma de las bacterias dando lugar a óxidos de nitrógeno y finalmente a  $N_2$  gas. Una nitrato reductasa periplasmática (que puede contener Cu o Citocromo cd1) reduce el nitrito a óxido nítrico (NO). Este compuesto es altamente tóxico y sólo es aceptable por la bacteria en concentraciones muy pequeñas (nanomolares). Así pues, hace falta que se produzca muy rápidamente la reducción a óxido nitroso ( $N_2O$ ). Esto se logra gracias a la actividad enzimática de la óxido nítrico reductasa.

El óxido nitroso ( $N_2O$ ) es reducido a nitrógeno por la actividad de la óxido nitroso reductasa periplasmática (NosZ).

En términos de desnitrificación biológica, la fuente de carbono puede ser:

- La materia orgánica biodegradable soluble presente en el agua a tratar. En general, es baja en el agua de abastecimiento.
- La materia orgánica biodegradable soluble producida durante el decaimiento endógeno (respiración endógena).
- Una fuente de carbono externa. Generalmente metanol o ácido acético.

Debido a que el caso de Sant Climent es un agua de pozo para abastecimiento, su contenido en materia orgánica biodegradable, es bajo, lo que hace necesaria la adición de una fuente de carbono externa.

Dentro de las diferentes configuraciones de biomasa fija, se ha escogido para el estudio de este proyecto el sistema de biofiltración por ser el más novedoso tecnológicamente, además de ser una tecnología que ocupa poco espacio.

### 3.2 BIOFILTRACIÓN

La tecnología de biofiltración objeto de estudio es la tecnología UFBAF® (Up Flow Biological Aerated Filter®), tecnología que combina en una sola etapa los procesos de filtración, adsorción y oxidación/reducción biológica de los compuestos a reducir del agua a tratar. Además ocupa poco espacio y ahorra en el consumo de reactivos químicos y energía, mejorando los costes productivos del bien que se produce.

En la siguiente figura se muestra una fotografía, como ejemplo, de una instalación de biofiltración con tecnología UFBAF®.



*Figura 3: Instalación de biofiltración con la tecnología UFBAF®. (Cortesía de Air Water Technologies)*

Los biofiltros, también denominados filtros biológicos, son dispositivos que eliminan una amplia gama de compuestos contaminantes desde una corriente de fluido (aire o agua) mediante un proceso biológico. Las sustancias contaminantes se adhieren a la biopelícula de biomasa formada sobre el relleno y aquí posteriormente son digeridas por microorganismos.

La biomasa producida tiene una gravedad específica mayor al agua, por lo que se puede eliminar del efluente mediante lavado del biofiltro y posterior sedimentación gravitacional. Es

importante señalar que debe existir una eliminación periódica de la misma, ya que ésta confiere materia orgánica al efluente.

### **3.2.1      *Material de soporte***

El material de soporte del biofiltro debe disponer de la máxima superficie específica y debe proporcionar unas características óptimas, para la fijación de la biopelícula, para la distribución de los nutrientes y para la difusión del nitrógeno hacia el exterior. Así mismo, tiene que permitir un correcto lavado.

Entre los materiales más habituales están:

- Arcillas expandidas de granulometría, forma, uniformidad y composición adecuadamente estudiadas para el caso a tratar. (UFBAF®).
- Material basáltico de granulometría, forma, uniformidad y composición adecuadamente estudiadas para el caso a tratar.
- Arenas de sílice con una pureza no inferior al 85% y granulometría entre 1,2 mm y 2,0 mm de medida efectiva, con un coeficiente de uniformidad adecuado y composición estudiada.
- Materiales plásticos.

### **3.2.2      *Configuración estructural***

La planta de tratamiento de aguas para la reducción de nitratos basada en la tecnología de biofiltración, estará compuesta por las siguientes etapas:

- Bombeo de impulsión del agua del pozo
- Acondicionamiento químico del agua de salida del pozo. Adición de nutrientes, fuente de carbono y de fósforo.
- Equipo de biofiltración compuesto por dos unidades con funcionamiento en paralelo.
- Reactor de oxigenación del agua (compuesto por un depósito de almacenamiento del agua desnitrificada y un sistema de aireación)
- Biofiltros de eliminación de DQO
- Filtración de afino realizada con un filtro dual (sílex, antracita)

Seguidamente, en la figura 4, se muestra un esquema del proceso a seguir y de los caudales y concentraciones de nitratos de cada uno de los flujos:

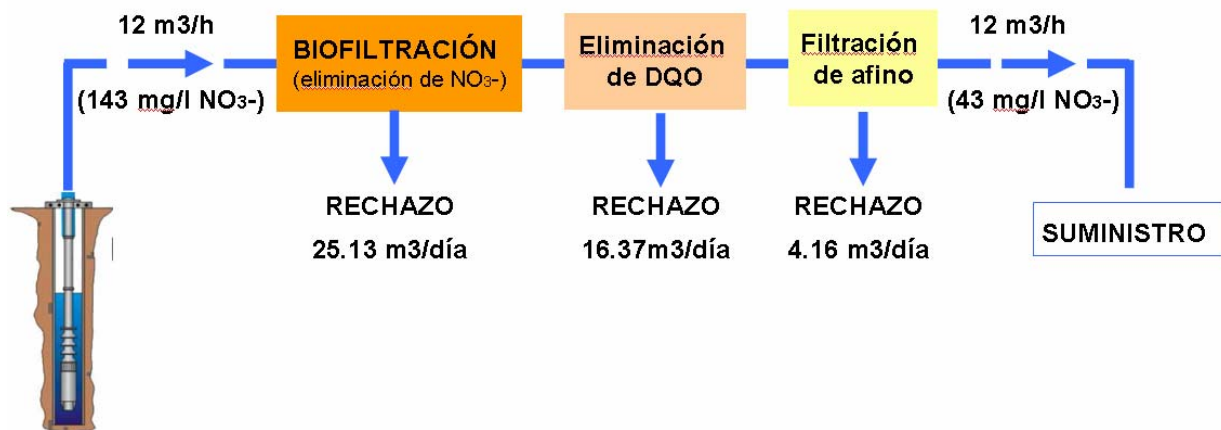


Figura 4: Esquema de tratamiento del agua mediante la tecnología de biofiltración

### 3.2.3 Vertido

El vertido generado por este proceso es el resultante de los lavados de los filtros, y se considera que su calidad es suficiente como para verterlo al colector municipal sin necesidad de realizarle ningún tratamiento previo.

En los cálculos realizados posteriormente, en el capítulo de diseño y dimensionado de la instalación del sistema, se justifica su vertido a colector municipal, estando los parámetros de DQO y materia en suspensión (MES) dentro de los límites fijados en la Ordenanza Municipal Sobre el Uso de la Red de Alcantarillado Sanitario del Núcleo Urbano de Mahón.

## 3.3 ÓSMOSIS INVERSA

Antes de entrar de lleno en el proceso de la ósmosis inversa como tratamiento del agua y en la configuración de las plantas con esta tecnología, se definen algunos conceptos básicos relacionados con el propio proceso y con la calidad del agua.

### 3.3.1 Conceptos básicos

Para entender el funcionamiento de la ósmosis inversa se deben tener claros los siguientes conceptos:

**Difusión:** Proceso físico irreversible, en el que partículas materiales se introducen en un medio que inicialmente estaba ausente, de manera que se obtiene un conjunto formado por las partículas difundidas o soluto y el medio donde se difunden o disolvente.

Normalmente los procesos de difusión están sujetos a la Ley de Fick. La membrana permeable puede permitir el paso de partículas y disolvente siempre a favor del gradiente de concentración. La difusión, proceso que no requiere aporte energético, es frecuente como forma de intercambio celular.

La ley de Fick sigue la siguiente relación:  $\mathbf{j} = -D \nabla c$  siendo D el coeficiente de difusión de la especie de concentración c.

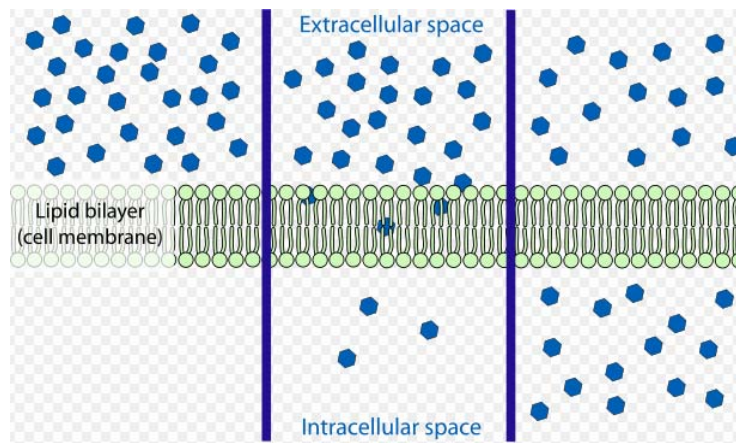


Figura 5: Dibujo esquemático de los efectos de la difusión a través de una membrana celular.  
(www.e-ciencia.com)

**Permeabilidad:** Capacidad de un material para que un fluido lo atraviese sin alterar su estructura interna. Se afirma que un material es *permeable* si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado, e *impermeable* si la cantidad de fluido es despreciable.

La velocidad con la que el fluido atraviesa el material depende de tres factores básicos:

- la porosidad del material;
- la densidad del fluido considerado, afectada por su temperatura;
- la presión a que está sometido el fluido.

Para ser permeable, un material debe ser poroso, es decir, debe contener espacios vacíos o poros que le permitan absorber fluido. A su vez, tales espacios deben estar interconectados para que el fluido disponga de caminos para pasar a través del material.

La porosidad específica es la capacidad de un material de absorber líquidos o gases. La capacidad de absorción se puede medir con la siguiente fórmula matemática.

$$P_m = \frac{m_s - m_0}{m_0} \cdot 100\%$$

Donde:

$m_0$ , Masa de una porción cualquiera del material (en seco).

$m_s$ , Masa de la porción después de haber sido sumergido en agua:

$P_m$ , porosidad másica del objeto expresado (en tanto por ciento).

La densidad ( $\rho$ ), denominada en ocasiones masa específica, es una magnitud referida a la cantidad de masa contenida en un determinado volumen, y puede utilizarse en términos absolutos o relativos.

En la siguiente tabla se muestran las densidades del agua destilada y del agua de mar.

*Tabla 3: Densidades de diferentes tipos de agua*

Sustancia	Densidad media (en Kg/m <sup>3</sup> )
Agua destilada	1.000
Agua de mar	1.027

La presión es una magnitud física que mide la fuerza por unidad de superficie, y sirve para caracterizar como se aplica una determinada fuerza resultante sobre una superficie.

En el Sistema Internacional de Unidades (SI) la presión se mide en una unidad derivada que se denomina pascal (Pa) que es equivalente a una fuerza total de un newton actuando uniformemente en un metro cuadrado.

**Conductividad:** Capacidad de un cuerpo de permitir el paso de la corriente eléctrica a través de sí.

La conductividad en medios líquidos está relacionada con la presencia de sales en solución (salinidad), cuya disociación genera iones positivos y negativos capaces de transportar la

energía eléctrica si se somete el líquido a un campo eléctrico. Las unidades de medida de la conductividad vienen dadas por micro Siemens/cm ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) a  $20^\circ\text{C}$ , se puede observar que la unidad esta referenciada a una temperatura, esto es debido a que la conductividad varía en función de la temperatura, por eso para poder trabajar siempre con unos valores comparables se debe fijar una temperatura de referencia y en este caso se ha marcado en  $20^\circ\text{C}$ .

Habitualmente cuando se habla de las sales presentes en el agua se suele emplear el término de conductividad, aunque a veces se usa el término salinidad.

Se entiende por salinidad, el contenido de sales disueltas en el agua. Su medición se realiza en unidades de concentración, miligramos de sal por litro de agua, o lo que es lo mismo, partes por millón (ppm). En función de la cantidad de sales que tiene el agua, éstas se clasifican en dulces, salobres, salinas y aguas marinas o de mar.

En la siguiente tabla se muestran diferentes tipos de aguas en función de su naturaleza salina:

Tabla 4: Características de diferentes tipos de agua

Tipo de agua	Salinidad (ppm)	Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ a $20^\circ\text{C}$ ) aprox.	Presión de operación
Dulce	< 1.000	< 1.500	25 bar
Salobre	1.000-10.000	1.500-15.000	29 bar
Salina	10.000-30.000	15.000-45.000	42 bar
Marina	> 30.000	> 45.000	56 bar

En la tabla anterior se puede observar que, al aumentar la salinidad aumenta la presión que hay que aplicar a las membranas de ósmosis inversa para obtener la misma retención de sales.



**Al aumentar la salinidad (conductividad) del agua de entrada a la ósmosis inversa, debido a que la presión osmótica es mayor, mayor es también la presión necesaria a aplicar para la remoción de sales.**

**Turbidez:** Falta de transparencia de un líquido, debido a la presencia de partículas en suspensión.



La turbidez se mide en Unidades Nefelométricas de turbidez, o Nefelometric Turbidity Unit (NTU), o en Unidades Nefelométricas de Formacina (UNF). Según la OMS, la turbidez del agua para consumo humano no debe superar en ningún caso las 5 NTU, y estará idealmente por debajo de 1 NTU.

La eliminación de la turbidez es primordial para obtener un agua de consumo humano.

**pH:** El pH es una medida de la acidez o alcalinidad de una solución. El pH es la concentración de iones hidronio  $[H_3O^+]$  presentes en determinadas sustancias. La sigla significa "potencial de hidrogeno". Este término fue acuñado por el químico danés Sorensen, quien lo definió como el logaritmo negativo de base 10 de la actividad de los iones hidrógeno. Esto es:

$$pH = -\log_{10} [a_{H_3O^+}]$$

El pH típicamente va de 0 a 14 en disolución acuosa, siendo ácidas las disoluciones con pH menores a 7 y alcalinas las que tienen pH mayores a 7. El pH = 7 indica la neutralidad de la disolución (donde el disolvente es agua).

El valor del pH se puede medir de forma precisa mediante un potenciómetro, también conocido como pH-metro, un instrumento que mide la diferencia de potencial entre dos electrodos: un electrodo de referencia (generalmente de plata/cloruro de plata) y un electrodo de vidrio que es sensible al ión hidrógeno.

Puesto que el agua está disociada en una pequeña extensión en iones hidroxilo ( $OH^-$ ) y  $H_3O^+$ , tenemos que:

$K_w = [H_3O^+] \cdot [OH^-] = 10^{-14}$  en donde  $[H_3O^+]$  es la concentración de iones hidronio,  $[OH^-]$  la de iones hidroxilo, y  $K_w$  es una constante conocida como producto iónico del agua, que vale  $10^{-14}$ .

Por lo tanto,

$$\log K_w = \log [H_3O^+] + \log [OH^-]$$

$$-14 = \log [H_3O^+] + \log [OH^-]$$

$$14 = -\log [H_3O^+] - \log [OH^-]$$

$$pH + pOH = 14$$

**Índice de Langelier (LSI):** Se establece para una temperatura determinada y mide el estado de equilibrio del agua en relación con su carácter incrustante o corrosivo. Se define teóricamente como:

$$LSI = pH - pH_s$$

Siendo pH, el pH al que se encuentra la muestra de agua y pH<sub>s</sub> el valor de pH al que comenzaría a precipitar carbonato cálcico (CaCO<sub>3</sub>).

$$\text{Índice de Langelier} = pH - pH_{\text{equilibrio}}$$

$$pH_{\text{equilibrio}} = k' - \log [\text{alcalinidad (ppm CO}_3\text{Ca)}] - \log (\text{ppm Ca})$$

$$k' = 11,38 \text{ a } 20^\circ$$

$$k' = 11,63 \text{ a } 10^\circ$$

Debido a ello, cuando LSI tenga un valor negativo se tratará de un agua con tendencia corrosiva, tendencia tanto mayor cuanto menos sea el LSI. En cambio, para valores de LSI positivos el agua tendrá una tendencia incrustante provocando la deposición de carbonato cálcico.

A continuación, en la tabla 5 se muestran las diferentes características incrustantes o corrosivas del agua en función de su Índice de Langelier.

Tabla 5: Variación de las características del agua en función del Índice de Langelier

ISL	Indicación
ISL < 0	Agua no saturada con respecto a carbonato cálcico (CaCO <sub>3</sub> ). El agua no saturada posee la tendencia de eliminar láminas de carbonato cálcico (CaCO <sub>3</sub> ) presentes que protegen las tuberías y equipos.
ISL = 0	Agua considerada neutra. No existe formación de incrustaciones ni eliminación de las mismas.
ISL > 0	Agua supersaturada con respecto a carbonato cálcico (CaCO <sub>3</sub> ). Posible formación de incrustaciones.

Es por ello importante en instalaciones industriales trabajar a un LSI próximo a 0 para unas óptimas condiciones de mantenimiento.

El valor de LSI se calcula experimentalmente en el laboratorio, sin embargo puede hacerse una aproximación bastante buena aplicando la siguiente fórmula:

$$pH_s = (9.3 + A + B) - (C + D)$$

Donde:

$$A = \frac{1}{10} \cdot (\log[TDS] - 1)$$

$$B = -13,12 \cdot \log(T(^{\circ}C) + 273) + 34,55$$

$$C = \log[TH] - 0,4$$

$$D = \log[TAC]$$

Siendo TDS los mg/l de sólidos disueltos; T, la temperatura en °C; TH la dureza expresada en mg/l de CaCO<sub>3</sub>; y finalmente TAC, la alcalinidad también en mg/l de CaCO<sub>3</sub>.

**Alimentación:** Caudal de agua que llega a la planta para ser tratada.

**Rechazo:** Caudal de agua a salida de la ósmosis inversa que no ha pasado a través de las membranas y contiene una elevada concentración de sales.

**Permeado:** Caudal de agua a salida de la ósmosis inversa que ha pasado a través de las membranas.

### 3.3.2 Ósmosis

El fenómeno de **ósmosis normal o también llamada directa**, representa la respuesta de un sistema discontinuo cuando dos recipientes con solución a diferentes concentraciones se ponen en contacto por medio de una membrana semipermeable. **El flujo osmótico se origina del recipiente de solución diluida al recipiente de solución concentrada**. Es un proceso espontáneo para llevar el sistema a su estado de equilibrio. Ello ocurre cuando el flujo osmótico eleva una columna de líquido sobre la solución concentrada, cuyo peso produce la presión osmótica de equilibrio.

Al cabo de un tiempo, el contenido en agua será mayor en uno de los lados de la membrana. La diferencia de altura entre ambos fluidos se conoce como Presión Osmótica.



**El fenómeno de la ósmosis está basado en la búsqueda del equilibrio.**

### 3.3.3 Ósmosis Inversa

La segunda ley de la termodinámica asegura que el proceso de la ósmosis directa es irreversible, en vista de que para reintegrar el sistema a su estado inicial tiene la necesidad de realizar un trabajo mecánico neto. Esta labor mecánica se realiza en la solución concentrada, de tal manera que el flujo del solvente ocurre en dirección opuesta al flujo osmótico original. Para que tal cosa se realice, es obligatorio que la presión aplicada tenga un valor mayor a la diferencia de las presiones osmóticas entre los recipientes.

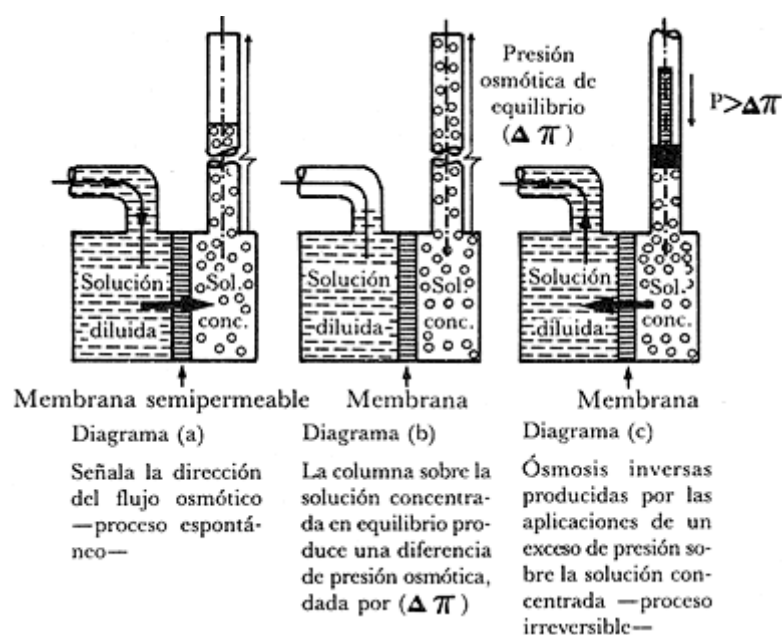


Figura 6: Diagrama del proceso de ósmosis (El fenómeno mágico de la ósmosis. Luís Felipe del Castillo)

Diagrama (c) figura 6.- Aplicando en la columna del fluido una presión superior a la presión osmótica, obtendremos el efecto inverso. Los fluidos son presionados de vuelta a través de la membrana, mientras que los sólidos disueltos permanecen en la columna.

#### 3.3.3.1 Aplicaciones de la ósmosis inversa

La ósmosis inversa es una técnica que es básicamente aplicada en la preparación de agua potable. El proceso de la preparación de agua potable a partir de agua de mar es comúnmente conocido. Aparte de esto, la ósmosis inversa se aplica para la producción de agua ultra pura y de agua de abastecimiento de calderas. También se aplica en la industria de la alimentación (concentración de zumos de frutas, azúcar y café), en la industria de

galvanizados (concentración de aguas residuales) y en la industria láctea (concentración de leche para la producción de queso).

### 3.3.4 Membranas de ósmosis inversa

El agua que alimenta al sistema de ósmosis inversa fluye sobre la superficie de la membrana. La presión fuerza un porcentaje del agua a través de la membrana, mientras que el agua remanente, alta en contaminantes, es enviada hacia el drenaje. El movimiento de agua sobre la membrana la mantiene limpia, previniendo la acumulación de contaminantes que potencialmente pudiesen dañarla.

La ósmosis inversa es una tecnología de remoción porcentual, un sistema típico, rechaza hasta el 98% de las impurezas encontradas en la mayoría de las fuentes de agua potable. Debido a que solo un porcentaje de los contaminantes son eliminados de una fuente de agua determinada, es impráctico predecir la pureza del agua con esta tecnología. Ciertos contaminantes son eliminados más efectivamente que otros:

- Los iones polivalentes son eliminados más fácilmente (99%) que los monovalentes (sodio 90%).
- Los componentes orgánicos de alto peso molecular (de más de 200 Daltons) son removidos efectivamente, mientras que los de menor tamaño pasan a través de la membrana.
- Los gases pasan fácilmente a través del sistema de ósmosis inversa y afectarán la pureza del agua.
- Debido al gran tamaño de las bacterias y los pirógenos, la ósmosis inversa elimina efectivamente el 99% de esta clase de impurezas.

