



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

Curso Académico:



## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero aprovechar la ocasión para agradecer a todos los profesores que he tenido desde primaria hasta la universidad por su constante trabajo, esfuerzo y paciencia para formar a sus alumnos, sin ellos no hubiera podido ser posible llegar hasta este punto donde presento mi Trabajo Final de Máster al mismo tiempo que disfruto de tener trabajo como ingeniero desde que terminé 2º de Máster.

En muchas ocasiones a los profesores no se les da el reconocimiento que se merecen, es igual de importante un profesor de 1º de Primaria que asentará las bases de conocimiento en un niño de 6 años como un profesor de universidad que especializará al alumno y lo preparará para que dé el salto al mundo laboral y profesional.

También mencionar a mis tutores, Bea y Miguel, gracias por entender la dificultad de compaginar estudios y trabajo, por tener paciencia conmigo y por haber sido mis profesores durante varios cursos tanto en el Grado como en el Máster en Ingeniería Química.

Gracias.



## **RESUMEN**

En los últimos años, la elevada presencia de nitratos y herbicidas en el agua amenaza el suministro de agua potable segura y de calidad en varias poblaciones de la Comunidad Valenciana. Esta situación deriva en la necesidad de obtener una solución integral que permita tratar contaminantes típicos de la actividad agrícola e industrial de la zona, como son nitratos y herbicidas.

El presente TFM realizará el diseño e implementación de una planta de potabilización de aguas basada en tecnología de membranas para reducir el alto contenido de sales del agua y los elevados niveles de nitratos y herbicidas presentes, con el fin de obtener un agua apta para el consumo humano en una población de 20.000 habitantes. La planta potabilizadora diseñada constituirá una solución flexible, compacta, segura, energéticamente eficiente y, por consiguiente, económicamente viable.

**Palabras Clave:** Potabilizadora, nitratos, herbicidas, salinidad, agua potable, membranas.



## RESUM

En els últims anys, l'elevada presència de nitrats i herbicides en l'aigua amenaça el subministrament d'aigua potable segura i de qualitat en diverses poblacions de la Comunitat Valenciana. Esta situació deriva en la necessitat d'obtenir una solució integral que permet tractar contaminants típics de l'activitat agrícola i industrial de la zona, com són nitrats i herbicides.

El present TFM realitzarà el disseny i implementació d'una planta potabilitzadora d'aigües basada en tecnologia de membranes per a reduir l'alt contingut de sals de l'aigua i els elevats nivells de nitrats i herbicides presents, per tal d'obtenir un aigua apta per al consum humà en una població de 20.000 habitants. La planta potabilitzadora dissenyada constituirà una solució flexible, compacta, segura, energèticament eficient i, per tant, econòmicament viable.

**Paraules clau:** Potabilitzadora, nitrats, herbicides, salinitat, aigua potable, membranes.





## **ABSTRACT**

Over the past years, the high presence of nitrates and herbicides in the water threatens the supply of safe drinking water and its quality in several populations of Valencia. This situation leads to the necessity of obtaining comprehensive solutions that will allow the treatment of typical agricultural and industrial contaminants of the area, such as nitrates and herbicides.

This TFM will consist of a water treatment plant design and implementation based on membrane technology in order to reduce the high water salinity and the high levels of nitrates and herbicides present, in order to obtain suitable water for human consumption in a 20,000 population town. The water treatment plant designed will constitute a flexible, compact, safe, and energy efficient solution, therefore, economically viable.

**Keywords:** Water treatment, nitrates, herbicides, salinity, drinking water, membranes.



# ÍNDICE

## DOCUMENTOS CONTENIDOS EN EL TFM

- Memoria
- Presupuesto
- Planos





UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

Curso Académico:



## ÍNDICE DE LA MEMORIA

1. Prólogo .....	1
2. Antecedentes .....	3
2.1. Situación actual .....	3
2.1.1. Salinidad .....	3
2.1.2. Nitratos y nitritos .....	6
2.1.3. Herbicidas (Pesticidas) .....	11
2.1.4. Situación actual – Comunidad Valenciana .....	17
3. Introducción .....	21
3.1. Técnicas de tratamiento .....	21
3.1.1. Desinfección/Oxidación química .....	21
3.1.2. Adsorción carbón activo .....	22
3.1.3. Intercambio iónico .....	22
3.1.4. Ósmosis inversa .....	23
3.1.5. Electrodialisis .....	25
4. Legislación .....	27
5. Objetivos .....	31
6. Caso de estudio/hipótesis .....	33
6.1. Ubicación .....	33
6.2. Capacidad de la instalación .....	35
6.3. Calidad del agua bruta y calidad del agua tratada .....	36
7. Selección y justificación de la tecnología utilizada .....	39
8. Diseño de la planta potabilizadora .....	43
8.1. Metodología .....	43
8.1.1. Captación y bombeo del agua de pozo .....	43
8.1.2. Línea de conducción a la planta potabilizadora y depósito de alimentación ..	44
8.1.3. Pretratamiento .....	45
8.1.3.1. Selección de etapas de pretratamiento .....	45
8.1.3.2. Selección de equipos de filtración .....	46
8.1.3.3. Selección y cálculo caudal antiincrustante .....	46
8.1.4. Ósmosis inversa .....	47