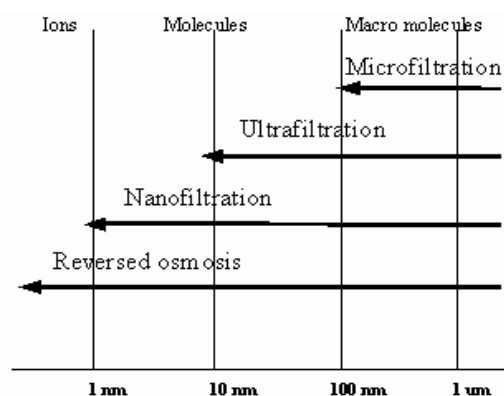


Figura 7: Paso de corte de las diferentes tecnologías de filtración

En la figura 7 se muestra el paso de corte de los diferentes compuestos presentes en el agua para cada una de las tecnologías de filtración.

### 3.3.4.1 Materiales

Dependiendo del material de la membrana, ciertos factores afectarán la calidad y la cantidad del agua producida a través de esta tecnología. En la actualidad hay dos tipos de materiales para membrana que son usados en sistemas de ósmosis inversa: ACETATO DE CELULOSA y POLIAMIDA.

**Poliamida:** Una poliamida es un tipo de polímero (macromoléculas generalmente orgánicas, formadas por la unión de moléculas más pequeñas llamadas monómeros) que contiene enlaces de tipo amida ( $RCONR'R''$ ). Las poliamidas se pueden encontrar en la naturaleza, como la lana o la seda, y también ser sintéticas, como el nailon o el kevlar.

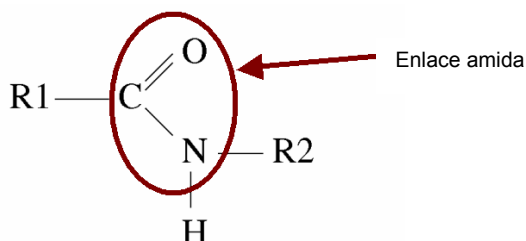


Figura 8: Enlace amida

En la figura 8 se muestra la estructura de un enlace amida, siendo CO un carbonilo, N un átomo de nitrógeno, y R , R' y R'' radicales orgánicos o átomos de hidrógeno

**Acetato de Celulosa:** El acetato de celulosa es un termoplástico (plástico que se derrite cuando se calienta y se endurece en un estado vítreo cuando se enfría lo suficiente) de dureza media alta y brillante, es incoloro, presenta alta transparencia debido a que es amorfo. Tiene buena estabilidad a los rayos UV y resistencia química moderada.

En la figura 9 se muestra la estructura de una molécula de glucosa

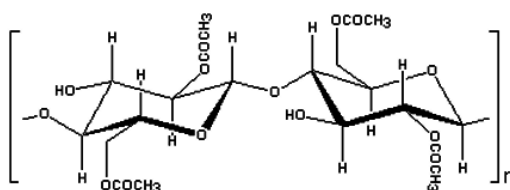


Figura 9: Estructura molecular del acetato de glucosa

Por un lado, hasta hace poco las membranas más utilizadas eran de acetato de celulosa que podían trabajar de manera continua con cloro, pero, en contrapartida debían trabajar en medio ácido para evitar su hidrólisis.

Actualmente se ha pasado a utilizar membranas de **poliamida aromática** que tienen una menor presión de operación y por consiguiente, disminución de la energía. Además se obtiene una mejor calidad de producto y no esta condicionada por pH específico.

Cada uno de los materiales de las membranas exige ciertos requisitos sobre el agua de entrada, los cuales deben cumplirse si se aspira a lograr la vida normal de la membrana.

Los factores que más afectan al material de la membrana; son la temperatura, el pH, las bacterias, el cloro libre y el Índice de Saturación de Langlier.

Cuando se calcula el **Índice de Langlier**, se deben medir algunas características del agua de entrada. Estas son: temperatura del agua, sólidos totales ionizados, dureza del calcio, alcalinidad y pH. Si el índice es positivo, se considera que el agua de alimentación muestra un alto potencial a formar incrustaciones y puede dañar la membrana. Si este es el caso, se requiere de un pretratamiento del agua antes de entrar al sistema de ósmosis inversa.

Puesto que los materiales de las membranas pueden ser afectados por algunos contaminantes existentes en el agua, muchos sistemas de ósmosis inversa requieren de algún tipo de pretratamiento para maximizar la vida útil de la membrana. El ablandamiento, es una de las formas más usadas de tratar el agua para corregir un Índice de Langlier positivo. A través del proceso de ablandamiento, los iones que producen dureza son reemplazados con iones de sodio, los cuales reducen la tendencia de incrustación en la membrana.

Si la modificación del **pH** requiere ser ajustada para corregir un alto nivel de pH en el agua de alimentación, posiblemente será necesaria la inyección de ácido. Normalmente el ácido es inyectado al agua de entrada en una cantidad limitada para obtener un nivel de pH aceptable. Esto se logra convirtiendo la alcalinidad a dióxido de carbono.

Las membranas poliamidas, no son afectadas por bacterias, pero pueden ser destruidas por el **cloro** y otros agentes oxidantes. En este caso, el agua de entrada debe ser pretratada para eliminar el cloro y otros componentes dañinos. El carbón activo puede ser efectivo para

la eliminación del cloro, mientras que la inyección de bisulfato de sodio puede ser utilizada para eliminar otros agentes oxidantes.

La temperatura y la presión pueden afectar también la operación de un sistema de ósmosis inversa. La **temperatura del agua de entrada**, tiene un efecto marcado en la cantidad de agua que una determinada membrana es capaz de producir. Las características de funcionamiento de esta membrana se basan en una temperatura de agua de entrada de 25 °C. Por cada grado centígrado (°C) que ésta disminuya por debajo de 25 °C, habrá una reducción del 3% en la cantidad de agua producida. Por esta razón, en algunos casos se recomienda ajustar la temperatura del agua de entrada. Aquellas temperaturas que sean superiores a 35 °C, causarán daños en la mayoría de las membranas. Por consiguiente, para seleccionar la membrana que proporcione la cantidad adecuada de agua, se debe medir la temperatura del agua de entrada.

La **presión del agua de entrada** puede afectar tanto a la cantidad como a la calidad del agua producida por un sistema de ósmosis inversa. Presiones altas como hasta de 400 psig (27.2 bar), no causarán daños en las membranas; por otro lado, la efectividad de la membrana para eliminar impurezas se verá reducida por las bajas presiones de operación. Un sistema de ósmosis inversa, operando a 200 psig (13.6 bar), mejorará la calidad de un 5 a 10%, si se compara con su operación a 60 psig (4.1 bar). Por debajo de 50 psig (3.4 bar), la calidad es afectada más drásticamente. La cantidad de agua producida puede ser también afectada por la presión. Generalmente, entre más baja sea la presión, menor será la cantidad de agua pura producida.

Es indispensable conocer la composición del agua de entrada, para así poder seleccionar el mejor material que debe usarse en la membrana para el sistema de ósmosis inversa.

La siguiente tabla muestra un resumen de los cinco factores anteriormente comentados y que son los que más afectan las membranas, así como, las limitaciones que estos tienen en función de los materiales de la membrana.

Tabla 6: Comparativa de los materiales de las membranas

	Acetato de celulosa	Poliamida
pH	4 -8	1 - 11
ÍNDICE LANGLIER	Negativo	Negativo
COLOR LIBRE	0.2 - 1.0 ppm de cloro libre	0.0
BACTERIA	Afectado por bacteria, requiere cloro	No lo afecta
TEMPERATURA	4 - 30 °C	4 - 30 °C



### 3.3.4.2 Morfología de la membrana

Las membranas osmóticas son homogéneas, no porosas, de manera que el mecanismo de transporte es por difusión.

Las membranas están compuestas de tres capas, siendo la inferior un tejido soporte de poliéster de unas 120 micras de espesor, encima va una capa de un sustrato micro poroso de polisulfona de unas 40 micras de espesor y finalmente la capa activa, la membrana osmótica, a base de poliamida aromática, poliurea o acetato de celulosa, de un espesor de 0,4 micras.

Existen dos tipos de membranas contenidas en estos módulos: de fibra hueca y de arrollamiento en espiral.

En el caso de membrana de fibra hueca, el agua salada presurizada circula por fuera de las fibras mientras el filtrado circula por el interior de las mismas hacia el final de la fibra donde se recoge el permeado de los miles de fibras. Esta configuración contiene más superficie por unidad de volumen que las espirales.

En la figura 10 se puede ver la disposición de los diferentes elementos que componen una membrana con la configuración de arrollamiento en espiral y la dirección y sentido de las corrientes de entrada y salida.

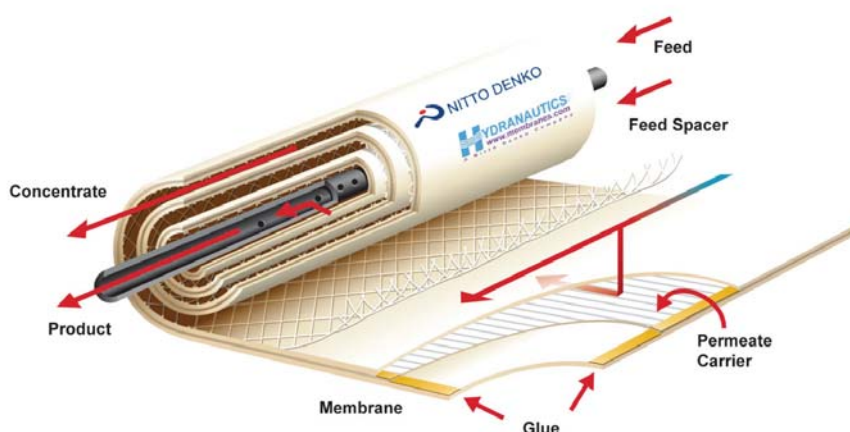


Figura 10. Estructura de una membrana de ósmosis (cortesía de Hydranautics)

En la figura 11 se muestra la misma membrana pero cerrada, tal y como se disponen dentro de los tubos de presión, en las plantas de ósmosis inversa. El diferente diámetro de la membrana viene determinado por la cantidad de caudal de agua a tratar.



Figura 11. Membranas de ósmosis inversa (cortesía de Hydranautics)

Las membranas que se fabrican actualmente se montan dentro de tubos horizontales de diámetros normalizados, llamados módulos, que mejoran su rendimiento y limpieza, son más compactos y facilitan su sustitución. Estos tubos son los llamados **tubos de presión o vessels**.

### 3.3.5 Tubo de presión

Las membranas están contenidas en sus respectivos tubos de presión, que son contenedores estancos fabricados con matriz de resina epoxy curada en caliente y fibra de vidrio como refuerzo, cuyas tapas conectan perfectamente con la membrana, por la cara interior, y por la cara exterior tiene dos salidas que comunican con el permeado y el rechazo.

A continuación se muestra el esquema de lo que sería un tubo de presión y los flujos de entrada y salida de las corrientes de alimentación, permeado y rechazo.

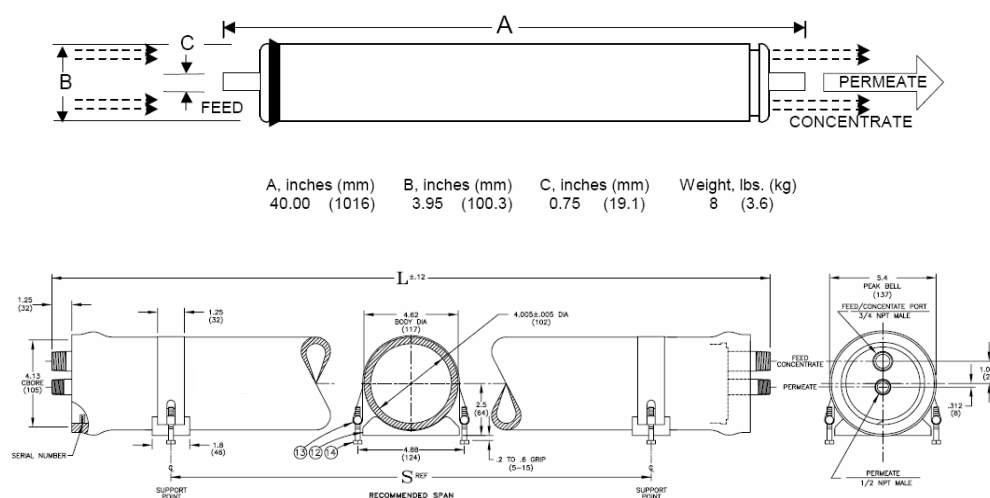


Figura 12. Esquema de un tubo de presión y direcciones de los flujos (cortesía de Code Line)

### 3.3.6 Configuración estructural planta de ósmosis

Las plantas de tratamiento de agua cuyo **objetivo es el suministro de agua de consumo humano** y su principal proceso es la ósmosis inversa, están constituidas por diferentes elementos que definen varios niveles de actuación para el tratamiento del agua.

La planta consistirá en los siguientes equipos y pasos:

- Filtración con un lecho dual compuesto por sílex y antracita.
- Acondicionamiento químico del agua de alimentación, previa entrada a las membranas de ósmosis inversa. Regulación del pH con ácido, reductor de cloro para la protección de las membranas y adición de antiincrustante para evitar precipitaciones.
- Microfiltración de seguridad.
- Bomba de alta presión
- Membranas de ósmosis inversa. Salida del agua de permeado al depósito de distribución y salida del agua de rechazo a emisario submarino o tratamiento posterior.

#### 3.3.6.1 Acondicionamiento químico del agua de alimentación

Prevía entrada al tratamiento de ósmosis inversa, se hace necesario el acondicionamiento químico del agua. Para ello se prevén las siguientes dosificaciones:

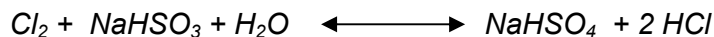
##### Dosificación de bisulfito sódico

El bisulfito sódico ( $\text{NaHSO}_4$ ) se emplea aprovechando sus propiedades como reductor y su capacidad para atacar a numerosos cuerpos orgánicos que destruye y decolora.

Con la adición de este producto se garantiza que no pasan compuestos oxidantes a las membranas de ósmosis inversa.

Por otro lado, este producto ejerce también un efecto bacteria estático, ya que debido a su carácter reductor, reduce el oxígeno presente en el agua y de esta manera la proliferación de las bacterias aeróbicas.

La reacción de descomposición del cloro, es la siguiente:



Resultando de la descomposición, la formación de bisulfato sódico y ácido clorhídrico.

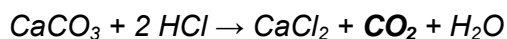
### **Dosificación de antiincrustante**

Cuando el agua pasa a través de las membranas de ósmosis inversa, el aumento de la concentración salina tiende a provocar la precipitación del carbonato cálcico y los sulfatos de calcio y bario principalmente. Estas precipitaciones perjudican notablemente el funcionamiento de las membranas.

La adición de antiincrustante en línea se realiza con el fin de evitar dicha precipitación que podría dañar gravemente las membranas de la ósmosis inversa. El uso del producto, aumenta el producto de solubilidad de la sal susceptible de precipitar, de tal forma que ayudará a mantener el rendimiento de las membranas minimizando la precipitación de sales dañinas.

### **Dosificación de ácido**

Es necesario previa entrada a las membranas de ósmosis inversa realizar un control del pH del agua de alimentación, con el fin de evitar la precipitación de las sales de carbonato de calcio y magnesio. Para ello se dosifica un ácido (ácido clorhídrico) que desplaza a los bicarbonatos hacia la forma de monóxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) evitando así la formación de carbonatos.



El  $\text{CO}_2$  liberado, debido a que su estructura molecular es muy similar a la del agua traspasa libremente la membrana.

Seguidamente, en la figura 14, se muestra un esquema del proceso a seguir y los caudales y concentraciones de nitratos de cada uno de los flujos:

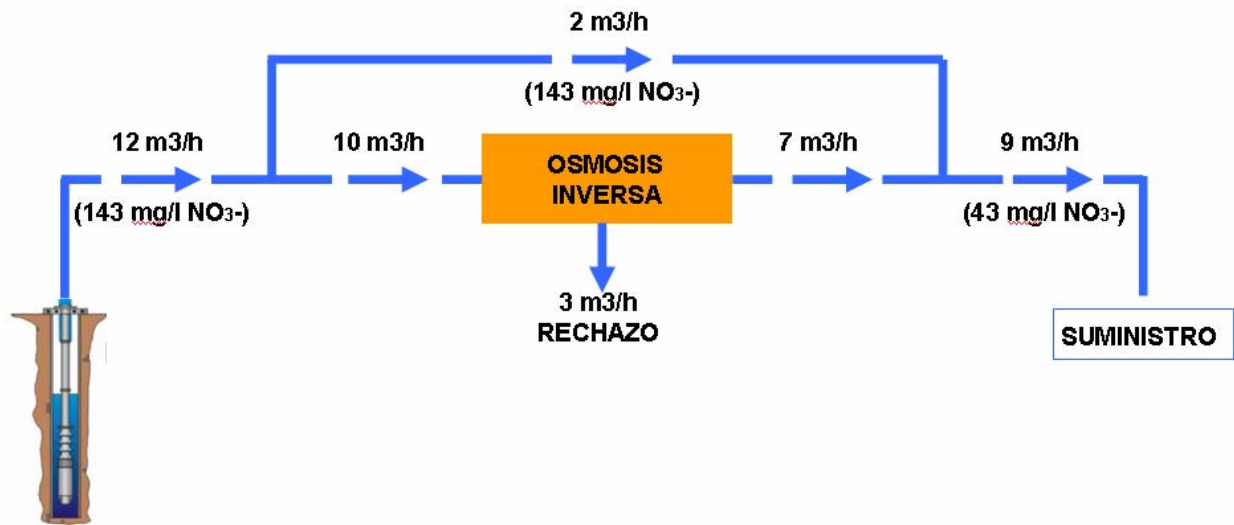


Figura 14. Esquema de tratamiento del agua mediante la tecnología de ósmosis inversa

A continuación se detalla el balance realizado para el cálculo de la concentración de nitratos en el agua para consumo humano.

$$[NO_3^-] = \frac{2 \text{ m}^3 / \text{h}}{9 \text{ m}^3 / \text{h}} \cdot 143 \text{ g / l} + \frac{7 \text{ m}^3 / \text{h}}{9 \text{ m}^3 / \text{h}} \cdot 14,3 \text{ g / l} = [43 \text{ mg / l}]$$

### 3.3.7 Vertido

El rechazo obtenido de la ósmosis inversa, es un agua con alto contenido en sales (salmuera), debido a que su gestión y vertido no es sencilla, debe tenerse muy en cuenta a la hora de decidir la tecnología a aplicar.

Este vertido deberá llevarse a mar, mediante emisario submarino o camiones cisterna, o deberá tratarse.

## 3.4 INTERCAMBIO IÓNICO

La tecnología de intercambio iónico consiste en el cambio de iones móviles unidos por fuerzas electrostáticas a grupos funcionales ácidos o básicos, situados en la superficie de un sólido (resina), por iones de carga similar de la disolución con una mayor afinidad por el grupo funcional.

### 3.4.1 Resinas de intercambio iónico

Las resinas de intercambio iónico son materiales sintéticos, sólidos e insolubles en agua, que se presentan en forma de esferas o perlas de 0.3 a 1.2 mm de tamaño efectivo, aunque también las hay en forma de polvo.

Están compuestas de una alta concentración de grupos polares, ácidos o básicos, incorporados a una matriz de un polímero sintético (resinas estirénicas, resinas acrílicas, etc.) y actúan tomando iones de las soluciones (generalmente agua) y cediendo cantidades equivalentes de otros iones.

La principal ventaja de las resinas de intercambio iónico es que pueden recuperar casi la totalidad de su capacidad de intercambio original, mediante el tratamiento con una solución regenerante.

#### 3.4.1.1 Tipos de resinas

Las resinas de intercambio iónico pueden ser de los siguientes tipos dependiendo de cual es el ion que aporta al agua potable: Si aporta iones negativos (aniones, como en el nuestro caso los cloruros,  $\text{Cl}^-$ ) se tratará de una resina aniónica; si aporta iones positivos (cationes) se denomina catiónica.

##### a. Resinas catiónicas de ácido fuerte

- Resinas catiónicas de sodio: eliminan la dureza del agua por intercambio de sodio por el calcio y el magnesio (descalcificadores).
- Resinas catiónicas de hidrógeno: pueden eliminar todos los cationes (calcio, magnesio, sodio, potasio, etc) por intercambio con hidrógeno.

**b. Resinas catiónicas de ácidos débiles:** eliminan los cationes que están asociados con bicarbonatos.

**c. Resinas aniónicas de bases fuertes:** eliminan todos los aniones. Su uso se ha generalizado para eliminar aniones débiles en bajas concentraciones, tales como: carbonatos y silicatos.

**d. Resinas aniónicas de base débil:** eliminan con gran eficiencia los aniones de los ácidos fuertes, tales como sulfatos, nitratos y cloruros.

### 3.4.2 Principio de funcionamiento

El intercambio iónico funciona en ciclos compuestos por dos procesos distintos: En el primero de ellos, el de producción, el agua cruda de la cual se quiere retirar un determinado ion, se pasa a través de la resina, la cual intercambia éste por otro, menos dañino para la salud. Una vez que la resina ha agotado las reservas de este ion, se procede a realizar lo que se denomina un ciclo de regeneración, con el fin de volver a restituir la resina con los iones iniciales. Una vez la resina esta regenerada, puede procederse a un nuevo ciclo de producción de agua potable.

En el caso del municipio de Sant Climent se utilizará una resina del tipo aniónica de base débil. El intercambio, se produce entre iones nitratos provenientes del agua de alimentación e iones cloruro soportados en la resina.

La mejor forma de representar el proceso que ocurre en una resina es mediante una reacción química, en la que la resina, que suele tener una composición química compleja, se representa mediante la letra R.

La representación de funcionamiento de una resina aniónica para el proceso de desnitrificación sería la siguiente:

#### Ciclo de producción

$R-Cl^- + NO_3^- \rightarrow R-NO_3^- + Cl^-$ , es decir, la resina (R) que retiene nitratos y libera cloruros.

#### Ciclo de regeneración

$R-NO_3^- + Cl^- \rightarrow R-Cl^- + NO_3^-$ , realiza la operación contraria.

#### 3.4.2.1 Regeneración

La regeneración de las resinas de intercambio iónico es el proceso inverso al de producción y tiene por finalidad devolver a la resina de intercambio iónico su capacidad inicial de

intercambio. Esto se realiza haciendo pasar soluciones que contengan el ión móvil original, el cual se deposita en la resina y desaloja los iones captados durante el agotamiento.

Para la regeneración de las resinas de intercambio iónico se usan diferentes soluciones regenerantes, dependiendo del ion a eliminar. En el caso de Sant Climent la solución regeneradora es sal común (cloruro de sodio).

Una vez regenerada la resina está lista para un nuevo ciclo de intercambio iónico.

En el caso de la eliminación de nitratos, la regeneración se realiza con una solución concentrada de cloruro sódico. El agua que ha sido utilizada para realizar la regeneración contiene un alto contenido en nitratos, lo que la hace no apta para agua de consumo humano.

Si bien la eliminación de nitratos a través de resinas de intercambio iónico depende básicamente del tiempo de contacto del agua con las resinas, también es cierto que intervienen, entre otros factores, la concentración en fosfatos y la conductividad. Es por ello, que es difícil establecer a priori la eficiencia de estos equipos.

### **3.4.3 Configuración estructural**

La planta para la eliminación de nitratos mediante resinas de intercambio iónico, consistirá en los siguientes elementos:

- Bombeo de impulsión del agua del pozo.
- Acondicionamiento químico del agua de salida del pozo, para control biológico, con hipoclorito sódico.
- Equipo desnitrificador compuesto por dos resinas de intercambio iónico, una funcionando y la otra en reserva y una válvula reguladora de presión (sistema dúplex).
- Sistema de regeneración (depósito de almacenamiento de la salmuera para la regeneración de las resinas y bomba de alimentación de salmuera).
- Depósito de agua tratada con una instalación de reclusión en la recirculación del mismo.
- Sistema de vertido compuesto por un depósito de homogenización de las aguas de lavado y tratamiento o gestión del vertido a mar.



Seguidamente, en la figura 15, se muestra un esquema del proceso a seguir y los caudales y concentraciones de nitratos de cada uno de los flujos:

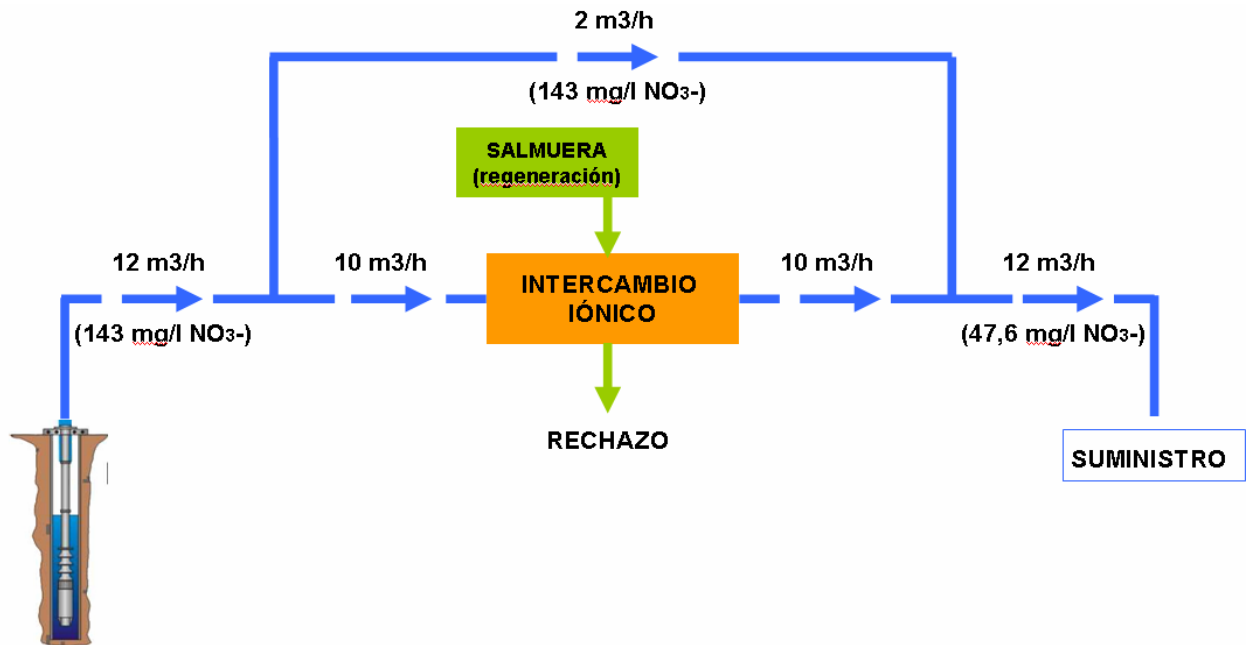


Figura 15. Esquema de tratamiento del agua mediante la tecnología de intercambio iónico

Si se tiene en cuenta que para aguas no muy cargadas se puede llegar a eliminar un máximo del 80% de los nitratos, y la concentración de nitratos a la entrada es de 143 mg/l se prevé obtener un agua de salida con una concentración de 28,6 mg/l.

A continuación se detalla el balance realizado para el cálculo de la concentración de nitratos en el agua para consumo humano.

$$[NO_3^-] = \frac{2 m^3 / h}{12 m^3 / h} \cdot 143 g / l + \frac{10 m^3 / h}{12 m^3 / h} \cdot 28.6 g / l = [47.6 mg / l]$$

#### 3.4.4 Vertido

Las necesidades del agua de lavado (el lavado debe realizarse con agua tratada), son de un caudal el doble del que circula en condiciones normales a través de las resinas, es decir de 20 m³/h. El lavado se prevé que se realice cada 24 horas y durante aproximadamente media hora.

El agua residual obtenida (rechazo) esta alrededor de 10 m<sup>3</sup>/día y es la producida por la limpieza y regeneración de las resinas. Este rechazo es un efluente con un elevado contenido en sales, lo que hace inviable su vertido a colector público. Su tratamiento será similar al tratamiento dado al rechazo de la ósmosis inversa, emisario submarino o tratamiento posterior.

### 3.5 HIDRONITREX®

El sistema Hidronitrex® (patente número P200000792), es un sistema basado en el intercambio iónico combinado con reactor electroquímico. El resultado final será la eliminación de los nitratos, con bajo aporte de cloruro externo (elemento que aumentaría la salinidad del cauce receptor final) y un vertido prácticamente inexistente.

El proceso Hidronitrex® consiste en un sistema de intercambio iónico en el que el agua resultante de la regeneración de la resina es reutilizado gracias a la restitución de sus propiedades mediante un reactor electroquímico, con el que se evita el vertido de salmuera y nitrato.

El primer paso, denominado producción, consiste en un sistema de intercambio iónico como el anteriormente comentado y es la etapa en que se produce el agua producto o permeado, que es el agua apta para consumo humano. Tras la regeneración de las resinas el agua utilizada para ello sale con un elevado contenido en nitratos, lo que la hace no apta para consumo humano e inutilizable para otra regeneración.

El éxito del proceso Hidronitrex® consiste en que minimiza al máximo el volumen de la solución regenerante, para posteriormente tratarlo en un reactor electroquímico, donde se destruyen los nitratos que se transforman en nitrógeno gas (N<sub>2</sub>) dejando dicha disolución en condiciones de ser nuevamente utilizada en otra regeneración.

Como se puede observar una vez preparada la primera solución regenerante no es necesario preparar más, pues reutiliza indefinidamente, con lo que no se genera vertido derivado del proceso de regeneración, principal problema de las instalaciones de intercambio iónico.

### 3.5.1 Reacciones electroquímicas

Son aquellas transformaciones químicas (oxidaciones y reducciones) que se consiguen haciendo pasar una corriente eléctrica a través de una disolución. De forma muy simplificada se puede explicar de la siguiente manera:

Fase 1:  $R-Cl^- + NO_3^- + H_2O \rightarrow R-NO_3^- + Cl^- + H_2O$  intercambio iónico

Fase 2:  $Cl^- + NO_3^- + H_2O \rightarrow Cl^- + H_2O + N_2 + O_2$  reducción del nitrógeno

- Se establece una diferencia de potencial eléctrico entre dos electrodos: ánodo (negativo) y cátodo (positivo).
- Los iones en disolución (cargados eléctricamente) se mueven hacia el electrodo de carga opuesta a la suya, y una vez en sus proximidades se produce una transferencia de electrones. En el ánodo pasan los electrones del ión al electrodo (oxidación) y en el cátodo el ión gana electrones cedidos por el electrodo (reducción). Cerrando de esta forma el circuito eléctrico.

En la siguiente figura se muestra una fotografía de una planta para el tratamiento de nitratos con el sistema Hidronitrex®



Figura 16. Fotografía de una planta de Hidronitrex® (cortesía de Sedelam, empresa perteneciente a Agbar y comercializadora de la tecnología)

### 3.5.2 Configuración estructural

La instalación de Hidronitrex® estará compuesta por:

- Bombeo de impulsión del agua del pozo
- Acondicionamiento químico del agua de salida del pozo, para control biológico, con hipoclorito sódico.
- Equipo desnitrificador compuesto por dos resinas de intercambio iónico, una funcionando y la otra en reserva y una válvula reguladora de presión.
- Sistema de regeneración (depósito de almacenamiento de la salmuera para la regeneración de las resinas y bomba de alimentación de salmuera)
- Depósito de agua tratada con una instalación de reclusión en la recirculación del mismo.
- Sistema de destrucción de nitratos compuesto por un depósito de homogenización de las aguas de lavado y una bomba para la impulsión del vertido a colector (en caso de que pueda verse a la red de saneamiento)

Seguidamente, en la figura 17, se muestra un esquema del proceso a seguir y los caudales y concentraciones de nitratos de cada uno de los flujos:

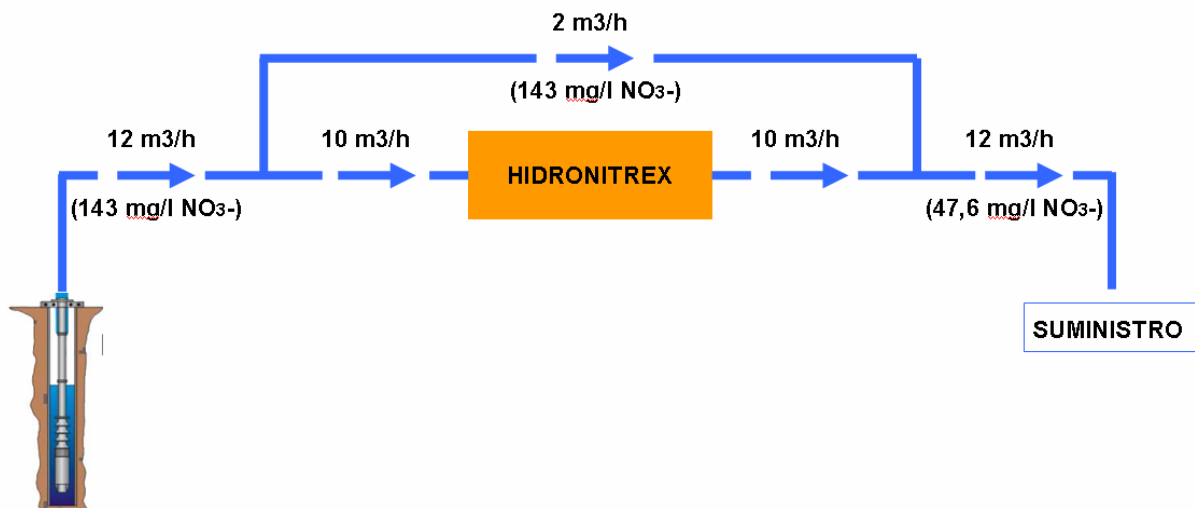


Figura 17. Esquema de tratamiento del agua mediante la tecnología Hidronitrex®

A continuación se detalla el balance realizado para el cálculo de la concentración de nitratos en el agua para consumo humano.

$$[NO_3^-] = \frac{2 m^3 / h}{12 m^3 / h} \cdot 143 g / l + \frac{10 m^3 / h}{12 m^3 / h} \cdot 28.6 g / l = [47.6 mg / l]$$

### **3.5.3 Vertido**

La gran ventaja de este proceso es que minimiza al máximo el volumen de solución regenerante, para posteriormente tratarla en un reactor electroquímico donde se destruirán los nitratos, que se transforman en nitrógeno gas, dejando esta disolución en condiciones de ser nuevamente utilizada en otra regeneración. Por lo que no se genera vertido derivado del proceso de regeneración.

## **3.6 RESUMEN**

Haciendo un resumen comparativo de las diferentes tecnologías explicadas anteriormente se llegan a las siguientes conclusiones.

El sistema de biofiltración para la reducción de la concentración de nitratos en agua potable, es un sistema fiable y seguro desde el punto de vista del fundamento teórico del proceso, ya que es un proceso biológico natural. El inconveniente que puede plantear este sistema es la elevada dependencia de los microorganismos con las condiciones del entorno, especialmente con los parámetros de pH y temperatura.

Desde el punto de vista medio ambiental es un sistema sostenible ya que realiza una eliminación completa del nitrato y no una derivación de éste a otra corriente de menor caudal y como consecuencia mayor concentración de éste, corriente de rechazo. Es un sistema limpio y que no genera subproductos que deban ser tratados de forma especial.

Una gran ventaja de este proceso, es el agua de vertido del sistema, ya que es la resultante del lavado del soporte de los microorganismos encargados de la desnitrificación, por lo que no contiene parámetros que deban ser tratados de manera especial para su vertido.

Si se observa el aspecto social, el tratamiento del agua mediante bacterias puede generar alarma social, aunque no justificada, sí podría ser un factor determinante a la hora de decidirse por esta tecnología.

La ósmosis inversa retiene los iones nitrato en la parte exterior de la membrana, sin que estos lleguen a atravesarla de tal modo que salen del sistema con el agua de rechazo. Este rechazo, suele ser del orden del 30% del agua de entrada.

Si bien el proceso de ósmosis inversa es un proceso que tiene grandes requisiciones en el agua de alimentación y su seguimiento y mantenimiento debe ser exhaustivo y costoso, es un proceso muy conocido y muy fiable, lo que hace de él una buena alternativa de tratamiento.

Además socialmente, este sistema tiene muy buena prensa, por ser el sistema más utilizado para desalar el agua del mar y evitar así restricciones de agua en las épocas de verano donde hay grandes afluentes de población o durante largas épocas de sequía.

El sistema de intercambio iónico, como se ha comentado anteriormente, substituye los iones nitrato por los iones cloruro, quedando los iones nitrato en la resina y posteriormente, cuando ésta regenera, en el agua de rechazo.

Referente a las resinas, debe tenerse en cuenta que se han de regenerar periódicamente y se estima que aproximadamente se pierde, por este motivo, un 2% del caudal total intercambiado.

Cabe señalar que las resinas, en función de su uso, deberán cambiarse cada 4 o 5 años por unas nuevas.

Si bien, las tecnologías de ósmosis inversa e intercambio iónico son sistemas que funcionan muy bien, tienen el inconveniente de que producen un rechazo, aunque poco voluminoso, altamente contaminante y que por lo tanto, no puede verterse a colector. Una alternativa muy común, en poblaciones cercanas a la costa, es construir una tubería que conduzca este rechazo al mar, mediante un emisario submarino. Su gestión puede pasar también, por el transporte mediante un camión cista, lo que encarece el coste del sistema.

El sistema HIDRONITREX® mediante el reactor electroquímico, evita el vertido de salmuera y nitrato, sin embargo, esta tecnología queda descartada por sus elevados costes de inversión y mantenimiento del reactor electroquímico.

A continuación se muestra una tabla comparativa de diferentes ítems para cada una de las tecnologías estudiadas en este capítulo:

Tabla 7: Tabla comparativa de las diferentes tecnologías

	Biofiltración	Ósmosis inversa	Intercambio iónico	Hidronitrex®
<b>Tipo de proceso</b>	Biológico	Físico-químico	Físico-químico	Físico-químico
<b>[NO<sub>3</sub><sup>-</sup>] final (mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/l)</b>	43	43	47.6	47.6
<b>Caudal de entrada al proceso</b>	12 m <sup>3</sup> /h	10 m <sup>3</sup> /h	10 m <sup>3</sup> /h	10 m <sup>3</sup> /h
<b>Caudal de agua tratada mediante la tecnología</b>	12 m <sup>3</sup> /h	7 m <sup>3</sup> /h	10 m <sup>3</sup> /h	10 m <sup>3</sup> /h
<b>Caudal de by pass</b>	0 m <sup>3</sup> /h	2 m <sup>3</sup> /h	2 m <sup>3</sup> /h	2 m <sup>3</sup> /h
<b>Caudal de rechazo</b>	45.67 m <sup>3</sup> /día	51 m <sup>3</sup> /día	10 m <sup>3</sup> /día	0 m <sup>3</sup> /día
<b>Pretratamiento necesario</b>	Adición de fuente de carbono y fósforo	Filtración, adición de reactivos químicos y ultrafiltración		
<b>Postratamiento necesario</b>	Eliminación de la materia orgánica y filtración	Mezcla del agua tratada con agua del pozo	Mezcla del agua tratada con agua del pozo	Mezcla del agua tratada con agua del pozo
<b>Parámetros dependientes</b>	pH, temperatura, concentración de carbono y fósforo en el agua	pH y temperatura		

En función de todo lo anteriormente descrito se toma la decisión de estudiar en profundidad, para el caso del municipio de Sant Climent, la tecnología de biofiltración y más concretamente la tecnología UFBAF®, por considerarla una tecnología novedosa y con grandes beneficios medioambientales, como son la eliminación de los nitratos de la corriente de agua, y la no generación de vertido (rechazo) contaminante, y la tecnología de la ósmosis inversa, por ser la más comúnmente utilizada en los procesos de potabilización del agua.

## 4 BASES DE PARTIDA

A continuación se describe la documentación y datos de partida que servirán como base para el posterior diseño y dimensionado de la planta de tratamiento de agua del municipio de Sant Climent.

- Datos analíticos a la calidad del agua del pozo de Sant Climent. (Anejo II)
- Caudales necesarios de agua a tratar.
- Concentración de nitratos en el agua a la entrada y salida de la planta.
- Normativa aplicable al agua de vertido (lavado de filtros).
- Normativa aplicable a la calidad el agua de consumo humano.

### 4.1 CAUDALES DE AGUA A TRATAR

La capacidad máxima de extracción de agua del pozo es de 12 m<sup>3</sup>/h, y dado que el consumo medio de la población es del orden de 150 m<sup>3</sup>/día, se calcula que el bombeo trabajará aproximadamente 12.5 horas al día. Si bien esto no es del todo cierto, ya que se deben tener en cuenta el tiempo destinado al llenado del depósito de acumulación de agua para las limpiezas, se tomará este dato como real para realizar los cálculos, puesto que son las horas necesarias de funcionamiento para suministrar el agua de consumo humano.

Se consideran los siguientes datos de partida:

- **Caudal de tratamiento máximo de 12,00 m<sup>3</sup>/h.**
- **Consumo diario de agua por parte de la población: 150 m<sup>3</sup>/día**

Tabla 8: Resumen de los datos de partida considerados

Datos de partida		
Caudal medio diario	150	m <sup>3</sup> /d
<b>Caudal de diseño</b>	<b>12,0</b>	<b>m<sup>3</sup>/h</b>
<b>Horas de trabajo de diario</b>	<b>12,5</b>	<b>h/d</b>
Temperatura del agua	15	°C

En la tabla 8 se muestran los datos de partida que se han tomado para realizar el diseño de la planta de tratamiento del agua. Se ha considerado que la temperatura del agua del pozo es de 15°C (según los datos tomados en varias ocasiones por el personal que opera la planta).



## 4.2 CALIDAD DEL AGUA A TRATAR

Se considera una concentración máxima de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) en el agua a tratar de 143,00 mg/l o ppm (partes por millón) (valor máximo obtenido en los resultados analíticos), ver anejo II, y una concentración máxima a la salida inferior al límite fijado por el Real Decreto 140/2003, (50,00 mg/l), por el que se establecen los criterios higiénico sanitarios del agua de consumo humano.

Para el caso de la biofiltración, se ha fijado una concentración máxima de nitratos en el agua tratada de 43,00 mg/l.