Diseño de una Potabilizadora para el Tratamiento de Agua con Alto Contenido Salino, Nitratos y Herbicidas para una Población de 20.000 Habitantes

---

8.1.4.1. Definición agua alimento .....	47
8.1.4.2. Caracterización del proceso .....	49
8.1.4.3. Resultados de las simulaciones .....	52
8.1.4.4. Selección de membrana .....	53
8.1.4.5. Configuración final .....	53
8.1.5. Postratamiento .....	54
8.1.5.1. Remineralización .....	54
8.1.5.2. Cloración .....	56
8.1.6. Almacenamiento de agua potable .....	57
8.1.7. Gestión del rechazo y de las aguas de limpieza .....	57
8.1.7.1. Selección opción para la evacuación de las aguas de rechazo y de limpieza .....	57
8.1.7.2. Diseño sistema de gestión y evacuación de las aguas de rechazo y de limpieza .....	57
8.1.8. Limpieza .....	58
8.1.8.1. Limpieza filtros de arena .....	58
8.1.8.2. Limpieza membranas de ósmosis inversa .....	58
8.1.9. Selección de bombas hidráulicas .....	58
8.1.9.1. Selección bombas hidráulicas de impulsión .....	58
8.1.9.2. Selección bombas hidráulicas de dosificación .....	60
8.2. Diseño .....	60
8.2.1. Captación y bombeo del agua de pozo .....	60
8.2.2. Línea de conducción a la planta potabilizadora y depósito de alimentación ..	61
8.2.3. Pretratamiento .....	62
8.2.3.1. Selección de etapas de pretratamiento .....	62
8.2.3.2. Selección de equipos de filtración .....	63
8.2.3.3. Selección y cálculo caudal antiincrustante .....	67
8.2.4. Ósmosis inversa .....	68
8.2.4.1. Definición agua alimento .....	68
8.2.4.2. Caracterización del proceso .....	68
8.2.4.3. Resultados de las simulaciones .....	71
8.2.4.4. Selección de membrana .....	71
8.2.4.5. Configuración final .....	77



8.2.5. Postratamiento .....	81
8.2.5.1. Remineralización .....	81
8.2.5.2. Cloración .....	85
8.2.6. Almacenamiento de agua potable .....	86
8.2.7. Gestión del rechazo y de las aguas de limpieza .....	86
8.2.7.1. Selección opción para la evacuación de las aguas de rechazo y de limpieza .....	86
8.2.7.2. Diseño sistema de gestión y evacuación de las aguas de rechazo y de limpieza .....	87
8.2.8. Limpieza .....	88
8.2.8.1. Limpieza filtros de arena .....	88
8.2.8.2. Limpieza membranas de ósmosis inversa .....	89
8.2.9. Selección de bombas hidráulicas .....	91
8.2.9.1. Selección bombas hidráulicas de impulsión .....	91
8.2.9.2. Selección bombas hidráulicas de dosificación .....	100
9. Conclusiones .....	103
10. Bibliografía .....	107