A continuación, sabiendo la concentración de nitratos en el agua a tratar y la concentración en el agua tratada, se calcula la cantidad nitratos que el sistema debe eliminar del agua:

-  $[\text{NO}_3^-]$  entrada = 143 mg/l (ppm)

$$143 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{10^3 \text{ mg}} \cdot \frac{10^3 \text{ l}}{1 \text{ m}^3} \cdot \frac{12 \text{ m}^3}{\text{h}} = 1.716 \frac{\text{kgNO}_3^-}{\text{h}}$$

$$1.716 \frac{\text{kgNO}_3^-}{\text{h}} \cdot 12.5 \frac{\text{h}}{\text{dia}} = \left[ 21.45 \frac{\text{kgNO}_3^-}{\text{dia}} \right] \text{ Kg de nitratos que entran en la planta de tratamiento por día}$$

-  $[\text{NO}_3^-]$  salida = 30 mg/l (ppm)

$$43 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{10^3 \text{ mg}} \cdot \frac{10^3 \text{ l}}{1 \text{ m}^3} \cdot \frac{12 \text{ m}^3}{\text{h}} = 0.516 \frac{\text{kgNO}_3^-}{\text{h}}$$

$$0.516 \frac{\text{kgNO}_3^-}{\text{h}} \cdot 12.5 \frac{\text{h}}{\text{dia}} = \left[ 6.37 \frac{\text{kgNO}_3^-}{\text{dia}} \right] \text{ Kg de nitratos que salen de la planta de tratamiento por día}$$

-  $[\text{NO}_3^-]$  a eliminar:

$$\text{KgNO}_3^-/\text{h} \rightarrow 1.716 - 0.516 = \mathbf{1.200 \text{ KgNO}_3^-/\text{h}}$$

$$\text{KgNO}_3^-/\text{dia} \rightarrow 21.45 - 6.37 = \mathbf{15.08 \text{ KgNO}_3^-/\text{día}}$$

En la siguiente tabla se expone un resumen de las concentraciones de nitratos presentes en el sistema de tratamiento:

Tabla 9: Concentraciones de nitratos presentes en el sistema de tratamiento

Calidad del tratamiento a lograr		
Cantidad de $\text{NO}_3^-$ en el afluente	1,716	Kg/h
	21,45	Kg/d
Cantidad de $\text{NO}_3^-$ en el efluente	0,51	Kg/h
	6,37	Kg/d
Cantidad de $\text{NO}_3^-$ a eliminar	<b>1,20</b>	<b>Kg/h</b>
	15,08	Kg/d

#### 4.2.1 Caracterización del agua bruta (salida del pozo)

Según los análisis realizados por laboratorio de análisis, LABAQUA, la caracterización del agua de entrada al sistema (alimentación) es la indicada en la siguiente tabla:

Tabla 10: Caracterización del agua de alimentación

Parámetro analizado	Resultado analítico 15/09/2009	Resultado analítico 19/05/2009	Límites RD 140/2003
pH	7 U. pH	7.6 U. pH	6.5-9.5 U. pH
Conductividad a 20°C	1278 $\mu\text{S/cm}$	1228 $\mu\text{S/cm}$	2500 $\mu\text{S/cm}$
Amonio	0.14 mg/l	0.18 mg/l	0.5 mg/l
Oxidabilidad	1.0 mg $\text{O}_2/\text{l}$	0.6 mg $\text{O}_2/\text{l}$	5.0 mg $\text{O}_2/\text{l}$
Nitritos	< 0.02 mg/l	< 0.02 mg/l	0.1 mg/l
<b>Nitratos</b>	<b>148.0 mg/l</b>	<b>155.0 mg/l</b>	<b>50 mg/l</b>
Cloruros	181.0 mg/l	184.0 mg/l	250 mg/l
Sulfatos	65.3 mg/l	59.5 mg/l	250 mg/l
<b>Hierro*</b>	<b>620 <math>\mu\text{g/l}</math></b>	<b>476 <math>\mu\text{g/l}</math></b>	<b>200 <math>\mu\text{g/l}</math></b>

Se observa, en los datos presentados en la tabla 9 que los niveles de hierro y de nitratos sobrepasan los valores establecidos por el Real decreto 140/2003.

(\*).- Los niveles de hierro no se han tenido en cuenta debido a que esta instalación ha estado mucho tiempo en desuso y se considera que el hierro analizado en el agua proviene de la tubería de aspiración del pozo, que es de este mismo material.

### 4.3 LEGISLACIÓN APLICABLE

A continuación se expone un resumen de la normativa más importante que hay que tener en cuenta a la hora de diseñar un tratamiento para un agua de consumo humano.

#### 4.3.1 General

- **Reglamento del Dominio Público Hidráulico.**
- **Directiva Marco del Agua** (2000/60/CEE).
- **Real Decreto 606/2003**, del 23 de mayo, por el que se modifica el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los Títulos preliminar, I, IV, V, VI y VIII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas.

#### 4.3.2 Agua potable

- **Directiva 98/83/CE** del consejo del 3 de noviembre de 1998 relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano.
- **Real Decreto 140/2003**, del 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano.
- **Orden SCO 1591/2005**, de 30 mayo, sobre el Sistema de Información Nacional de Aguas de Consumo.
- **Orden SCO 3719/2005**, de 21 de noviembre, sobre sustancias para el tratamiento del agua destinada a la producción de agua de consumo humano (BOE 287 del 1/12/2005).

#### 4.3.3 Agua residual

- **Directiva 91/271/CEE**, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas.
- **Ordenanza Municipal Sobre el Uso de la Red de Alcantarillado Sanitario del Núcleo Urbano de Mahón**

De esta normativa, aquella que más va a regir el proceso de tratamiento y que más nos va a condicionar el diseño en cuanto a calidades de agua es el RD 140/2003 para el agua tratada y la Ordenanza Municipal Sobre el Uso de la Red de Alcantarillado Sanitario del Núcleo Urbano de Mahón. Ambas están adjuntadas en el anejo V.

## 5 ESTUDIO Y DISEÑO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO MEDIANTE BIOFILTRACIÓN (UFBAF®)

### 5.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO

Como se ha descrito en el apartado 3.2.4., la planta consta de diferentes niveles de actuación para el tratamiento del agua, todo ellos con el **objetivo es obtener de agua de consumo humano**.

En este apartado se describe detalladamente el proceso de tratamiento adoptado para la eliminación de nitratos del agua de consumo humano de Sant Climent, cuyo principal tratamiento es la tecnología de biofiltración, UFBAF®, así como los equipos que componen la planta y los cálculos realizados para el dimensionado de los mismos.

El proceso de tratamiento esta compuesto por las siguientes fases o pasos:

- Bombeo
- Pretratamiento: Acondicionamiento químico del agua
- Tratamiento: Biofiltración para desnitrificación
- Filtración para eliminación de DQO
- Filtración de afino
- Almacenamiento

#### 5.1.1 *Bombeo del agua de pozo*

Se dispone para la extracción del agua del pozo, de una bomba sumergible con una capacidad de 12,00 m<sup>3</sup>/h y 90 m.c.a. (metros de columna de agua), debido a que el nivel freático se encuentra a ésta profundidad. Este caudal de extracción viene fijado por la capacidad máxima de extracción del pozo.

La planta tendrá, considerando las necesidades de agua diarias a la población y las necesidades diarias de lavado de los filtros, un régimen de funcionamiento entre 12.5-15 horas al día aproximadamente.

La bomba estará equipada con un variador de frecuencia que irá controlado, por un lado, por la concentración de nitratos en el agua del pozo y por otro, por el nivel de agua del depósito posterior a la extracción del pozo.

Este depósito está provisto de un medidor de nivel ultrasónicos que regulará junto con el medidor de nitratos en continuo, el funcionamiento de la bomba del pozo.

Mediante este sistema se podrá controlar el caudal extraído por la bomba con el objetivo de ajustarse a los requerimientos del tratamiento dimensionado. Así mismo, y aun teniendo en cuenta que la variabilidad de la concentración de nitratos en el pozo será baja, si se detectan concentraciones de nitratos superiores a 143 mg/l, el variador de frecuencia permitirá actuar sobre la bomba reduciendo el caudal de extracción. En caso contrario, si la concentración de nitratos disminuye, la bomba como máximo seguirá extrayendo 12 m<sup>3</sup>/h ya que es la capacidad máxima del pozo.

Del mismo modo la bomba del pozo vendrá regulada también, por el nivel del depósito posterior, de tal forma que cuando el depósito se encuentre en su nivel máximo la bomba parará.

**El sistema de biofiltración se dimensiona para admitir una concentración máxima de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> de 143,00 ppm con un caudal de extracción de 12,00 m<sup>3</sup>/h.**

#### **5.1.2     *Pretratamiento: Acondicionamiento químico del agua***

Seguidamente al pozo, el agua llega a un depósito de 10 m<sup>3</sup> (depósito de entrada), construido en PRFV (Poliéster Reforzado con fibra de Vidrio) donde se realizan las dosificaciones de los nutrientes y la medición en continuo de la concentración de nitratos comentada en el apartado 4.2.

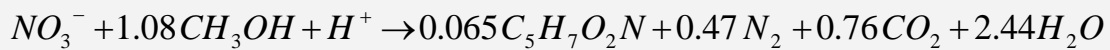
Previo llegada al depósito de entrada se dispone de un caudalímetro electromagnético para llevar el control del caudal que llega a planta.

La fuente de carbono necesaria para la realización de los procesos biológicos de las bacterias y obtención de energía, puede provenir de la materia orgánica del agua o de una fuente externa, como se ha descrito anteriormente. En el caso del núcleo urbano de Sant Climent, al ser un agua de pozo, la materia orgánica presente en el agua es muy escasa, por lo que se hace necesario la adición de una fuente de carbono externa y fácilmente asimilable, ésta puede ser metanol o ácido acético.

A continuación se detallan las reacciones y los cálculos para la adición del metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) y del ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) como fuentes de carbono externas y se estudia cual de ellas es más adecuada. Se realizan también, los cálculos oportunos para determinar su concentración en el agua y se definen los sistemas y equipos más apropiados para su correcta dosificación.

#### 5.1.2.1 Metanol

Para el caso de dosificación de metanol como fuente de carbono externa, se tiene, que la reacción resultante de la acción de los microorganismos teniendo el  $\text{NO}_3^-$  como aceptor de electrones es:



$$1.08 \frac{\text{mol CH}_3\text{OH}}{\text{mol NO}_3^-} \cdot \frac{32 \text{ g CH}_3\text{OH}}{1 \text{ mol CH}_3\text{OH}} \cdot \frac{1 \text{ mol NO}_3^-}{62 \text{ g NO}_3^-} = 0.56 \frac{\text{g CH}_3\text{OH}}{\text{g NO}_3^-} \quad \text{cantidad de metanol}$$

eliminada estequiométricamente por nitrato eliminado.

$$0.56 \frac{\text{g CH}_3\text{OH}}{\text{g NO}_3^-} \cdot \frac{62 \text{ g NO}_3^-}{14 \text{ g N} - \text{NO}_3^-} = \left[ 2.5 \frac{\text{g CH}_3\text{OH}}{\text{g N} - \text{NO}_3^-} \right] \quad \text{cantidad de metanol eliminada}$$

estequiométricamente por nitrógeno como nitrato eliminado.

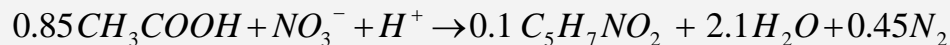
$$0.56 \frac{\text{kg CH}_3\text{OH}}{\text{kg NO}_3^-} \cdot 1.200 \frac{\text{kg NO}_3^-}{\text{h}} = \left[ 0.67 \frac{\text{kg CH}_3\text{OH}}{\text{h}} \right] \quad \text{caudal másico de metanol eliminado}$$

estequiométricamente del sistema

**Cantidad de metanol consumida por los microorganismos por gramo de nitrato eliminado del sistema =  $0.56 \text{ g CH}_3\text{OH/g NO}_3^-$ .**

### 5.1.2.2 Ácido acético

Para el caso de dosificación de ácido acético, tenemos que la reacción resultante de la acción de los microorganismos teniendo el  $\text{NO}_3^-$  como aceptor de electrones es:



(Desnitrification of groundwater using acetic as a carbon source. A.Mohseni-Bandpi, D.J. Elliott and A. Momeny-Mazdeh)

Teniendo en cuenta la reacción global del proceso, se calculan los gramos de ácido acético consumidos por los microorganismos por gramo de nitrato eliminado.

$$\frac{0.85\text{mol CH}_3\text{COOH}}{1\text{mol NO}_3^-} \cdot \frac{60\text{g CH}_3\text{COOH}}{1\text{mol CH}_3\text{COOH}} \cdot \frac{1\text{mol NO}_3^-}{62\text{g NO}_3^-} = 0.82 \frac{\text{g CH}_3\text{COOH}}{\text{g NO}_3^-} \text{ Cantidad de ácido}$$

acético eliminada estequiométricamente por nitrato eliminado.

$$0.82 \frac{\text{g CH}_3\text{COOH}}{\text{g NO}_3^-} \cdot \frac{62\text{g NO}_3^-}{14\text{g N} - \text{NO}_3^-} = \left[ 3.63 \frac{\text{g CH}_3\text{COOH}}{\text{g N} - \text{NO}_3^-} \right] \text{ Cantidad de ácido acético}$$

eliminada estequiométricamente por nitrógeno como nitrato eliminado.

$$0.82 \frac{\text{kg CH}_3\text{COOH}}{\text{kg NO}_3^-} \cdot 1.20 \frac{\text{kg NO}_3^-}{h} = 0.98 \frac{\text{kg CH}_3\text{COOH}}{h} \text{ caudal másico de ácido acético}$$

eliminado estequiométricamente en el sistema

**Cantidad de ácido acético consumida por los microorganismos por gramo de nitrato eliminado del sistema =  $0.82\text{g CH}_3\text{COOH/g NO}_3^-$ .**

La energía obtenida de este proceso será utilizada por los microorganismos para su crecimiento bacteriano. No obstante, hace falta tener en cuenta que, en ausencia de amonio en cantidades suficientes, una parte de nitrato será utilizada como fuente de nitrógeno estructural (asimilación del nitrato). En el caso de disponer de amonio, este es elegido preferentemente como fuente de nitrógeno para estructura.

### 5.1.3 Relación DQO frente a la fuente de carbono externa

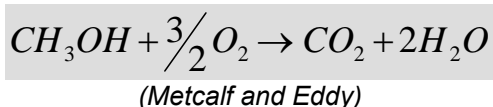
Teniendo en cuenta que la fuente de carbono añadida al sistema confiere una Demanda Química de Oxígeno (DQO) al agua a tratar, se deberá calcular que cantidad de DQO, expresada como kilos de oxígeno es eliminada estequiométricamente por kilo de nitrato eliminado.

La **DQO o Demanda Química de Oxígeno** es la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar toda la materia orgánica y oxidable presente en un agua residual. Es por tanto una medida representativa de la contaminación orgánica de un efluente siendo un parámetro a controlar dentro de las distintas normativas de vertidos y que nos da una idea muy real del grado de toxicidad del vertido. Existen distintas formas de disminuir la DQO como los tratamientos físico-químicos, la electrocoagulación y el ozono.

A continuación se describen las reacciones que tienen lugar en el caso de utilizar metanol o ácido acético, como fuente de carbono externa:

#### 5.1.3.1 Relación DQO/CH<sub>3</sub>OH

La reacción producida entre el metanol y el oxígeno es la siguiente, se toman los gramos de O<sub>2</sub> como gramos de DQO:



$$1 \text{ g } CH_3OH \cdot \frac{1 \text{ mol } CH_3OH}{32 \text{ g } CH_3OH} \cdot \frac{1.5 \text{ mol } O_2}{1 \text{ mol } CH_3OH} \cdot \frac{32 \text{ g } O_2}{1 \text{ mol } O_2} = 1.5 \text{ g } O_2 \rightarrow \mathbf{1.5 \text{ g DQO/g } CH_3OH}$$

NOTA: Se considera que los Kg O<sub>2</sub> son equivalentes a los Kg de DQO.

DQO (Kg O<sub>2</sub>) eliminada estequiométricamente:

$$0.67 \frac{\text{kg } CH_3OH}{h} \cdot \frac{1.5 \text{ kg } O_2}{1 \text{ kg } CH_3OH} = \left[ 1.01 \frac{\text{kg } O_2}{h} \right] \quad \text{Kg de DQO eliminados}$$

estequiométricamente del sistema por hora

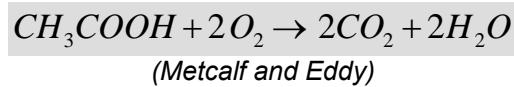
$$\left( 12.62 \frac{\text{kg } O_2}{\text{dia}} \Big/ 150 \frac{m^3}{\text{dia}} \right) = \left[ 0.084 \frac{\text{mg } O_2}{m^3} \right]$$



$$\frac{12.62 \frac{\text{kg } O_2}{\text{dia}}}{15.08 \frac{\text{kg } NO_3^-}{\text{dia}}} = 0.84 \frac{\text{kg } O_2}{\text{kg } NO_3^-} \quad \text{Kg de DQO eliminados por cada Kg de nitrato introducido en el sistema}$$

#### 5.1.3.2 Relación DQO/CH<sub>3</sub>COOH

La reacción producida entre el ácido acético y el oxígeno es la siguiente:



$$1 \text{ g } CH_3COOH \cdot \frac{1 \text{ mol } CH_3COOH}{60 \text{ g } CH_3COOH} \cdot \frac{2 \text{ mol } O_2}{1 \text{ mol } CH_3COOH} \cdot \frac{32 \text{ g } O_2}{1 \text{ mol } O_2} = 1.06 \text{ g } O_2 \rightarrow 1.06 \text{ g DQO/g } CH_3COOH$$

DQO (Kg O<sub>2</sub>) eliminada estequiométricamente:

$$0.98 \frac{\text{kg } CH_3COOH}{h} \cdot \frac{1.06 \text{ kg } O_2}{1 \text{ kg } CH_3COOH} = 1.04 \frac{\text{kg } O_2}{h} \quad \text{Kg de DQO eliminados estequiométricamente del sistema por hora}$$

$$\left( 13.00 \frac{\text{kg } O}{\text{dia}} \right) / \left( 150 \frac{m^3}{\text{dia}} \right) = \left[ 0.087 \frac{\text{mg } O_2}{m^3} \right]$$

$$\frac{13.00 \frac{\text{kg } O_2}{\text{dia}}}{15.08 \frac{\text{kg } NO_3^-}{\text{dia}}} = 0.86 \frac{\text{kg } O_2}{\text{kg } NO_3^-} \quad \text{Kg de DQO eliminados por cada Kg de nitrato introducido en el sistema}$$

En la siguiente tabla se exponen los resultados obtenidos de los Kg de DQO a eliminar del sistema según si la fuente de carbono es metanol o ácido acético.

Tabla 11: Cantidad de DQO eliminada en función de la fuente de carbono externa

Fuente de carbono	Kg DQO eliminada por Kg de nitrato eliminado
CH <sub>3</sub> OH (Metanol)	0.84
CH <sub>3</sub> COOH (Ácido acético)	0.86

En la tabla anterior se observa que la cantidad de DQO eliminada para ambos casos es muy similar. Se elimina algo menos de DQO por kilo de nitrato eliminado del sistema con el metanol que con el ácido acético, lo que concluye en un dimensionado de los filtros para eliminación de DQO un poco mayor en el caso de utilizar metanol como fuente de carbono externa y fácilmente asimilable.

Este incremento del dimensionado de los filtros, es poco significativo si se tiene en cuenta la relación existente entre la cantidad de sustrato consumida por los microorganismos por gramo de nitrato eliminado. En el caso del metanol, la dosis es de 0.56 g  $\text{CH}_3\text{OH}/\text{NO}_3^-$  mientras que en el caso del ácido acético la relación es de 0.82 g  $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{NO}_3^-$ .

En este caso se propone la utilización de metanol, en tanto que su consumo es significativamente menor al del ácido acético y su precio por kilo también (Quimidroga, 2010). Además de ser un producto de mejor aceptación por el personal encargado de su manipulación en planta.

Con respecto a los requisitos de carbono orgánico para llevar a término el proceso heterotróficamente y teniendo en cuenta que se ha adoptado la dosificación de metanol como fuente de carbono, se aprecia, en los cálculos realizados anteriormente, que son necesarios 0,56 gramos de  $\text{CH}_3\text{OH}$  por gramo de nitrato presente en el agua.

Si bien, este requerimiento es altamente dependiente del proceso adoptado, de su operación y de la fuente de carbono orgánico (donador de electrones), se ha estimado un como factor de seguridad de 3 debido a la experiencia de otras instalaciones. De este modo la dosis de  $\text{CH}_3\text{OH}$  necesaria a dosificar es de 1.68 Kg por kilogramos de  $\text{NO}_3^-$  a eliminar, o lo que es lo mismo 2.016 Kg de metanol por hora.

$$1.68 \frac{\text{kg CH}_3\text{OH}}{\text{kg NO}_3^-} \cdot 1.20 \frac{\text{kg NO}_3^-}{h} = \left[ 2.016 \frac{\text{kg CH}_3\text{OH}}{h} \right]$$

Si se considera que la solución comercial de metanol es al 95% y su densidad es de 0,802 Kg/l la dosis necesaria de producto comercial es la siguiente:

$$2.016 \frac{\text{kg CH}_3\text{OH}}{h} \cdot \frac{1.00 \text{ kg CH}_3\text{OH}_{\text{comercial}}}{0.95 \text{ kg CH}_3\text{OH}_{\text{pur}}} \cdot \frac{1 \text{ l CH}_3\text{OH}_{\text{comercial}}}{0.802 \text{ kg CH}_3\text{OH}_{\text{comercial}}} = \left[ 2.646 \frac{\text{l CH}_3\text{OH}_{\text{comercial}}}{h} \right]$$

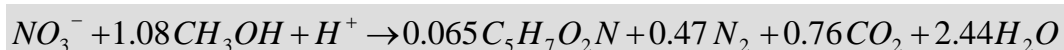
Resumiendo, se obtiene que, la adición de 1.68 Kg de CH<sub>3</sub>OH por kilogramos de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> a eliminar, comporta un requerimiento de producto químico de 25.20 Kg/día. Si se tiene en cuenta que la solución comercial es al 95% y que la densidad del metanol a esta concentración es de 0.802 Kg CH<sub>3</sub>OH/l, tenemos un consumo diario de 33.08 l de metanol al 95% al día (2.65 l CH<sub>3</sub>OH/h). Esto hace que sea necesario disponer de un depósito de almacenamiento 1,00 m<sup>3</sup> por tal de tener una independencia de un mes (30 días) aproximadamente.

Se propone que este depósito sea directamente el recipiente de la casa comercial que suministre el producto (contenedor jaula), de este modo y teniendo en cuenta los aspectos de seguridad laboral, se evitan traspasos del reactivo químico de un contenedor a otros y se reducen los costes de inversión.

El sistema de dosificación dispondrá de todos los sistemas de seguridad necesarios, así como del cubeto de retención, sondas de nivel para el producto y válvulas antiretorno para evitar que el producto vuelva al recipiente contenedor del mismo.

La inyección del reactivo se realizará directamente a la tubería de alimentación al biofiltro, por lo que la bomba dosificadora de CH<sub>3</sub>OH tendrá una capacidad de entre 0 y 4 l/h a una contrapresión de 7 bares.

Seguidamente se muestra la reacción y los cálculos realizados para el cálculo de la productividad (forma de expresión de la cantidad de biomasa generada) con metanol como fuente de carbono orgánico, y ésta se aprecia en 0,243 Kg de biomasa por Kg de CH<sub>3</sub>OH consumido.



$$1.08molCH_3OH \cdot \frac{28gCH_3OH}{1molCH_3OH} = 30.24gCH_3OH$$

$$10.065molC_5H_7O_2N \cdot \frac{113gC_5H_7O_2N}{1molC_5H_7O_2N} = 7.34gC_5H_7O_2N \text{ (biomasa)}$$

$$\frac{7.34 \text{ g } C_5H_7O_2N}{30.24 \text{ g } CH_3OH} = [0.243]$$

Seguidamente a la dosificación de metanol se hará una dosificación de ácido fosfórico, también como nutriente esencial para los microorganismos.

Los resultados analíticos disponibles del agua de pozo no aportan información sobre la concentración de fosfatos presentes en el agua, lo que hace necesario realizar analíticas de este parámetro con el fin de conocer cual es la concentración de fósforo presente en el agua.

#### 5.1.3.3 Adición de fósforo

El fósforo es un nutriente esencial que debe satisfacer los requerimientos de la comunidad bacteriana desnitrificante. En caso de que la presencia de fósforo sea insuficiente, hará falta dosificar una fuente externa, en este caso se dosificará ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ) en el agua en la cantidad necesaria.

En una primera estimación se considera una dosificación de aproximadamente 0.61 Kg de  $H_3PO_4$  por kilogramo de  $NO_3^-$  reducido. Esta dosificación viene dada por la experiencia de UFBAF® en el diseño de estos sistemas.

$$0.61 \frac{\text{kg } H_3PO_4}{\text{kg } NO_3^-} \cdot 1.356 \frac{\text{kg } NO_3^-}{h} = \left[ 0.83 \frac{\text{kg } CH_3OH}{h} \right]$$

Esto comporta un requerimiento de 10.34 kilogramos de  $H_3PO_4$  por día. Si la solución comercial esta en una concentración del 75% y sabiendo que la densidad relativa es de 1.575 Kg  $H_3PO_4$ /l, se obtiene un consumo diario de ácido fosfórico de 8.75 l/día (0.70 l  $H_3PO_4$ /h).

$$0.83 \frac{\text{kg } H_3PO_4}{h} \cdot \frac{1.00 \text{ kg } H_3PO_{4\text{comercial}}}{0.75 \text{ kg } H_3PO_{4\text{puro}}} \cdot \frac{1 \text{ l } H_3PO_{4\text{comercial}}}{1.575 \text{ kg } H_3PO_{4\text{comercial}}} = \left[ 0.70 \frac{\text{l } H_3PO_{4\text{comercial}}}{h} \right]$$

De esta manera el depósito de almacenamiento, con el fin de tener la misma autonomía que el depósito de metanol y así facilitar las tareas de mantenimiento debe tener un volumen de unos 300 litros aproximadamente. Del mismo modo, el sistema de dosificación deberá

disponer de todos los sistemas de seguridad, el cubeto de retención, y los accesorios necesarios para el correcto funcionamiento de la bomba dosificadora.

Todas las dosificaciones deberán ajustarse en fase de puesta en funcionamiento de la instalación.

En la tabla 12 se muestra un resumen de los resultados obtenidos en cuanto a los requerimientos de nutrientes para el correcto funcionamiento del sistema.

Tabla 12: Requerimientos de nutrientes en el sistema

Requerimientos de nutrientes		
<i>Fuente de Carbono</i>		
<b>Producto</b>	<b>Metanol</b>	
Dosis	1,68	mg Metanol/mg NO <sub>3</sub> - eliminado
<b>Consumo</b>	<b>2,016</b>	<b>Kg Metanol/h</b>
	<b>25,20</b>	<b>Kg Metanol/d</b>
Concentración de la solución comercial	95	%
<b>Consumo de la solución comercial</b>	<b>2,65</b>	<b>l/h</b>
	<b>33,08</b>	<b>l/d</b>
<b>Dosi eliminada estequiométricamente</b>	<b>0,56</b>	mg Metanol/mg NO <sub>3</sub> -
	<b>0,67</b>	<b>Kg Metanol/h</b>
<i>Fuente de Fósforo</i>		
<b>Producto</b>	<b>Ácido fosfórico</b>	
Dosis	0,61	mg H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> /mg NO <sub>3</sub> - eliminado
<b>Consumo</b>	<b>0,83</b>	<b>Kg H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>/h</b>
	<b>10,34</b>	<b>Kg H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>/d</b>
Concentración de la solución comercial	75	%
<b>Consumo de la solución comercial</b>	<b>0,70</b>	<b>l/h</b>
	<b>8,75</b>	<b>l/d</b>

#### 5.1.4 Tratamiento: biofiltración

Posterior al acondicionamiento del agua, se dispone de una bomba centrífuga horizontal de un caudal de 12 m<sup>3</sup>/h para llevar el agua hasta los filtros de eliminación de nitratos (Biofiltros DN).

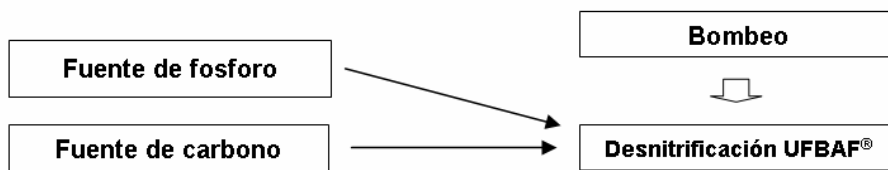


Figura 18: Esquema del proceso de tratamiento visto hasta el momento

Los parámetros de control básicos a tener en cuenta son:

- La concentración de oxígeno disuelto en el agua que no deberá entorpecer la actividad de los microorganismos ya que la desnitrificación es un proceso anóxico.
- El nivel de pH óptimo es de 7 a 8,5.
- La temperatura de trabajo mínima y máxima puede llegar a ser de 10-25°C.
- La relación entre la fuente de carbono, nitrato y fósforo.

### Tipo de funcionamiento

El funcionamiento de los equipos de biofiltración UFBAF®, es en régimen semicontinuo, lo que significa que se mantienen en funcionamiento hasta que la calidad del efluente no es la correcta o hasta que se produce una pérdida de carga excesiva en el filtro (se considera que el filtro debe realizar una limpieza cuando la diferencia de presión entre la entrada y la salida es de 1 bar o más). Cuando se alcanza este punto, se detiene el filtro y se procede a su lavado para eliminar los sólidos acumulados.

Los biofiltros, están comandados de manera automática mediante válvulas de mariposa neumáticas que regulan el correcto funcionamiento y los ciclos de lavado y limpieza de los mismos.

### Sentido del flujo

El flujo del agua por el biofiltro es ascendente, es decir, el agua fluye de abajo hacia arriba a través del lecho filtrante, para facilitar la eliminación de nitrógeno gas hacia la atmósfera. El lavado se produce en el mismo sentido que el funcionamiento normal del filtro, lo que hace que el lavado sea a co-corriente.

Se han dispuesto dos unidades de biofiltración, pudiendo la planta, suministrar la mitad del caudal de agua tratada si uno de los dos filtros se encuentra fase de limpieza o parada

técnica. Además las dimensiones de los mismos se verán reducidas facilitando así el transporte y mejorando el impacto visual.



Figura 19: Fotografía de unos biofiltros de la tecnología UFBAF®  
(cortesía de Air Water Technologies)

A continuación se detallan los criterios básicos tenidos en cuenta para el dimensionado de las unidades de biofiltración. Éste puede realizarse en base a la carga másica o a la carga hidráulica. El cálculo se realizará de las dos formas adoptando aquella que de un volumen mayor de biofiltración (situación más desfavorable). Además se indican los parámetros de control básicos.

Tabla 13: Parámetros operacionales iniciales

Parámetros Operacionales Iniciales		
<i>Parámetros de diseño</i>		
Velocidad de filtración o Carga hidráulica	<10	m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·h)
Carga de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> aplicada	0,4 a 1,8	Kg NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /(m <sup>3</sup> ·d)
Carga hidráulica de lavado	20	m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·h)
Sentido de filtración	Ascendente	
Fuente de carbono	Metanol	
Carga de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> aplicada de cálculo	1,8	Kg NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /(m <sup>3</sup> ·d)
	0,144	Kg NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /(m <sup>3</sup> ·h)
Tipo de lavado	A co-corriente	
Frecuencia del lavado	1	día-1
<i>Parámetros de Control Básicos</i>		
Nivel de pH óptimo	7 a 9	
Temperatura de trabajo mínima	10	°C

La **carga másica** ( $C_m$ ), se define como la relación de kilogramos de nitratos introducidos por día en el sistema y por metro cúbico de agua aportada.

$$C_m = \frac{kg \text{ de } NO_3^- / día}{m^3}$$

La **carga hidráulica** ( $Ch$ ) es el volumen de agua aplicado por unidad de superficie en un determinado período de tiempo (también es denominada velocidad de filtración).

$$C_m = \frac{m^3 / día}{m^2}$$

#### 5.1.4.1 Cálculo en base a la carga másica

El parámetro de carga másica, según el Metcalf & Eddy (Tabla 9-20) para un “upflow reactor” (biofilter), varía entre  $0.8 (10^\circ C)$  a  $1.8 (20^\circ C) KgN / m^3 \cdot d$ .

Carga de nitratos aplicada para el cálculo (dada por UFBAF®), es de  $1.8 Kg NO_3^- / m^3 día$  o lo que es lo mismo  $0.4 Kg N / m^3 día$  (suponiendo un funcionamiento de  $12.5 h/día$ ).

El valor de carga másica aplicado es un valor conservador lo que implica un dimensionado mayor del filtro.

- Altura de lecho filtrante adoptada:  $2.5 m$  (parámetro fijado)

$$\frac{1.8 \frac{kg NO_3^-}{m^3 \cdot día}}{12.5 \frac{h}{día}} = 0.144 \frac{kg NO_3^-}{m^3 \cdot h}$$

$$\text{Volumen de filtración necesario: } 1.20 \frac{kg NO_3^-}{h} \Bigg/ 0.144 \frac{kg NO_3^-}{m^3 \cdot h} = [8.33 m^3]$$

$$8.33 m^3 / 2 \text{ unidades} = \underline{4.16 m^3 / \text{unidad de filtración}}$$

$$\text{Área del filtro: } 4.16 m^3 / 2.5 m = 1.66 m^2$$

**Volumen TOTAL de filtración:  $8.33 m^3$**



#### 5.1.4.2 En base a la carga hidráulica

El parámetro de carga hidráulica, según el Metcalf & Eddy (Tabla 9-20) para un “upflow reactor” (biofilter), varía entre:  $30_{(10^{\circ}\text{C})}$  a  $120_{(20^{\circ}\text{C})} \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$ .

- Altura de lecho filtrante adoptada: 2.5 m (parámetro fijado)
- Carga hidráulica aplicada para el cálculo (velocidad de filtración):  $1,91 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$

$$1,91 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} / 12 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = [6,28 \text{ m}^2] \text{ área total de filtración}$$

**Volumen TOTAL de filtración:  $6,28 \text{ m}^2 \cdot 2,5 \text{ m} = [15,70 \text{ m}^3]$ .**

Como el dimensionado de la instalación debe hacerse en las condiciones menos favorables se tomará el diseño de los biofiltros en base a la carga hidráulica, que da un volumen total necesario de filtración de  $15,7 \text{ m}^3$

Teniendo en cuenta lo anteriormente comentado se dispondrá de dos unidades de biofiltración, cada de las cuales funcionará con un caudal de entrada, la mitad del caudal necesarios a tratar, es decir  $6 \text{ m}^3/\text{h}$ .

En la tabla siguiente se presenta un resumen del dimensionado adoptado.

Tabla 14: Resumen de los parámetros de dimensionado de los biofiltros DN

Dimensionado BIOFILTROS DN		
<i>En base a la carga de <math>\text{N-NO}_3^-</math>:</i>		
Altura del filtro	2,50	m
Volumen de filtración	8,33	$\text{m}^3$
Área del Biofiltro	3,33	$\text{m}^2$
<i>En base a la carga hidráulica:</i>		
Altura del filtro	2,50	m
Volumen de filtración	15,70	$\text{m}^3$
Área del Biofiltro	6,28	$\text{m}^2$
Área de Biofiltro resultante unitario	3,14	$\text{m}^2/\text{ut}$
<b>Díámetro de Biofiltro adoptado</b>	<b>2</b>	<b>m</b>
<b>Altura del biofiltro resultante</b>	<b>2,50</b>	<b>m</b>
Número de Biofiltros necesarios	2,00	ut
<b>Volumen TOTAL de Biofilitre adoptado</b>	<b>15,70</b>	<b><math>\text{m}^3</math></b>

A continuación se calculan los parámetros funcionales que resultan del diseño adoptado y que pueden diferir de los cogidos inicialmente.

$$\text{Carga hidráulica o Velocidad de filtración resultante: } 12 \frac{m^3}{h} / 6.3 m^2 = \left[ 1.91 \frac{m^3}{m^2 \cdot h} \right]$$

$$\text{Carga másica resultante: } 1.20 \frac{kgNO_3^- \text{ a eliminar}}{h} / 15.70 m^3 = 0.076 \frac{kgNO_3^- \text{ a eliminar}}{m^3 \cdot h}$$

$$\text{Tiempo de retención resultante: } 15.70 m^3 / 12 m^3/h = 1.31 h \cdot \frac{60 \text{ min}}{1 h} = [78.5 \text{ min}]$$

$$\text{Porcentaje de agua de lavado resultante: } \left( \frac{25.13 \frac{m^3}{dia}}{150 \frac{m^3}{dia}} \right) \times 100 = [17\%]$$

Seguidamente en la tabla 15, se muestran, a modo de resumen, los parámetros funcionales de diseño anteriormente calculados:

Tabla 15: Resumen de los parámetros funcionales resultantes del diseño adoptado

Parámetros funcionales resultantes		
Velocidad de filtración resultante	1,91	m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·h)
	23,87	m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·d)
Carga másica a eliminar resultante	0,08	Kg/(m <sup>3</sup> ·h)
	0,95	Kg/(m <sup>3</sup> ·d)
Tiempo de retención resultante	1,31	h
	78,5	min
Porcentaje de agua de lavado resultante	17%	

Debido a que el sistema de eliminación de nitratos puede no tener el rendimiento esperado, bien sea por posibles motivos de ineficiencia puntuales del proceso biológico, bien por falta de suministro eléctrico, o bien por otras causas, se propone disponer de un circuito de recirculación para retornar el agua al depósito de entrada.

Posterior a los filtros de desnitrificación, se dispone de un medidor de nitratos en continuo, con el fin de controlar la concentración de nitratos resultante y así poder detectar el correcto funcionamiento del sistema. Si la concentración de nitratos medida en el agua esta por encima del valor consigna (30 mg/l) se iniciará una recirculación del agua tratada hacia el depósito inicial. Previamente al inicio de la recirculación se parará la bomba de extracción del pozo y se iniciará la recirculación del agua al depósito de entrada, por gravedad, sin necesidad de bomba de impulsión.

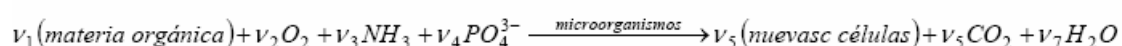
Una vez la medida de la concentración de nitratos en el agua tratada esté por debajo del valor de consigna, se parará la recirculación y se retomará la extracción del agua del pozo, y retornará a su régimen de funcionamiento normal.

#### 5.1.5 Filtro de eliminación de materia orgánica (BIOFILTRO C)

La **DBO o Demanda Biológica de Oxígeno** es la cantidad de oxígeno que necesitan los microorganismos para degradar la materia orgánica biodegradable existente en un agua residual. Es por tanto una medida del componente orgánico que puede ser degradado mediante procesos biológicos. Se puede decir por tanto que la DBO representa la cantidad de materia orgánica biodegradable y la DQO representa tanto la materia orgánica biodegradable como la no biodegradable. En el caso de Sant Climent se hablará de DQO como la cantidad de materia orgánica presente en el agua.

Debido a la adición de metanol como fuente de carbono externa, se adiciona al agua una carga de DQO a razón de 1.5 miligramos de DQO por miligramo de CH<sub>3</sub>OH (ver apartado 5.1.3.1.). Esta DQO puede comportar el no cumplimiento de la calidad del agua de consumo humano requerida por el Real Decreto 140/2003, por lo que se ha previsto incorporar un biofiltro por la eliminación de dicha materia orgánica.

Como se ha comentado anteriormente, el rol de los microorganismos en procesos aerobios es oxidar la materia orgánica carbonosa disuelta en productos simples y en nuevas células denominadas biomasa, como se representa en la siguiente ecuación.



Se puede observar que la presencia de oxígeno, como aceptor de electrones, necesaria para realizar la eliminación biológica del sustrato, lo que concluye que la eliminación de materia orgánica es un proceso aerobio.

Esta necesidad de aportar oxígeno al agua, se consigue mediante un depósito abierto previo a la alimentación del biofiltro C y que dispondrá de un sistema aireación mediante difusores de membrana para favorecer la oxigenación del agua y la agitación. Con esto se conseguirá disponer de una concentración de  $O_2$  disuelto suficiente como para que se pueda dar una mínima actividad bacteriana heterótrofa aeróbica en el filtro que permita eliminar los posibles restos de  $CH_3OH$  que puedan permanecer en el agua.

El funcionamiento habitual de este biofiltro será con flujo descendente, haciendo el lavado con flujo ascendente (a contra corriente).

Tabla 16: Características técnicas del depósito de aireación

Reactor de contacto $O_2$	
Volumen útil	15 m <sup>3</sup>
Diámetro	2,00 m
Superficie	3,14 m <sup>2</sup>
Altura útil (m.c.a.)	4,77 m
Altura total	5 m
Volumen total	15,7 m <sup>3</sup>
Tiempo de contacto	75 min.

A continuación se presentan los cálculos de kilogramos de DQO aportados al sistema mediante la adición del metanol como la fuente de carbono externa, así como los kilogramos de DQO que deben eliminarse del sistema:

DQO aportada estequiométricamente:

$$2.016 \frac{kg CH_3OH}{h} \cdot \frac{1.5 kg DQO}{kg CH_3OH} = 3.024 \frac{kg DQO}{h} \left( 3.024 \frac{kg O_2}{h} \right)$$

DQO eliminada estequiométricamente:

A la hora de calcular la DQO consumida estequiométricamente, la relación que se deberá utilizar es:  $0.56 \frac{g CH_3OH}{g NO_3^-}$  lo que da un consumo de oxígeno de:

$$0.56 \frac{\text{kg CH}_3\text{OH}}{\text{kg NO}_3^-} \cdot 1.20 \frac{\text{kg NO}_3^-}{h} = 0.672 \frac{\text{kg CH}_3\text{OH}}{h}$$

$$0.672 \frac{\text{kg CH}_3\text{OH}}{h} \cdot \frac{1.5 \text{ kg DQO}}{\text{kg CH}_3\text{OH}} = 1.008 \frac{\text{kg DQO}}{h} \left( 1.008 \frac{\text{kg O}_2}{h} \right)$$

DQO a eliminar mediante biofiltros de eliminación de DQO (Biofiltros C):

$$3.024 \frac{\text{kg DQO}}{h} - 1.008 \frac{\text{kg DQO}}{h} = 2.016 \frac{\text{kg DQO}}{h} \left( 2.016 \frac{\text{kg O}_2}{h} \right)$$

En la siguiente tabla se muestra el resumen de los datos obtenidos en los cálculos de DQO aportada al sistema, DQO eliminada estequiométricamente y DQO a eliminar mediante los biofiltros C.

Tabla 17: Resumen de los cálculos de DQO

Eliminación de DQO		
Relación DQO/CH <sub>3</sub> OH	1,50	Kg DQO/Kg metanol
<b>DQO aportada</b>	<b>3,02</b>	<b>Kg DQO/h</b>
	<b>2,52</b>	<b>Kg DQO/Kg NO<sub>3</sub>- a eliminar</b>
<b>DQO eliminada estequiométricamente</b>	<b>1.01</b>	<b>Kg DQO/h</b>
<b>DQO resultante a eliminar</b>	<b>2.02</b>	<b>Kg DQO/h</b>

A continuación se detallan los criterios básicos para el dimensionado de las unidades de biofiltración C. del mismo modo, y siguiendo el mismo criterio que con los biofiltros DN, el cálculo se realiza en base a la carga másica o a la carga hidráulica. El cálculo se realizará de las dos formas adoptando aquella que nos de un volumen mayor de biofiltración.

Consultando el Metcalf and Eddy (4ª edición, pag. 958) los valores de carga hidráulica y carga másica, se encuentran entre los rangos de:

- Carga másica: 3.5 a 4.5 Kg DBO<sub>5</sub>/m<sup>3</sup>.d
- Carga hidráulica: 2.4 a 4.8 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d

Tabla 18: Descripción de los parámetros operacionales iniciales

Parámetros Operacionales Iniciales		
<b>Parámetros de diseño</b>		
Velocidad de filtración o Carga hidráulica	2,4 a 4,8	m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·h)
<b>Carga hidráulica adoptada</b>	<b>3,5</b>	<b>m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)</b>
Carga másica	3,5 a 4,5	Kg DQO(m <sup>3</sup> ·d)
<b>Carga másica adoptada</b>	<b>4,5</b>	<b>Kg DQO(m<sup>3</sup>·d)</b>
Carga hidráulica de lavado	20	m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·h)

En la tabla 18 se muestran los parámetros de diseño adoptados:

#### 5.1.5.1 Cálculo en base a la carga másica

- Altura del lecho filtrante adoptada: 2 m (parámetro fijado)
- Carga de DQO aplicada para cálculo (dada por UFBAF): 4.5 Kg DQO/m<sup>3</sup>.día
- Relación DBO<sub>5</sub>/DQO estimada = 0.64 se considera que prácticamente es al máxima posible (0.66 con glucosa), ya que el metanol es muy biodegradable.

$$\text{Volumen de filtración necesario: } \frac{2.02 \frac{\text{kgO}_2}{h} \times 0.64 \frac{\text{DBO}_5}{\text{DQO}}}{4.5 \frac{\text{kgDQO}}{\text{m}^3 \cdot \text{día}} \bigg/ 12.5 \frac{h}{\text{día}}} = 3.59 \text{ m}^3$$

$$\text{Altura del filtro: } 3.59 \text{ m}^3 / 2 \text{ m} = [1.79 \text{ m}]$$

**Volumen TOTAL filtración: 3.59 m<sup>3</sup>**

#### 5.1.5.2 Cálculo en base a la carga hidráulica

- Altura del lecho filtrante adoptada: 2 m (parámetro fijado)
- Carga hidráulica aplicada para el cálculo (velocidad de filtración) (dada por UFBAF): 3,5 m<sup>3</sup>/h·m<sup>2</sup>

$$12 \frac{\text{m}^3}{h} \bigg/ 3.5 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot h} = [3.43 \text{ m}^2]$$

$$\text{Volumen de filtración necesario: } 3.43 \text{ m}^2 \cdot 2 \text{ m} = [6.85 \text{ m}^3]$$

**Volumen TOTAL filtración: 6.85 m<sup>3</sup>**

Como el dimensionado de la instalación debe hacerse en las condiciones menos favorables se tomará el diseño de los biofiltros en base a la carga hidráulica, lo que da un volumen necesario de  $6.85 \text{ m}^3$

Si fijamos la altura en 2 metros da un diámetro de filtro de 1.49 m, como es más fácil variar la altura que el diámetro se fija un diámetro de 1 metro y se calcula la altura del lecho filtrante.