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Sección hidrogeoquímica .....	5
Figura 2: Procesos antropogénicos y naturales presentes en el ciclo del nitrógeno.....	6
Figura 3: Concentración de nitratos (der.) y exceso de nitrógeno en las fuentes de agua subterránea de la cuenca hidrográfica del río Júcar para el periodo 2010-2012 .....	8
Figura 4: Objetivos medioambientales tras la aplicación de las medidas en las masas de aguas subterráneas con problemas de contaminación química.....	10
Figura 5: Solutos retenidos tecnología de membranas.....	23
Figura 6: Mecanismo ósmosis inversa.....	24
Figura 7: Mecanismo electrodiálisis.....	25
Figura 8: Ubicación 08.127CA001 Pozo de Cañars.....	33
Figura 9: Ubicación parcela planta potabilizadora.....	34
Figura 10: Pantalla “Requisito químico” IMSDesign. ....	46
Figura 11: Metodología para el diseño del sistema de ósmosis inversa.....	47
Figura 12: Pantalla “Análisis” IMSDesign .....	47
Figura 13: Tipos de agua en IMSDesign software .....	48
Figura 14: Pantalla “Diseño” IMSDesign .....	49
Figura 15: Pantalla “Selección de elemento” IMSDesign.....	51
Figura 16: Pantalla “Resultados de Cálculo (Diseño)” IMSDesign.....	52
Figura 17: Pantalla “Postratamiento” IMSDesign cálculo de antiincrustante.....	55
Figura 18: Demanda de cloro .....	56
Figura 19: Pantalla principal buscador de productos y soluciones GRUNDFOS.....	58
Figura 20: Pantalla “Resultado del dimensionamiento” GRUNDFOS.....	59
Figura 21: Pantalla resultados de la selección GRUNDFOS.....	59
Figura 22: Ejemplo filtro de arena DIN Series GRP.....	63
Figura 23: Filtros ECOCART de la empresa EATON Filtration GmbH.....	65
Figura 24: Cartuchos LOFTOP de la empresa EATON Filtration GmbH.....	66
Figura 25: Esquema sistema de ósmosis inversa .....	77
Figura 26: Pantalla “Postratamiento” IMSDesign – dosificación de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .....	82
Figura 27: Sistema de preparación y dilución de lechadas de cal.....	83
Figura 28: Pantalla “Postratamiento” IMSDesign – dosificación de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y de $\text{NaOH}$ .....	84
Figura 29: Pantalla “Postratamiento” IMSDesign – dosificación de $\text{NaOCl}$ .....	85

Diseño de una Potabilizadora para el Tratamiento de Agua con Alto Contenido Salino, Nitratos y Herbicidas para una Población de 20.000 Habitantes

---

Figura 30: Distancia entre la planta potabilizadora diseñada y la EDAR de Moncófar .....	87
Figura 31: Diseño y funcionamiento del depósito decantador .....	88
Figura 32: Instalación para la limpieza de las membranas de ósmosis inversa .....	89
Figura 33: Bomba hidráulica SP de GRUNDFOS .....	92
Figura 34: Bomba hidráulica NB de GRUNDFOS. ....	93
Figura 35: Bomba hidráulica NKE de GRUNDFOS.....	94
Figura 36: Bomba hidráulica NBE de GRUNDFOS. ....	97
Figura 37: Soplante serie GR de AERZEN. ....	98
Figura 38: Bomba de dosificación MINIDOS A 40 de la empresa LUTZ-JESCO.....	101
Figura 39: Bomba de dosificación MAGDOS LP de la empresa LUTZ-JESCO.....	102

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Principales fuentes antropogénicas de nitrógeno inorgánico al agua .....	7
Tabla 2: Valor GUS.....	12
Tabla 3: Propiedades de herbicidas .....	12
Tabla 4: Efectos adversos para la salud causados por clases seleccionadas de plaguicidas (O: oral; R: vía respiratoria; D: dermal/ocular) .....	13
Tabla 5: Artículos de prensa – situación actual de los acuíferos y del agua potable en la Comunidad Valenciana.....	17
Tabla 6: Parámetros indicativos agua destinada al consumo humano (RD 140/2003). .....	27
Tabla 7: Parámetros químicos indicativos agua destinada al consumo humano (RD 140/2003). .....	28
Tabla 8: Requisitos de espacio típicos.....	34
Tabla 9: Consumo de agua potable por habitante y día en 2014 en España y en la Comunidad Valenciana .....	35
Tabla 10: Análisis físico-químico – 080.127CA001 Pozo Cañars. ....	36
Tabla 11: Análisis fungicidas – 080.127CA001 Pozo Cañars.....	36
Tabla 12: Análisis herbicidas – 080.127CA001 Pozo Cañars. ....	36
Tabla 13: Análisis insecticidas y acaricidas – 080.127CA001 Pozo Cañars.....	37
Tabla 14: Valores límite de la composición del agua producto (RD 140/2003) .....	37
Tabla 15: Comparación ósmosis inversa y electrodiálisis .....	39
Tabla 16: Consumo energético medio dependiendo de la salinidad del agua alimento .....	41
Tabla 17: Coste medio de producción de agua de los principales procesos de desalación – agua salobre.....	42
Tabla 18: Resumen comparación ósmosis inversa y electrodiálisis.....	42
Tabla 19: Técnicas para la remineralización del permeado .....	55
Tabla 20: Características recomendadas para las aguas desaladas con un nivel adecuado de remineralización.....	56
Tabla 21: Dimensiones pozo vertical.....	61
Tabla 22: Características técnicas filtros de arena DIN Series GRP.....	63
Tabla 23: Composición del filtro de arena dual a presión DIN Series GRP D <sub>i</sub> 2600 mm. ....	65
Tabla 24: Número mínimo de filtros de cartucho.....	67
Tabla 25: Configuración filtros de cartucho .....	67
Tabla 26: Datos introducidos y calculados - “sistema” .....	68