Tabla 19: Resumen de los parámetros de dimensionado de los biofiltros C

Dimensionado biofiltro C		
<i>En base a la carga de N-NO3-:</i>		
Altura del filtro	2,00	m
Volumen de filtración necesario	3,58	$\text{m}^3$
Área del biofiltro	1,79	$\text{m}^2$
<i>En base a la carga hidráulica:</i>		
Altura del filtro	2,00	m
Volumen de filtro	6,85	$\text{m}^3$
Área del biofiltro necesaria	3,43	$\text{m}^2$
Área de biofiltro resultante unitaria	1,71	$\text{m}^2/\text{ut}$
<b>Diámetro de biofiltro adoptado</b>	<b>1,00</b>	<b>m</b>
<b>Altura del filtro resultante</b>	<b>4,37</b>	<b>m</b>
Número de de biofiltros adoptado	2,00	ut
<b>Volumen TOTAL de biofiltro</b>	<b>6,85</b>	<b><math>\text{m}^3</math></b>

En la tabla 19 de muestran los parámetros utilizados y calculados para el dimensionado de los filtros.

A continuación se calculan los parámetros funcionales que resultan del diseño adoptado y que pueden diferir de los cogidos inicialmente.

$$\text{Velocidad de filtración resultante: } 12 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} / 3.43 \text{ m}^2 = \left[ 3.50 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \right]$$

$$\text{Carga másica resultante: } 2.02 \frac{\text{kgNO}_3^- \text{ a eliminar}}{\text{h}} / 6.85 \text{ m}^3 = 0.29 \frac{\text{kgNO}_3^- \text{ a eliminar}}{\text{m}^3 \cdot \text{h}}$$

$$\text{Tiempo de retención resultante: } 6.85 \text{ m}^3 / 12 \text{ m}^3/\text{h} = 0.57 \text{ h} \cdot \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} = [34.2 \text{ min}]$$

$$\text{Porcentaje de agua de lavado resultante: } \left( \frac{16.0 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}}}{150 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}}} \right) \times 100 = [11\%]$$

Seguidamente en la tabla 20, se muestran, a modo de resumen, los parámetros funcionales de diseño anteriormente calculados:

Tabla 20: Resumen de los parámetros funcionales resultantes del diseño adoptado

Parámetros funcionales resultantes		
Velocidad de filtración resultante	<b>3,50</b>	<b>m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)</b>
	43,75	m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·d)
Carga másica a eliminar resultante	<b>0,29</b>	<b>Kg/(m<sup>3</sup>·h)</b>
	3,62	Kg/(m <sup>3</sup> ·d)
Tiempo de retención resultante	<b>0,57</b>	<b>h</b>
	34,29	min
Porcentaje de agua de lavado resultante	<b>11%</b>	

A la salida del filtro de eliminación de DQO se dispone de un analizador de Carbono Orgánico Total (TOC) en continuo. Una vez la planta esté en funcionamiento se deberá realizar la curva que relacionará la medida de TOC con los miligramos de O<sub>2</sub> por litro de oxidabilidad al permanganato (valor especificado en el RD 140/2003), para asegurar la calidad del agua de consumo humano.

#### 5.1.6 Post-tratamiento: filtración de afino

El agua a la salida de los filtros de eliminación de DQO se someterá a una filtración mediante un filtro dual (sílex, antracita) con la finalidad de eliminar todos los coloides y partículas en suspensión presente en el agua. El objetivo de este filtro es reducir la turbidez del agua y la retención de microalgas y partículas de medida bacteriana o superior.

El agua, circulará a través del filtro dual sílex/antracita de Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio (P.R.F.V.) de forma descendente.



En la figura 20 se muestra un esquema del funcionamiento de un filtro de arena.

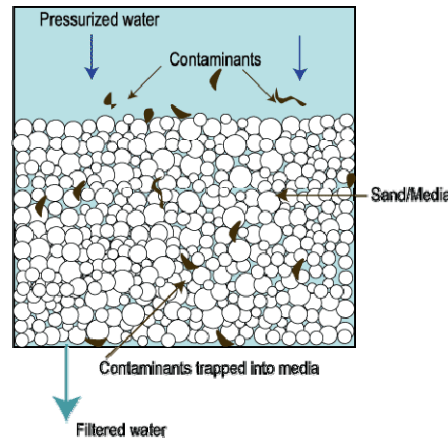


Figura 20: Esquema del funcionamiento de un filtro de arena

#### 5.1.6.1 Sílice

La arena silíceá (sílex) es un compuesto resultante de la combinación de la **sílice** con el oxígeno. Su composición molecular es  $\text{SiO}_2$ .

Sus usos industriales derivan de sus importantes propiedades físicas y químicas especialmente de su dureza, resistencia química, alto punto de fusión, y transparencia. Sus arenas son comúnmente utilizadas como lecho filtrante para depuración y potabilización de las aguas (para la retención de los flóculos de tamaños muy pequeños que no son separados por decantación).

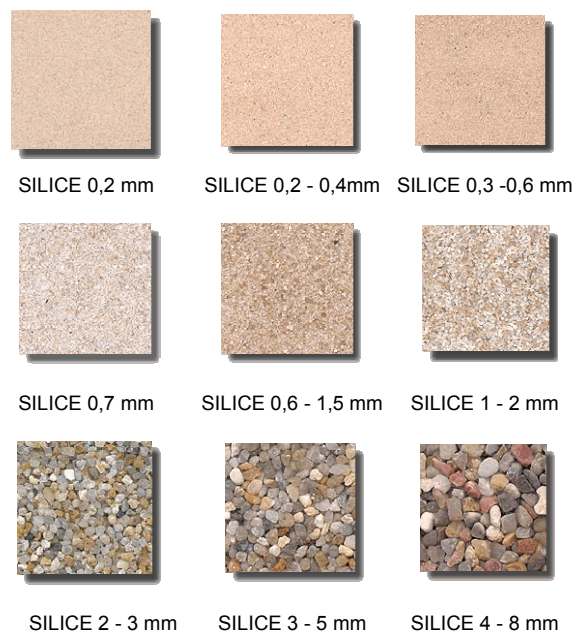


Figura 21: Fotografías de las diferentes granulometrías de la sílice

ANÁLISIS QUÍMICO:		CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	
SiO <sub>2</sub> :	> 98,00 %	Humedad:	0-1 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :	< 0,80 %	Densidad aparente:	1,4 <sup>a</sup> 1,6 gr/cc
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :	< 0,05 %	Densidad real:	2,4 <sup>a</sup> 2,6 gr/cc
CaO:	< 0,10 %	Nº. Fineza (A.F.S.):	<input type="text"/>
MgO:	< 0,05 %	Temperatura de sinterización:	1.540 °C
Na <sub>2</sub> O:	< 0,06 %	Valor del Ph:	7 (para una suspensión acuosa al 20%)
K <sub>2</sub> O:	< 0,40 %		
P-fuego:	< 1,01 %		

Tabla 21: Análisis químico y características físicas de la sílice

#### 5.1.6.2 Antracita

La Antracita es el mineral de carbón que tiene la mayor cantidad de carbón puro, supera fácilmente el 90%, tiene un poder calórico de entre 23 y 33 MJ/Kg y tiene su origen en el proceso denominado carbonificación que no es otra cosa que la transformación de los materiales orgánicos por migración paulatina a temperaturas moderadas y alta presión en turbas y carbones, gracias a la deshidrogenación incompleta.

Su densidad varía entre 1,2 y 1,8 g/cm<sup>3</sup>.

Suele ser usado en la fundición de los metales especialmente el hierro mezclado con carbones bituminosos, se la puede encontrar también como filtro para agua.



Figura 22: Fotografía de una piedra de antracita

Se diseña un filtro de 12 m<sup>3</sup>/h de caudal de funcionamiento. El proceso de lavado del filtro se inicia por aumento de presión o por tiempo, aunque también se puede forzar el lavado manualmente. Se prevé el lavado del filtro únicamente con agua.

El filtro incluye un filtro de seguridad de P.R.F.V. con un caudal de diseño máximo de 12 m<sup>3</sup>/h para evitar la pérdida de arena, en el supuesto de que exista un mal funcionamiento del mismo.

Para el correcto funcionamiento del filtro dual, el agua de alimentación ha de llegar a una presión entre 2 y 3 bares.

En una primera estimación se propone la instalación de un filtro dual de 2,30 m de altura de material filtrante y 1,26 m de diámetro. Su diseño y dimensionado no ha sido objeto de este proyecto por considerar que este tipo de filtros son muy estándares y que no disponen de un contenido técnico relevante, únicamente dependen del caudal de agua a tratar y de la velocidad de filtración.

#### **5.1.7 Lavado de filtros**

El lavado de los biofiltros se realizará mediante dos bombas de 32 m<sup>3</sup>/h. Así, se dispondrá de una capacidad suficiente para hacer frente a los casi 63 m<sup>3</sup>/h necesarios para hacer el lavado de cada una de las unidades del biofiltración.

A continuación se enumeran los pasos a seguir para realizar el proceso de lavado que tendrá lugar en cada una de las unidades de filtración y biofiltración del sistema. Este proceso será el mismo para cada filtro variando únicamente el caudal de lavado, que irá fijado por el caudal de agua a tratar y por el tipo de lavado.

Existen dos tipos de lavado para los rellenos de los filtros, el lavado solo con agua donde el caudal de agua necesario ha de ser entre 4 y 5 veces el caudal de agua que trata el equipo, y el lavado de agua y aire, donde el caudal de agua acostumbra a ser el doble del caudal de agua de entrada y el caudal de aire una cinco veces el caudal de agua a tratar también. En este caso el lavado se realiza con agua y aire por considerarse más eficaz.

Los pasos a seguir son los siguientes:

- Cierre de la alimentación a la unidad de filtración a lavar.
- Anulación, en caso necesario, de cualquier proceso de recirculación que se estuviera produciendo.
- Apertura de la impulsión del agua de lavado correspondiente a la unidad de filtración a lavar.
- Puesta en marcha de las bombas de lavado necesarias para suministrar el caudal de agua requerido durante el tiempo establecido. Una de las dos bombas dispondrá de variador de frecuencia para poder ajustar el caudal de lavado.

- El agua de lavado puede verterse directamente a colector o devolverse directamente al pozo de Sant Climent. (Este es un punto especialmente importante sobre el que hará falta tomar una decisión consensuada en la fase de redacción del proyecto constructivo.)
- Un vez finalizado el proceso de lavado se pararán las bombas y se cerrará la salida del agua de lavado abriéndose la entrada de agua en régimen normal de funcionamiento.

Una vez el depósito del agua de lavado haya recuperado un volumen mínimo de 20 m<sup>3</sup> (controlado por nivel) se podrá iniciar el proceso de limpieza de otra unidad.

#### 5.1.7.1 Lavado biofiltros DN

Los parámetros a continuación expuestos se han fijado en base a la experiencia.

- Velocidad de lavado: 20 m<sup>3</sup>/ (m<sup>2</sup>·h)
- Frecuencia: 1 vez al día
- Tiempo de lavado: 12 minutos

$$\text{Caudal de lavado por biofiltro DN: } \left( \frac{6.3 \text{ m}^2}{2 \text{ ud}} \right) \times 20 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} = 62.83 \frac{\text{m}^3}{\text{h} \cdot \text{ud}}$$

Volumen necesario de agua de lavado al día:

$$62.83 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \cdot 12 \text{ min} = \left[ 12.57 \frac{\text{m}^3}{\text{dia} \cdot \text{ud}} \right] \times 2 \text{ filtros} = \left[ 25.13 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}} \right]$$

Tabla 22: Resumen de los parámetros de lavado del biofiltro DN

Lavado biofiltro eliminación de nitratos		
Velocidad	20	m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·h)
Caudal	62,83	m <sup>3</sup> /(h·ut)
Frecuencia	1	vez/día
Duración	12	min
Volumen de agua de lavado necesario	12,57	m <sup>3</sup> /(ut·d)
	25,13	m <sup>3</sup> /día

En la tabla 22 se han mostrado los parámetros más importantes a tener en cuenta para el lavado de los biofiltros de desnitrificación.

#### 5.1.7.2 Lavado biofiltros C

- Velocidad de lavado:  $35 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})^2$
- Frecuencia: 1 vez al día
- Tiempo de lavado: 8 minutos

$$\text{Caudal de lavado por filtro: } \left( \frac{3.43 \text{ m}^2}{2 \text{ ud}} \right) \times 35 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} = 60.02 \frac{\text{m}^3}{\text{h} \cdot \text{ud}}$$

Volumen necesario de agua de lavado al día:

$$60.02 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \cdot 8 \text{ min} = \left[ 8.00 \frac{\text{m}^3}{\text{día} \cdot \text{ud}} \right] \times 2 \text{ filtros} = \left[ 16.00 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right]$$

Tabla 23: Resumen de los parámetros de lavado del biofiltro C

Lavado biofiltro de eliminación de DQO		
Velocidad	35	$\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$
Caudal	60,02	$\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{ud})$
Frecuencia	1	vez/día
Duración	8	min
Volumen de agua de lavado necesario	8,00	$\text{m}^3/(\text{ut} \cdot \text{d})$
	16,00	$\text{m}^3/\text{día}$

En la tabla 23 se han mostrado los parámetros más importantes a tener en cuenta para el lavado de los biofiltros de eliminación de la materia orgánica.

Del dimensionado presentado en las tablas 22 y 23 se observa que el depósito de agua de lavado debe disponer como mínimo de un volumen de  $13 \text{ m}^3$  que es volumen necesario de lavado para un biofiltro DN.

El lavado del filtro de afinado se realizará mediante un procedimiento análogo al anterior con una periodicidad estimada de una vez cada dos días. El control se realizará por pérdida de carga a través de una medida de presión a la entrada y otra a la salida del equipo.

<sup>2</sup> Parámetro fijado para que el caudal de lavado coincida con el calculado en el apartado de los biofiltros de desnitrificación y así optimizar el número de bombas a instalar y los recambios a tener en planta. Esta velocidad asegura un correcto ciclo de lavado.

### 5.1.7.3 Lavado filtro de afino

Los parámetros a continuación expuestos se han fijado en base a la experiencia.

- Velocidad de lavado:  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$
- Frecuencia: 1 vez/ cada 2 días
- Tiempo de lavado: 20 minutos

$$\text{Caudal de lavado: } 1.25 \text{ m}^2 \times 20 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} = 25 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\text{Volumen necesario de agua de lavado al día: } 25 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \cdot 20 \text{ min} = \left[ 8.33 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}} \right]$$

Tabla 24: Resumen de los parámetros de lavado del filtro de afino

Lavado biofiltro de eliminación de DQO		
Velocidad	20	$\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$
<b>Caudal</b>	<b>25,00</b>	<b><math>\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{ut})</math></b>
<b>Frecuencia</b>	<b>0.5</b>	<b>vez/día</b>
<b>Duración</b>	<b>20</b>	<b>min</b>
<b>Volumen de agua de lavado necesario</b>	<b>8,33</b>	<b><math>\text{m}^3/(\text{ut} \cdot \text{d})</math></b>

En la tabla 24 se han mostrado los parámetros más importantes a tener en cuenta para el lavado del filtro dual de afinado.

## 5.2 VERTIDO

El agua de vertido del sistema de biofiltración UFBAF® es el proveniente de los lavados de los filtros, y se considera que su calidad es suficiente como para llevarla a colector.

La Ordenanza Municipal sobre el uso de la Red de alcantarillado sanitario del Núcleo Urbano de Mahón, define los siguientes límites de vertido:

- DBO<sub>5</sub>: 500 ppm
- Sólidos suspendidos: 400 ppm
- DQO: 800 ppm

Para el lavado de los filtros de desnitrificación (biofiltros DN) es necesario un volumen de agua de  $12,57 \text{ m}^3$ , si se tiene en cuenta que hay 2 unidades de filtración y consideramos una frecuencia de lavado de 1 vez/día, se obtienen que el volumen necesario es de  $25,14 \text{ m}^3$ .

Los filtros de eliminación de DQO (biofiltros C) necesitan  $8,00 \text{ m}^3$ , teniendo en cuenta que hay 2 unidades y que el lavado se realizará aproximadamente una vez al día, son necesarios  $16,00 \text{ m}^3$ .

El filtro de afino necesita  $8,33 \text{ m}^3$  de agua para su lavado, y se considera que el lavado se realiza 1 vez cada dos días, es decir, 0.5 veces/día.

El volumen de agua utilizado para todas las unidades de filtración es de  $45,30 \text{ m}^3$  al día. El resumen de estos datos puede verse a continuación en la tabla 25.

Tabla 25: Resumen de los caudales medios de vertido por día

	Volumen de agua de vertido al día
Biofiltros DN	$25,14 \text{ m}^3$
Biofiltros C	$16,00 \text{ m}^3$
Filtro de afino	$4,16 \text{ m}^3$
<b>TOTAL</b>	<b><math>45,30 \text{ m}^3</math></b>

Este volumen de agua de vertido será máximo, ya que rara vez los filtros realizarán el ciclo de lavado el mismo día.

### 5.2.1 Producción de rechazo (fangos)

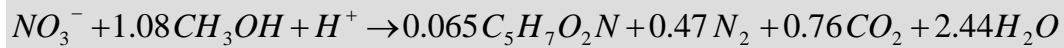
Seguidamente se realizan los cálculos para saber la cantidad y calidad de agua de rechazo (fango) generada en el sistema.

#### 5.2.1.1 Biofiltros DN

Para la eliminación de  $1.200 \text{ Kg NO}_3^-$  por hora se consume la cantidad estequiométrica de  $0,67 \text{ Kg CH}_3\text{OH/h}$ . Sabiendo que la dosis aportada es de  $2,01 \text{ Kg CH}_3\text{OH/h}$  hay un excedente de  $1,34 \text{ Kg CH}_3\text{OH/h}$ , que puede ser consumido por los microorganismos no desnitrificantes, o bien puede que no sea accesible a ningún microorganismo y se escape del proceso.

En este caso se considera que todo el excedente de metanol que sale del biofiltro DN debe ser eliminado posteriormente en un filtro previa oxigenación del agua.

Considerando que la productividad con metanol como fuente de carbono orgánico se aprecia en 0,243 Kg de biomasa/ Kg de CH<sub>3</sub>OH consumido, a continuación, se calculan los kilogramos de biomasa producida por hora:



(Metcalf and Eddy)

$$1.08mol CH_3OH \cdot \frac{28g CH_3OH}{1mol CH_3OH} = 30.24g CH_3OH$$

$$10.065 mol C_5H_7O_2N \cdot \frac{113g C_5H_7O_2N}{1mol C_5H_7O_2N} = 7.34g C_5H_7O_2N \text{ (biomasa)}$$

$$\frac{7.34g C_5H_7O_2N}{30.24g CH_3OH} = [0.243]$$

$$0.243 \frac{kg C_5H_7O_2N (biomasa)}{kg CH_3OH} \cdot 0.67 \frac{kg CH_3OH}{h} = 0.163 \frac{kg biomasa}{h}$$

La biomasa se puede expresar también como sólidos en suspensión volátiles (SSV) y teniendo en cuenta que la relación entre los SSV y los sólidos en suspensión totales (SST), en el caso que nos aplica se considera de 0.85 (en base a la experiencia se sabe que la relación está entre el 80 y el 90%), se obtiene que trabajando 15 horas al día la planta genera 2.445 Kg de SST.

Los cálculos que se muestran a continuación justifican el dato dado anteriormente.

$$0.163 \frac{kg SSV}{h} \cdot \frac{1}{0.85} = 0.192 \frac{kg SST}{h}$$



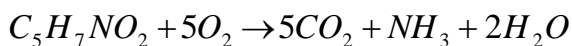
$$\text{Trabajando 15 h/día: } 0.192 \frac{\text{kg SST}}{\text{h}} \cdot 15 \frac{\text{h}}{\text{día}} = 2.876 \frac{\text{kg SST}}{\text{día}}$$

Suponiendo que SST equivalen a la materia en suspensión (MES), se calcula la concentración en el agua de lavado:

Volumen necesario de agua de lavado = 25.13 m<sup>3</sup>

$$\text{Trabajando 15 h/día: } \frac{2.87 \frac{\text{kg MES}}{\text{día}}}{25.12 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}} \times 1000 = 114.51 \text{ ppm MES}$$

En términos de DQO se realiza el cálculo tomando la relación 1.42 Kg O<sub>2</sub>/Kg biomasa (entendiendo como biomasa: C<sub>5</sub>H<sub>7</sub>NO<sub>2</sub>) y se supone que la totalidad de la biomasa es MES.



$$\frac{1 \text{ mol C}_5\text{H}_7\text{NO}_2}{5 \text{ moles O}_2} \cdot \frac{32 \text{ g O}_2}{113 \text{ g C}_5\text{H}_7\text{NO}_2} = 1.42 \frac{\text{g O}_2}{\text{g biomasa}}$$

$$\text{Trabajando 12.5 h/día: } \frac{2.87 \frac{\text{kg MES}}{\text{día}} \times \frac{1.42 \text{ kg O}_2}{\text{kg MES}}}{25.12 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}} \times 1000 = 162.23 \text{ ppm O}_2 \text{ (DQO)}$$

#### 5.2.1.2 Biofiltros C

La cantidad de DQO a eliminar del sistema es de 2.02 Kg O<sub>2</sub>/h.

La relación calculada anteriormente (ver apartado 5.2.1.1.) entre biomasa y metanol es de 0.243 Kg biomasa/Kg CH<sub>3</sub>OH y teniendo en cuenta la relación de 1.5 Kg DQO/Kg CH<sub>3</sub>OH

$$0.243 \frac{\text{kg C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N (biomasa)}}{\text{kg CH}_3\text{OH}} \div \frac{1.5 \frac{\text{kg DQO}}{\text{kg CH}_3\text{OH}}} = 0.162 \frac{\text{kg biomasa}}{\text{kg DQO}}$$

$$0.162 \frac{kg C_5H_7O_2N (biomasa)}{kg DQO} \cdot 2.02 \frac{kg DQO}{h} = 0.327 \frac{kg biomasa(SSV)}{h} : 0.85 \frac{SST}{SSV} = 0.38 \frac{kg SST}{h}$$

$$\text{Trabajando 15 h/día: } 0.38 \frac{kg SST}{h} \cdot 15 \frac{h}{día} = 5.70 \frac{kg SST}{día}$$

Adoptando los mismos criterios que para los filtros de desnitrificación.

Volumen necesario de agua de lavado = 16.00 m<sup>3</sup>

$$\text{Trabajando 15 h/día: } \frac{2.87 \frac{kg MES}{día}}{16.00 \frac{m^3}{día}} \times 1000 = 179.37 ppm MES$$

En términos de DQO se realiza el cálculo tomando la relación 1.42 Kg O<sub>2</sub>/Kg biomasa (entendiendo como biomasa: C<sub>5</sub>H<sub>7</sub>NO<sub>2</sub>) y se supone que la totalidad de la biomasa es MES.

$$\text{Trabajando 15 h/día: } \frac{2.87 \frac{kg MES}{día} \times \frac{1.42 kg O_2}{kg MES}}{16.00 \frac{m^3}{día}} \times 1000 = 254.71 ppm O_2 (DQO)$$

Seguidamente se presenta una tabla resumen con los resultados obtenidos de los cálculos anteriores para la producción de fangos:

Tabla 26: Resultados de la estimación de producción de fangos de los biofiltros DN y biofiltros C

		Biofiltros DN	Biofiltros C (DQO)
Funcionamiento	h/día	15	15
Caudal de agua de lavado	m <sup>3</sup> /d	25.12	16.00
Concentración de <b>MES</b> (ppm SS) en el agua de lavado		<b>114.51</b>	<b>179.37</b>
Concentración de <b>DQO</b> (ppm O <sub>2</sub> ) en el agua de lavado		<b>162.23</b>	<b>254.71</b>

Tabla 27: Resultados de la producción de fangos al día

Trabajo	MES	DQO
15 h/día	276.74 ppm SS	434.08 ppm O <sub>2</sub>

Como se ha visto en el apartado de vertido, el agua residual procedente del sistema cumple con los límites establecidos por la Ordenanza Municipal sobre el uso de la Red de alcantarillado sanitario del Núcleo Urbano de Mahón, donde se definen los siguientes límites de vertido:

- DBO<sub>5</sub>: 500 ppm
- Sólidos suspendidos: 400 ppm
- DQO: 800 ppm

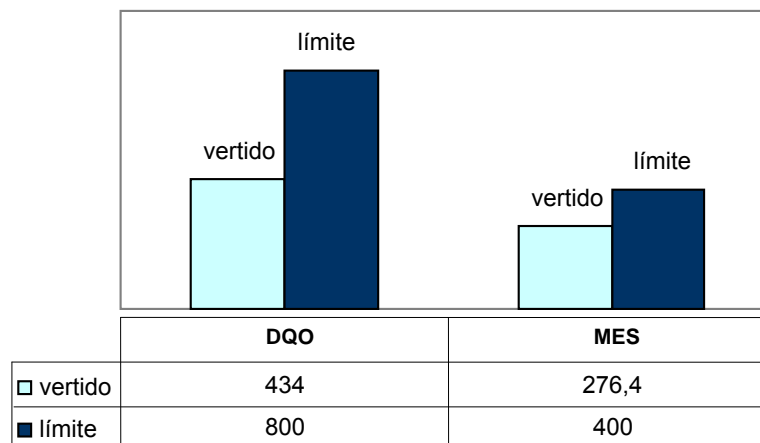


Figura 23: Gráfica de los parámetros de vertido

### 5.2.2 Recirculación

Para prever aquellos casos en los que, bien por motivos puntuales de ineficiencia del proceso biológico, bien por carencia de suministro eléctrico, etc., el sistema de eliminación de nitrógeno no tiene el rendimiento esperado, se propone disponer de un circuito de recirculación.

El agua tratada irá al depósito final de suministro a la población que tiene un volumen de 300 m<sup>3</sup> de agua.

A la salida de los biofiltros DN se realizará una medida en continuo de la concentración de nitratos. En el caso de que la concentración medida esté por encima del valor consigna (43 mg/l), se iniciará una recirculación que irá desde la salida de estos biofiltros hasta el

depósito anterior a ellos. Previamente al inicio de la recirculación se parará la bomba de extracción del pozo.

Una vez que la concentración de nitratos en el agua tratada esté por debajo del valor de consigna, se parará la recirculación y se retomará la extracción del agua del pozo, y el funcionamiento normal de la instalación.

### **5.2.3 Bombeo a distribución**

En el depósito de agua tratada se instalarán dos bombas (1+1, una en funcionamiento y otra en reserva) con una capacidad de 50.00 m<sup>3</sup>/h cada una, para impulsar el agua a la red de distribución. La altura manométrica de estas bombas dependerá de la configuración de la red, de las cotas y de las presiones de suministro, aspecto que queda fuera del alcance de este proyecto.

### **5.2.4 Control del proceso**

El control del proceso se realizará mediante PLC (Programable Logic Controller) a partir del que se actuará sobre los variadores de frecuencia, arrancadas y paradas de las bombas, válvulas motorizadas, etc.

No es objeto de este proyecto final de carrera definir la lógica de funcionamiento de la planta, parte que se definirá en la ingeniería de detalle.

## **5.3 COSTES DE INVERSIÓN**

En este apartado se detallan los costes de inversión para la construcción de la planta de tratamiento del agua para la eliminación de nitratos mediante biofiltración.

El coste de inversión de la planta está constituido por la suma de las cotizaciones de las diferentes partidas en las que se divide el proyecto. Esta división es totalmente arbitraria y susceptible de modificación.

- **Equipos electromecánicos:** contempla todos los equipos mecánicos de la planta (bombas, filtros,...), valvulería, instrumentación (medidor de nitratos, medidos de TOC, presostatos,...) incluido el transporte y medios de descarga y la automatización

- **Montaje mecánico:** incluye el montaje mecánicos de los equipos, juntamente con todas las tuberías, codos,... y las horas, dietas y desplazamientos del personal especializado.
- **Montaje eléctrico:** incluye el montaje eléctrico de los equipos, juntamente con todo el cableado y cuadro eléctrico, además de las horas, dietas y desplazamientos del personal especializado.
- **Ingeniería:** Este apartado contempla la redacción de toda la ingeniería básica y de detalle, la elaboración de los planos necesarios (P&ID, implantación, isométricos,...), la dirección de obra, horas de personal, dietas y desplazamientos del personal especializado.
- **Seguridad y salud:** incluye la elaboración del plan de seguridad y salud necesario a la hora de ejecutar la obra.

En la tabla 28 se muestran las diferentes partidas con sus correspondientes costes y los trabajos que contempla cada una de ellas.

Dentro de los equipos electromecánicos se han contado todos y cada uno de los elementos que componen la planta, desde los equipos principales hasta la valvulería e instrumentación que compone misma.

Tabla 28: Desglose del presupuesto de la planta de biofiltración para Sant Climent

Descripción de los trabajos	Coste
<b>Equipos electromecánicos</b> (incluye: equipos mecánicos, calderería, valvulería, instrumentación, transporte y medios de descarga de los equipos y automatización)	179.200,00 €
<b>Montaje mecánico</b> (incluye: montaje mecánico de los equipos, tuberías, codos y personal, dietas y desplazamientos)	20.000,00 €
<b>Montaje eléctrico</b> (incluye: cableado, cuadro eléctrico, montaje eléctrico y personal, dietas y desplazamientos)	15.000,00 €
<b>Ingeniería</b> (incluye: ingeniería básica y de detalle, planos, dirección de obra, personal, dietas y desplazamientos)	18.150,00 €
<b>Seguridad y salud</b>	3.000,00 €
<b>TOTAL (PEM)*</b>	<b>235.350,00 €</b>

\* precio ejecución material

Hay que tener en cuenta que en cualquier proyecto se deben repercutir a la hora de poner el precio final de venta (P.V.P.) los costes de estructura (GE) de la empresa y el beneficio industrial que se quiere obtener (BI), del mismo modo que siempre se debe incluir una partida de imprevistos que esta alrededor del 2-3% del total de la obra, dependiendo su magnitud.

## 5.4 COSTES DE EXPLOTACIÓN

Se entiende por costes de explotación aquellos costes derivados de tener la planta en funcionamiento, sin tener en cuenta las horas del personal para operar la planta ni analíticas necesarias a realizar para un correcto seguimiento de los parámetros analíticos.

En el caso de la biofiltración se ha tenido en cuenta el consumo energético de la instalación y los consumibles, considerando en este caso, los reactivos químicos necesarios para su correcto funcionamiento. El relleno de los biofiltros DN no se considera un consumible ya que, según Air Water Treatment (proveedor de la tecnología UFBAF®) su sustitución es cada 20 años. Del mismo modo no se considera un consumible la sílice y antracita.

### 5.4.1 Consumo energético

En la tabla 29 se muestran las potencias, tanto la potencia instalada y como la absorbida de cada uno de los equipos que componen la planta, el coeficiente de empleo del equipo (% de empleo del equipo durante el funcionamiento de la planta) y las horas de funcionamiento de cada equipo. En el caso de Sant Climent se ha considerado un funcionamiento de todos los equipos de 15 horas al día (12.5 horas de funcionamiento normal y 2.5 horas para los lavados), excepto de las bombas de lavado que funcionarán 2.5 horas al día).

Tabla 29: Tabla de potencias

DESIGNACION	Unid.	Kw. Inst.	Kw. Abs.	Coeficiente de empleo	Funcionam. horas/día	Consumo Kwh/día
Bomba pozo bombeo	1	10	7,5	1	15	112,5
Dosificadora de metanol	1	0,12	0,09	1	15	1,35
Dosificadora de ácido fosfórico	1	0,12	0,09	1	15	1,35
Bomba alimentación a BIOFILTROS DN	1	0,75	0,56	1	15	8,4
Compresor biofiltros desnitrificación	1	1,47	1,18	1	15	17,7
Aireación reactor de oxidación	1	4	3	1	15	45
Bomba centrifuga horizontal a BIOFILTROS C	1	0,75	0,56	1	15	8,4
Compresor biofiltros eliminación DQO	1	1,47	1,18	1	15	17,7
Bomba de lavado	2	4	3	0,75	2,5	11,25
					<b>TOTAL</b>	<b>223,65</b>

Si se considera que el kwh de energía tiene un precio de 0.08 euros, esto da un coste energético de:  $223.65 \frac{kWh}{día} \cdot 0.11 \frac{€}{kWh} = 24.60 \frac{€}{día}$

#### 5.4.2 Consumo de reactivos químicos y consumibles

En el apartado de consumo de reactivos químicos se han contado los diferentes productos necesarios para la aportación de los nutrientes esenciales, metanol y ácido fosfórico.

Tabla 30: Resumen del consumo de los reactivos químicos de la planta y costes.

consumos de reactivos químicos											
	concentración comercial	dosis	unidades dosis	consumo Kg/h	funcionamiento h/día	consumo Kg/día	consumo producto comercial l/h	consumo producto comercial l/día	precio €/Kg	precio €/h	precio €/día
metanol	95%	1,68	mg metanol/mg de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2,02	12,50	25,20	2,65	33,08	0,54	1,09	13,61
ácido fosfórico	75%	0,61	mg ácido fosfórico/mg de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,73	12,50	9,15	0,62	7,75	0,96	0,70	8,78
TOTAL €/día										22,39 €	



Todas las dosificaciones, como en el caso del sistema de biofiltración, deberán ajustarse en fase de puesta en funcionamiento de la instalación.

Teniendo en cuenta que la planta produce 150 m<sup>3</sup>/día el coste de un metro cúbico de agua producida por biofiltración, se muestra en la siguiente tabla, 31.

Tabla 31: Coste explotación por metro cúbico de agua producida

cálculo €/m <sup>3</sup> de agua tratada		
energía	24,60	€/día
reactivos químicos	22,39	€/día
	<b>46,99</b>	<b>€/día</b>
coste €/m <sup>3</sup> energía	0,14	€/m <sup>3</sup>
coste €/m <sup>3</sup> reactivos químicos	0,15	€/m <sup>3</sup>
<b>coste por m<sup>3</sup> de agua tratada</b>	<b>0,29</b>	<b>€/m<sup>3</sup></b>



## **6 ESTUDIO Y DISEÑO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO MEDIANTE ÓSMOSIS INVERSA**

### **6.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO**

Las plantas de tratamiento del agua cuyo principal proceso es la filtración por ósmosis inversa, están constituidas por diferentes elementos que definen varios niveles de actuación para el tratamiento del agua.

Cabe destacar la importancia del proceso de ósmosis inversa dentro del tratamiento de potabilización del agua, debido a que éste es el proceso donde se eliminan la mayor parte de los virus y bacterias que pueden afectar a la salud humana, además de la eliminación de los metales pesados y átomos radioactivos.

También es importante destacar la capacidad de las membranas, puesto que va a ser el factor limitante de la planta. Un mal dimensionado de las membranas puede, en situaciones, no dar la producción esperada o determinada. Estas situaciones pueden corresponder a una muy mala calidad del agua de entrada a la planta o a un ineficaz sistema de pretratamiento del agua antes de su entrada en las membranas de ósmosis (sistemas de prefiltración previos).

La ventaja de efectuar este tratamiento es la gran reducción de nitratos del agua tratada que se produce, y el mayor inconveniente es el hecho de que no solo se reduce la concentración de nitratos sino también la de los otros minerales en el agua. De ahí que debamos estudiar la posibilidad de mezclar el agua de permeado con agua directa de pozo y así poder tener los parámetros analíticos dentro de la normativa del Real Decreto 140/20003.

A continuación se detallan estos niveles de actuación que constituyen las diferentes etapas de la planta de tratamiento.

#### **6.1.1 Pretratamiento**

El pretratamiento del agua de abastecimiento para las instalaciones de ósmosis inversa influye mucho en la eficacia de la instalación. La forma de pretratamiento requerida depende

en la calidad del agua entrante. El propósito del pretratamiento es reducir el contenido en materia orgánica y la cantidad de microorganismos presentes en el agua.

El contenido en materia orgánica y las cantidades de bacteria deben ser tan bajas como sea posible para prevenir la llamada bioobstrucción de membranas.

La ósmosis inversa al ser una técnica de hiperfiltración donde el agua pasa a través de la membrana, exige que los niveles de sólidos en suspensión y materia viva (materias, algas, etc.) sean lo más pequeños posibles para evitar un rápido ensuciamiento y obstrucción de la membrana.

La aplicación de un pretratamiento tiene varios beneficios:

- Mayor vida útil de las membranas.
- Aumento del tiempo de funcionamiento de la instalación.
- Mayor producción de agua de permeado para una misma presión de entrada.
- Simplificación de las tareas de mantenimiento.
- Reducción de los costes de mantenimiento.

En este nivel de actuación se eliminan las sales disueltas como por ejemplo los carbonatos, materia en suspensión y bacterias existentes en el agua.

Para llevar a cabo el pretratamiento es necesario disponer de un depósito donde se realizará la cloración del agua de pozo para evitar la proliferación de bacterias en el filtro y sobretodo, en las membranas. La concentración de cloro libre a tener en el agua de a tratar es de 1 mg/l (ppm). Teniendo en cuenta que el tiempo de permanencia del depósito no ha de ser inferior a 30 minutos, se propone un depósito de 10 m<sup>3</sup> de volumen (depósito de cloración), con un controlador de nivel que regulará el funcionamiento de la bomba de extracción del pozo.

El pretratamiento estará compuesto por cuatro etapas:

- Bombeo del depósito al filtro dual.
- Filtración mediante un filtro de sílex y antracita.
- Acondicionamiento químico del agua.
- Microfiltración.

A continuación se describen cada una de las etapas anteriormente comentadas.

#### *6.1.1.1 Bombeo del depósito de cloración al filtro dual*

Para el bombeo del agua del depósito de cloración al filtro dual de sílex y antracita, se instalan, dentro del mismo, dos bombas sumergibles. Estas bombas dan un caudal de 10 m<sup>3</sup>/h con una presión máxima de 4 bar. Debido a que a la salida de la microfiltración, se desea tener una presión constante de 2 bar; la bomba irá regulada con variador de frecuencia que mantendrá la presión constante y compensará los incrementos de pérdida de carga de los filtros.

El grupo de bombeo que esté en funcionamiento será, también, el encargado de proporcionar el agua para el lavado del filtro.

Dentro del depósito se instalarán dos sondas de nivel las cuales controlarán la puesta en marcha y parada de la bomba del pozo en función del volumen del depósito.

#### *6.1.1.2 Filtración*

Un parámetro importante a tener en cuenta a la hora de realizar la ósmosis es la turbidez, aun siendo muy baja, del orden de 0,2 NTU, puede influir negativamente en la vida útil de las membranas de ósmosis. Por lo tanto es recomendable hacer un filtrado previo para eliminar gran parte de los sólidos en suspensión presentes.

El agua de aporte inicial entra en la planta donde pasa a través de un filtro de eliminación de sólidos en suspensión, en el que quedan retenidas las partículas de mayor tamaño y se realiza también la eliminación de la turbidez.

La filtración es una técnica, proceso tecnológico u operación unitaria de separación, por la cual se hace pasar una mezcla (sólidos y líquido), a través de un medio poroso o medio filtrante que puede formar parte de un dispositivo denominado filtro, donde se retiene de la mayor parte del o de los componentes sólidos de la mezcla, y se elimina la mayoría de su turbidez.

Dicha filtración, se realizará mediante un filtro dual de sílex i antracita. Antes de pasar el agua por el filtro, es aconsejable añadir un coagulante, para conseguir separar una mayor cantidad de partículas. En el caso de Sant Climent no se adicionará este coagulante por tratarse de agua para consumo humano.

#### *6.1.1.3 Acondicionamiento químico del agua*

Previa entrada al tratamiento de ósmosis inversa, se hace necesario el acondicionamiento químico del agua. Este consiste en la adición de bisulfito sódico, antiincrustante y ácido sulfúrico para obtener las condiciones óptimas de calidad físico-química del agua que entra en las membranas.

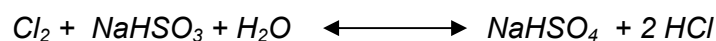
#### **Bisulfito sódico**

El bisulfito sódico ( $\text{NaHSO}_4$ ) se emplea aprovechando sus propiedades como reductor y su capacidad para atacar a numerosos cuerpos orgánicos que destruye y decolora.

Con la adición de este producto garantizamos que no pasan compuestos oxidantes a las membranas de ósmosis inversa.

Por otro lado, este producto ejerce también un efecto bacterio estático, ya que debido a su carácter reductor, reduce el oxígeno presente en el agua y de esta manera la proliferación de las bacterias aeróbicas.

La reacción de descomposición del cloro, es la siguiente:



Resultando de la descomposición, la formación de bisulfato sódico y ácido clorhídrico.

#### **Antiincrustante**

Cuando el agua pasa a través de las membranas de ósmosis inversa, el aumento de la concentración salina tiende a provocar la precipitación del carbonato cálcico y los sulfatos de calcio y bario. Estas precipitaciones perjudican notablemente el funcionamiento de las membranas.

El uso del producto antiincrustante ayudará a mantener el rendimiento de las membranas minimizando la precipitación de sales dañinas.

El producto antiincrustante es altamente efectivo en todos los sistemas de aguas, y esta especialmente formulado para operar plantas de ósmosis inversa con una mínima supervisión.

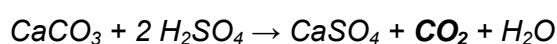
Las ventajas derivadas de la adición de antiincrustante son las siguientes:

- Tienen un alto poder de inhibición de formación de coloides de hierro.
- Habitualmente son compatibles con todo tipo de membranas, tanto de agua de mar como para agua salobre.
- Permiten el diseño de plantas con un menor rechazo.
- Presentan un elevado efecto umbral que impide la precipitación de las sustancias insolubles gracias al incremento de sus solubilidades relativas.
- No incrementan el crecimiento bacteriológico ya que no son nutrientes.

Este producto es apto para aguas de consumo humano y también evita un mayor rechazo en el proceso de ósmosis inversa.

## Ácido

Es necesario previa entrada a las membranas de ósmosis inversa realizar un control del pH del agua de alimentación, con el fin de evitar la precipitación de las sales de carbonato de calcio y magnesio. Para ello se dosifica un ácido (ácido sulfúrico) que desplaza a los bicarbonatos hacia la forma de CO<sub>2</sub> evitando así la formación de carbonatos.



Un pH ligeramente ácido reduce el consumo de antiincrustante que tiene un coste euro por kilogramo significativamente más caro.

El CO<sub>2</sub>, debido a que su estructura molecular es muy similar a la del agua traspasa libremente la membrana.

Los tres sistemas de dosificación son de iguales características técnicas con el fin de igualar los equipos en planta y unificar las marcas y los recambios necesarios para sus reparaciones.

Los sistemas de dosificación deberán disponer de todos los sistemas de seguridad, el cubeto de retención, y los accesorios necesarios para el correcto funcionamiento de la bomba dosificadora.

#### 6.1.1.4 Microfiltración

El principio de la microfiltración (MF) es la separación física. Es el tamaño de poro de la membrana lo que determina hasta qué punto son eliminados los sólidos disueltos, la turbidez y los microorganismos. Las sustancias de mayor tamaño que los poros de la membrana son retenidas totalmente. Las sustancias que son más pequeñas que los poros de la membrana son retenidas parcialmente, dependiendo de la construcción de una capa de rechazo en la membrana.

Las membranas usadas para la microfiltración tienen un tamaño de poro de **0.1 – 10 µm**.

La microfiltración es capaz de eliminar la mayor parte de las bacterias y parte de la contaminación viral contenida en el agua. A pesar de que los virus son más pequeños que los poros de la membrana, esto es debido a que los virus se pueden acoplar a las bacterias y quedar retenidos con ellas.

En la tabla 32 se muestran los diferentes tamaños de microorganismos para verificar su paso o no a través de la microfiltración.

Tabla 32: Tamaño de diferentes microorganismos

Microorganismos	Tamaño
Bacterias	0.2-50 µm
Algas	1 µm-varios metros
Protozoos	10-100 µm
Virus	0.01-0.3 µm

Se colocará una microfiltración de 5µm (micras) previa entrada del agua de alimentación a las membranas de ósmosis inversa.

### 6.1.2 Ósmosis inversa

Para el tratamiento de la ósmosis inversa, se propone la siguiente actuación:

Tratar 10 m<sup>3</sup>/h mediante membranas de ósmosis de baja presión, con un rendimiento del 70%, i by-pasar 2 m<sup>3</sup>/h de las membranas para mezclar posteriormente, con lo que se obtienen 9 m<sup>3</sup>/h de un agua con una concentración de nitratos de 43 mg/l.

Teniendo en cuenta que el consumo medio de Sant Climent es del orden de 150 m<sup>3</sup>/día, con un funcionamiento de 16,6 horas en continuo de la planta propuesta, se podría abastecer el caudal de agua requerido. A la hora de realizar los cálculos se considera que la planta funciona 17 horas al día, dejando esos 20 minutos de margen aproximadamente para la realización del lavado de arrastre de las membranas o flushing (aproximadamente su duración es de 5-10 minutos).

El agua de salida de las membranas es un agua dulce muy poco mineralizada que por si sola no cumple los requerimientos del Real Decreto 140/2003 y tendrá una índice de Langelier del orden de -3, cuando la normativa pide que esté entre -0,5 y + 0,5. Por lo tanto se habla de un agua extremadamente agresiva y sin genes de dureza. Es por esto que la mezcla del agua del pozo con el agua tratada por ósmosis (permeado), además de reducir la cantidad a tratar, sirve para no tener que remineralizar el agua de salida de la planta.

En la siguiente tabla se muestran los valores límite de los parámetros más importantes a tener en cuenta en la calidad del agua de entrada a membranas.

Tabla 33: Parámetros de la calidad necesaria del agua de entrada a membranas (Hydranautics)

Parámetros de agua de entrada a las membranas de ósmosis	Valor límite
Turbidez máxima	1.0 NTU
SDI máximo (15 minutos)	5.0
Concentración máxima de cloro	< 0.1 gr/m <sup>3</sup>
TOC (Carbono Orgánico Total)	2 gr/m <sup>3</sup> de C
DBO (Demanda Biológica de Oxígeno)	4 gr/m <sup>3</sup> de O <sub>2</sub>
DQO (Demanda Química de Oxígeno)	6 gr/m <sup>3</sup> de O <sub>2</sub>

El tratamiento de los 10 m<sup>3</sup>/h, se realizará en dos etapas, la primera etapa estará formada por dos módulos de cuatro membranas cada uno. El permeado generado en esta primera etapa se enviará al depósito final de 300 m<sup>3</sup> mientras que el rechazo irá a la segunda etapa.

La segunda etapa estará formada por un solo módulo de cuatro membranas, el permeado de esta etapa irá a parar al depósito final con el permeado de la primera etapa, y el rechazo resultante irá a un depósito de 20 m<sup>3</sup> a la espera de verificar cual será el tratamiento que se le da. A este depósito irá a parar también el agua de lavado del filtro de sílex i antracita.

La presión necesaria a la entrada de la primera etapa es de 6 bares. Se instalará la bomba de alta presión que dará 7 bar a 12 m<sup>3</sup>/h.

En el *anejo VIII* se adjunta la simulación del proceso de ósmosis inversa realizada con el programa HIDRANAUTICS (proyección de las membranas).

Características y configuración de la planta de ósmosis inversa:

Nº de etapas	2
Nº de módulos	3 (2+1)
Nº membranas por módulo	4
Nº total de membranas	12
Fabricante membranas	HYDRANAUTICS
Limites de SDI	3-5
Temperatura diseño	18 ° C
<b>Conversión de diseño</b>	<b>70 %</b>
<b>Calidad del agua producto</b>	<b>TDS 250,00 mg/l</b>
<b>Conductividad</b>	<b>418,90 µS/cm</b>

El la figura 24 se presenta un esquema de funcionamiento de la planta de ósmosis inversa, así como la disposición de sus tubos de presión, conteniendo cada uno de ellos 6 membranas por tubo.

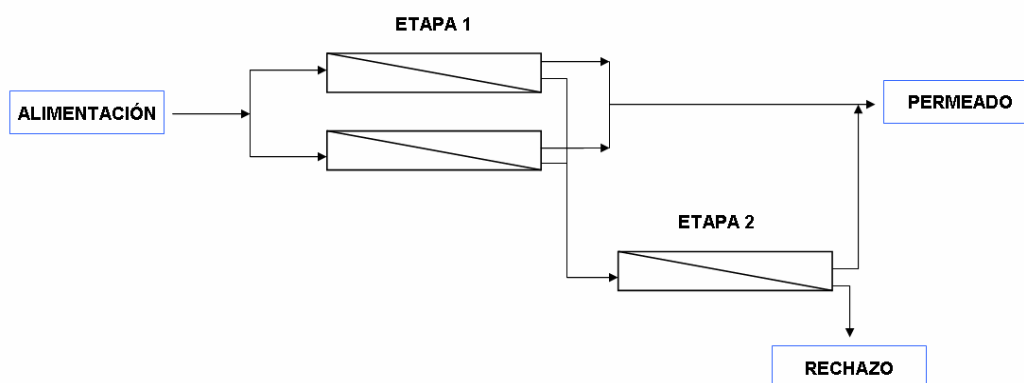


Figura 24: Configuración de la planta de ósmosis inversa



### **6.1.3 Lavado membranas**

La planta dispondrá de un mecanismo de lavado o flushing de las membranas, que se efectúa automáticamente con agua permeada, cada vez que pare la planta, desplazando el agua del concentrado en el interior, a fin de evitar incrustaciones.

La planta dispondrá de un sistema para la realización de las limpiezas químicas (CIP: clearing in place) de las membranas compuesto por una depósito donde se realiza la mezcla de reactivos, una microfiltración y una bomba de baja presión.

El sistema de limpieza química se utilizará con una periodicidad semestral o cuando la diferencia de presión entre la primera etapa y la segunda o entre la entrada y la salida de la ósmosis sea elevada (según especificaciones del fabricante).

## **6.2 VERTIDO**

El caudal de rechazo del sistema es de 3 m<sup>3</sup>/h que para un funcionamiento de 17 h/día supone un volumen de 51 m<sup>3</sup> al día, y el lavado del filtro genera un caudal de lavado de 4.16 m<sup>3</sup> al día, lo que hace un total de 55.16 m<sup>3</sup>.

El rechazo resultante de la planta de ósmosis inversa es altamente contaminante por su elevado contenido en sales, lo que hace no que sea posible su vertido a la red de alcantarillado y deba pensarse en una solución.

## **6.3 COSTES DE INVERSIÓN**

En este apartado se detallan los costes de inversión para la construcción de la planta de tratamiento del agua para la eliminación de nitratos mediante ósmosis inversa.

El coste de inversión de la planta esta constituido por la suma de las cotizaciones de las diferentes partidas en las que se divide el proyecto. Esta división es totalmente arbitraria y susceptible de modificación. (ver apartado 5.3.)

En la tabla 34 se muestran las diferentes partidas con sus correspondientes costes y los trabajos que contempla cada una de ellas.

Dentro de los equipos electromecánicos se han contado todos y cada uno de los elementos que componen la planta, desde los equipos principales hasta la valvulería e instrumentación que compone misma.

Tabla 34: Desglose del presupuesto de la planta de ósmosis inversa para Sant Climent

Descripción de los trabajos	coste
<b>Equipos electromecánicos</b> (incluye: equipos mecánicos, calderería, valvulería, instrumentación, transporte y medios de descarga de los equipos y automatización)	288.352,00 €
<b>Montaje mecánico</b> (incluye: montaje mecánico de los equipos, tuberías, codos y personal, dietas y desplazamientos)	20.000,00 €
<b>Montaje eléctrico</b> (incluye: cableado, cuadro eléctrico, montaje eléctrico y personal, dietas y desplazamientos)	15.000,00 €
<b>Ingeniería</b> (incluye: ingeniería básica y de detalle, planos, dirección de obra, personal, dietas y desplazamientos)	18.150,00 €
<b>Seguridad y salud</b>	3.000,00 €
<b>TOTAL (PEM)</b>	<b>344.502,00 €</b>

Hay que tener en cuenta que en cualquier proyecto se deben repercutir a la hora de poner el precio final de venta (P.V.P.) los costes de estructura (GE) de la empresa y el beneficio industrial que se quiere obtener (BI), del mismo modo que siempre se debe incluir una partida de imprevistos que esta alrededor del 2-3% del total de la obra, dependiendo su magnitud.

## 6.4 COSTES DE EXPLOTACIÓN

Se entiende por costes de explotación aquellos costes derivados de tener la planta en funcionamiento, sin tener en cuenta las horas del personal para operar la planta ni analíticas necesarias a realizar para un correcto seguimiento de los parámetros analíticos.

En el caso de la ósmosis inversa se ha tenido en cuenta el consumo energético de la planta y los consumibles, considerando en este caso, los reactivos químicos necesarios para su correcto funcionamiento y el recambio tanto de los cartuchos filtrantes de microfiltración, como las propias membranas de ósmosis inversa. No se considera un consumible la sílice y antracita del filtro dual previo.

### 6.4.1 Consumo energético

En la tabla 35 se muestran las potencias, tanto la potencia instalada y como la absorbida de cada uno de los equipos que componen la planta, el coeficiente de empleo del equipo y las horas de funcionamiento de cada equipos, en el caso de Sant Climent se ha considerado un funcionamiento de los equipos de 17 horas al día (16.6 horas de funcionamiento normal y 0.4 horas para los lavados).

Tabla 35: Tabla de potencias

DESIGNACION	UNID.	Kw. Inst.	Kw. Abs.	COEFICIENTE DE EMPLEO	FUNCIONAM. HORAS/DIA	CONSUMO KWH/DIA
Bomba pozo bombeo	1	10,00	7,50	1	17	127,50
Bomba by-pass del agua 2 m3/h	1	0,25	0,19	1	17	3,19
Bomba de alta presión	1	4,00	3,00	1	17	51,00
Dosificadora de acido	1	0,15	0,11	1	17	1,91
Dosificadora de bisulfito sódico	1	0,15	0,11	1	17	1,91
Dosificadora de antiincrustante	1	0,15	0,11	1	17	1,91
Compresor accionamiento válvulas	1	2,00	1,50	1	17	25,50
Bomba depósito de rechazo	2	0,60	0,45	1	17	15,30
Bomba de lavado de membranas	1	0,75	1,18	1	0,4	0,47
					<b>TOTAL</b>	<b>228,70</b>

Si se considera que el kwh de energía tiene un precio de 0.075 euros, esto da un coste

energético de:  $228.70 \frac{kWh}{día} \cdot 0.11 \frac{€}{kWh} = 25.15 \frac{€}{día}$

#### 6.4.2 Consumo de reactivos químicos y consumibles

En este apartado se puede ver la tabla 36 donde se muestra el coste en reactivos químicos (antiincrustante, bisulfito sódico y ácido sulfúrico) que tiene la planta por día, contando el. Además en las tablas 36 y 37 se exponen los costes de los fungibles de la misma, cartuchos filtrantes de microfiltración y membranas de ósmosis inversa.

Tabla 36: Resumen del consumo de los reactivos químicos de la planta y costes.

Consumos de reactivos químicos									
	concentración comercial	dosis	unidades dosis	consumo Kg/h	funcionamiento h/día	consumo Kg/día	precio €/Kg	precio €/h	precio €/día
Antiincrustante		4,00	g/m <sup>3</sup> de agua	0,04	17,00	0,68	2,90	0,12	1,97
Bisulfito sódico	40%	10,00	g/m <sup>3</sup> de agua	0,10	17,00	1,70	0,45	0,05	0,77
Ácido sulfúrico	15%	3,00	g/m <sup>3</sup> de agua	0,03	17,00	0,51	0,33	0,010	0,17
							TOTAL €/día		2,91 €



Todas las dosificaciones, como en el caso del sistema de biofiltración, deberán ajustarse en fase de puesta en funcionamiento de la instalación.

Tabla 37: Coste recambios cartuchos filtrantes de microfiltración

Cartuchos filtrantes		
Cantidad	5	
Reposición	6	veces/año
€/filtro	10	precio/filtro
TOTAL €/año	300,00 €	
<b>TOTAL €/día</b>	<b>0,82 €</b>	

Tabla 38: Coste cambio membranas de ósmosis

Membranas de ósmosis inversa (ESPA 2 Hydranautics)				
cantidad	reposición 1 vez cada 5 años	€/membrana	€/año	€/día
12	0,2	700	1680	<b>4,603</b>

Para calcular el coste de un metro cúbico de agua tratada por ósmosis inversa se considera tanto el coste energético como el coste en reactivos químicos y consumibles. En el caso de Sant Climent se debe tener en cuenta que la planta produce 7 m<sup>3</sup>/h con esta tecnología, pero que hay 2 m<sup>3</sup>/h que mediante el by pass van directamente al depósito de distribución, y por lo tanto estos solo tienen el coste del bombeo, ya incluido en la tabla de potencias.

Tabla 39: Coste explotación por metro cúbico de agua producida

cálculo €/m <sup>3</sup> de agua tratada		
energía	25,15	€/día
reactivos químicos	2,91	€/día
cartuchos filtrantes	0,82	€/día
membranas	4,60	€/día
	<b>33,49</b>	<b>€/día</b>
coste €/m <sup>3</sup> energía	0,21	€/m <sup>3</sup>
coste €/m <sup>3</sup> consumibles	0,07	€/m <sup>3</sup>
<b>coste por m<sup>3</sup> de agua tratada</b>	<b>0,28</b>	<b>€/m<sup>3</sup></b>

Por lo tanto, se obtiene que hay 10 m<sup>3</sup>/h con un coste de 0,28 €/m<sup>3</sup> y 2 m<sup>3</sup>/h con un coste de 0,0 €/m<sup>3</sup> lo que hace un coste medio de 0,23 €/m<sup>3</sup>.

## 7 CONCLUSIONES Y ESTUDIO COMPARATIVO

A continuación, se exponen las conclusiones extraídas del estudio para la reducción de nitratos en el agua de abastecimiento del núcleo urbano de Sant Climent con la tecnología de biofiltración. Posteriormente se hace un análisis comparativo del mismo caso pero con la tecnología de ósmosis inversa.

Las limitaciones del proceso de desnitrificación biológica por biofiltración son, en esencia, las siguientes:

- El proceso requiere de un tiempo de arranque de tal manera que el crecimiento de bacterias heterótrofas desnitrificantes sobre la matriz sólida del biofiltro sea suficiente para obtener un rendimiento en la desnitrificación biológica aceptable.
- Concentración de  $O_2$  ha de ser suficientemente baja para poder llevar a término el proceso (condiciones anóxicas). Hace falta tener en cuenta que las bacterias heterótrofas con capacidad por tomar el  $NO_3^-$  como aceptores de electrones, son en general facultativas y para ellas, es prioritario la respiración con  $O_2$  disuelto si hay disponible.
- Pese a que la dependencia del pH es menos fuerte que en otros procesos biológicos, se demuestra que a pH entre 7 y 9 la actividad reductora del  $NO_3^-$  es más elevada. Hace falta destacar que a pH inferiores a 7 se observa un incremento en la presencia de óxido nitroso.
- La dependencia directa de la temperatura. Así, parece que conforme aumenta la temperatura el proceso es más eficiente. La temperatura de trabajo mínima y máxima puede llegar a ser de entre 10 y 25 °C. No obstante, con una fuente externa de carbono orgánico la tasa de desnitrificación es más alta que para fuentes internas.
- En general, una fuente de carbono orgánico externa genera una productividad más elevada debido a que son fuentes fácilmente biodegradables.
- El material apoyo del biofiltro debe presentar unas características de densidad y morfología que favorezcan la difusión del  $N_2$  hacia la atmósfera, el acceso de los nutrientes a la película bacteriana y que proporcione una gran superficie específica para el desarrollo eficiente de las bacterias.

- El proceso se debe dar siempre previamente a cualquier tipo de cloración o proceso de desinfección que mantenga dosis residuales de cloro libre.

Si se comparan los datos obtenidos en los estudios realizados con las tecnologías de biofiltración y ósmosis inversa, para el caso de Sant Climent, se obtienen las observaciones que se exponen en la tabla 40.

Tabla 40: Tabla resumen tecnología biofiltración y ósmosis inversa

	Biofiltración	Ósmosis inversa
Fundamento	Biológico	Físico-químico
Proceso	Desnitrificación	Filtración
Arranque del proceso	Necesario un tiempo de arranque del proceso	Inmediato
Continuidad del proceso	Proceso continuo (no es aconsejable parar el sistema por un período de tiempo prolongado)	Proceso discontinuo (existe la posibilidad de para el proceso en cualquier momento)
Subproductos	Generación de fango “inerte”	Generación de una corriente de rechazo con elevada concentración de nitratos
Caudal de entrada al sistema	12 m <sup>3</sup> /h	12 m <sup>3</sup> /h
Caudal tratado con la tecnología	12 m <sup>3</sup> /h	10 m <sup>3</sup> /h
Caudal de by-pass	0 m <sup>3</sup> /h	2 m <sup>3</sup> /h
Cantidad de fango/rechazo	45,03 m <sup>3</sup> /día	55,16 m <sup>3</sup> /día
Concentración de nitratos a la salida	43 mg/l	43 mg/l
Dependencia del pH	Fuerte	Débil
Dependencia de la temperatura	Fuerte	Débil
Estabilidad del proceso	Crítica	Robusta
Consumo energético	223,65 Kwh/día	228,70 Kwh/día
Aspecto medio ambiental	Sostenible	No sostenible
Aspecto social	Malo	Bueno
Coste inversión	235.350,00 €	344.502,00 €
Coste explotación	0,28 €/m <sup>3</sup>	0,23 €/m <sup>3</sup>

De este proyecto final de carrera se concluye que ambas tecnologías son aplicables para la reducción de los nitratos en el agua de abastecimiento del núcleo urbano de Sant Climent. Elegir una u otra dependerá de los criterios que se consideren prioritarios.

El sistema de biofiltración es un sistema novedoso y medioambientalmente más sostenible que la ósmosis inversa, debido a que genera menos residuos y éstos, además, son inertes. Otro gran atractivo de este sistema, es su menor coste de inversión y su “bajo” consumo energético.

El coste de explotación, en el caso de la biofiltración, es superior al coste de explotación de la ósmosis, resultado nada habitual si se tiene en cuenta los principios de funcionamiento de ambas tecnologías. Si bien, cabe destacar, que la tecnología de ósmosis inversa tiene un coste energético superior al de la biofiltración, resultado que encaja perfectamente con los principio general de funcionamiento de dicha tecnología. En el caso de Sant Climent, el aporte de nutrientes en el caso de la biofiltración es tan elevado que encarece considerablemente el coste de explotación con este sistema, lo que hace que supere al valor de la ósmosis inversa. Además se ha de tener en cuenta que en el caso de la ósmosis el caudal tratado es de 10 m<sup>3</sup>/h mientras que en el de la biofiltración es de 12 m<sup>3</sup>/h.

Por el contrario el proceso de ósmosis inversa es un proceso de mejor control, ya que la dependencia con la temperatura, el pH y las condiciones de contorno es menor. La amplia experiencia en esta tecnología, hace que sea un sistema de gran fiabilidad y robustez.

Además su gran aplicación como sistema para la producción de agua “potable” hace que tenga una muy buena prensa entre las administraciones y la población en general.





## 8 BIBLIOGRAFIA

### LIBROS

- Metcalf and Eddy (2004) *"Wastewater Engineering. Treatment and reuse"* Mc Graw Hill
- Degrémont (1979) *"Manual técnico del agua"*
- R.S. Ármalo *"Tratamiento de aguas residuales"* Ed. Reverté, S.A.
- Joan Pigem *"Microscopia de la depuració biològica"* SEARSA
- José Ferrer. Polo Aurora Seco Torrecillas *"Tratamientos biológicos de aguas residuales"* Universidad Politécnica de Valencia
- Edward E. Braun *"Water treatment plants design"* AWWA Mc Graw Hill

### WEB's

- Google Earth
- [www.e-ciencia.com](http://www.e-ciencia.com)
- [www.hydranautics.com](http://www.hydranautics.com)
- [www.codeline.com](http://www.codeline.com)
- [www.sedelam.es](http://www.sedelam.es)
- Universidad de Navarra

### LIBROS WEB

- Ingeniería de aguas residuales
- Luís Felipe del Castillo. *"El fenómeno mágico de la ósmosis"*
- Procesos biológicos

### ARTÍCULOS

- A. Mohseni-Bandpi, D.J. Elliott and A. Moneny-Mazdeh *"Desnitrification of groundwater using acetic as a carbon source"*.
- A. Mohseni-Bandpi, D.J. Elliott *"Groundwater desnitrification with alternative carbon sources"*.

- M. Calderera; O. Gibertb; V. Martíab; M. Roviraa; J. de Pablo; S. Jordanac; L. Duroc; J. Guimeràc; J. Brunoc *“Denitrification in presence of acetate and glucose for bioremediation of nitrate-contaminated groundwater”*.
- Jordi Arellano Ortiz. *“Proyecto Bionitrate: una nueva tecnología para la eliminación de nitratos mediante resinas de intercambio iónico”*.
- Carlos Martín Apliclor *“Mejora del rendimiento del proceso terciario de desnitrificación mediante el control de la dosificación de metanol a partir del análisis en línea de la concentración de nitratos”*.
- J. Tapias Parcerisas *“Recuperación de pozos y acuíferos contaminados con nitratos”*. Delvisol 2004, S.L
- Camargo J.A., Alonso A. (2007) *“Contaminación por nitrógeno inorgánico en los ecosistemas acuáticos: problemas medioambientales, criterios de calidad del agua, e implicaciones del cambio climático”*.
- EMUASA *“Investigadores de Emuasa diseñan un proceso que convierte las aguas subterráneas en aptas para el consumo humano”*.
- Tejero, J. Suarez, A. Jácome y J. Temprano *“Fundamentos del tratamiento biológico”*.
- Andreu Pujadas Niño, Stenco. *“Ósmosis inversa para obtener agua de alta calidad. Comparación de propuestas de sistemas de aplicación en función de la calidad del agua de entrada”*.

## DOCUMENTACIÓN VARIA

- Documentación suministrada por Air Water Technologies (UFBAF®), tanto documentación técnica como folletos informativos.
- Documentación acerca de otros procesos de reducción de nitratos en aguas para consumo humano instalados por Agbar.
- Documentación facilitada por el departamento de ingeniería de Aigües de Barcelona (SGAB).
- Documentación técnica suministrada por los proveedores de los equipos

## **9 ANEJOS**

- 9.1. Anejo I: Mapa de la contaminación por nitratos en España
- 9.2. Anejo II: Resultados analíticos
- 9.3. Anejo III: P&ID sistema biofiltración
- 9.4. Anejo IV: Especificaciones técnicas de los equipos de biofiltración
- 9.5. Anejo V: Especificaciones técnicas de los equipos de ósmosis inversa
- 9.6. Anejo VI: Real decreto 140/2003
- 9.7. Anejo VII: Ordenanza Municipal Sobre el Uso de la Red de Alcantarillado Sanitario del Núcleo Urbano de Mahón
- 9.8. Anejo VIII: Proyección membranas de ósmosis