Diseño de una Potabilizadora para el Tratamiento de Agua con Alto Contenido Salino, Nitratos y Herbicidas para una Población de 20.000 Habitantes

---

Tabla 27: Datos introducidos - “trenes” .....	68
Tabla 28: Datos calculados - “trenes” .....	69
Tabla 29: Membranas recomendadas por IMSDesign. ....	69
Tabla 30: Configuración por tren del sistema de ósmosis inversa.....	70
Tabla 31: Membranas excluidas por Criterio 1 .....	72
Tabla 32: Coste de capital o inversión total para un proyecto de baja complejidad.....	73
Tabla 33: Precio considerado de las membranas.....	74
Tabla 34: Coste de operación y mantenimiento para un proyecto de baja complejidad .....	75
Tabla 35: Coste específico del agua potabilizada.....	76
Tabla 36: Configuración y características de un bastidor del sistema de ósmosis inversa con la membrana ESPA2-LD.....	78
Tabla 37: Composición corrientes del sistema de ósmosis inversa .....	79
Tabla 38: Composición corrientes del sistema de ósmosis inversa – pesticidas. ....	79
Tabla 39: Características y composición del agua producto tras dosificación de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . ....	83
Tabla 40: Características y composición del agua producto tras dosificación de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y de NaOH. ....	84
Tabla 41: Composición agua potable final .....	85

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Evolución temporal de la concentración de nitratos en la masa de agua subterránea Plana de Castellón.....	9
Gráfico 2: Objetivos concentración de nitratos en la Plana de Castellón.....	10
Gráfico 3: Evolución concentración media pesticidas en la Cuenca Hidrográfica del Júcar.....	16
Gráfico 4: Consumo total (en toneladas) de herbicidas en España periodo 2006-2015.....	16
Gráfico 5: Consumo total (en toneladas) de herbicidas en la Comunidad Valenciana periodo 2006-2015.....	17
Gráfico 6: Aspectos del equilibrio $\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{HCO}_3^-$ en el proceso de remineralización del agua osmotizada.....	54
Gráfico 7: Número de filtros de arena dependiendo de la tasa de carga de funcionamiento. ..	64
Gráfico 8: Concentración de nitratos en la corriente de permeado.....	72
Gráfico 9: Coste específico del agua potabilizada.....	76
Gráfico 10: Curva característica y punto de funcionamiento bomba SP 30-5 GRUNDFOS – captación y bombeo de agua de pozo.....	92
Gráfico 11: Curva característica y punto de funcionamiento bomba NB 100-250/205 EUP GRUNDFOS – línea de conducción a la planta potabilizadora.....	93
Gráfico 12: Curva característica y punto de funcionamiento bomba NKE 80-160/161 GRUNDFOS – pretratamiento.....	94
Gráfico 13: Curva característica y punto de funcionamiento bomba NB 80-315/295 GRUNDFOS – ósmosis inversa.....	95
Gráfico 14: Curva característica y punto de funcionamiento bomba NKE 80-160/167 GRUNDFOS – postratamiento.....	96
Gráfico 15: Curva característica y punto de funcionamiento bomba NBE 50-160/167 GRUNDFOS – gestión de rechazo y agua de limpieza.....	97
Gráfico 16: Curva característica y punto de funcionamiento bomba NB 80-200/188 GRUNDFOS – limpieza de los filtros de arena.....	98
Gráfico 17: Capacidad de los soplantes serie GR de AERZEN.....	99
Gráfico 18: Curva característica bomba NB 80-160/177 GRUNDFOS – limpieza de las membranas de ósmosis inversa.....	100
Gráfico 19: Curva característica bomba de dosificación MINIDOS A 40 de la empresa LUTZ-JESCO.....	101
Gráfico 20: Curva característica bomba de dosificación MAGDOS LP 05 de la empresa LUTZ-JESCO.....	102

Diseño de una Potabilizadora para el Tratamiento de Agua con Alto Contenido Salino, Nitratos  
y Herbicidas para una Población de 20.000 Habitantes

---



## **CAPÍTULO 1. PRÓLOGO**

El presente TFM se centra en el desarrollo de una solución de potabilización de agua que dé respuesta a la creciente necesidad actual de aprovechar los recursos hídricos disponibles en zonas con riesgo de desertificación como es el caso de la Comunidad Valenciana. Junto a esta evolución donde los recursos hídricos se ven menguados año a año por la falta de precipitaciones, la contaminación de los recursos hídricos es un problema real y actual que limita el agua dulce disponible para el consumo humano.

Por tanto, este trabajo se centra en dar solución a una problemática real, actual y creciente cuyos tres ejes principales que, a su vez, constituyen los tres grandes problemas de los recursos hídricos subterráneos de la Comunidad Valenciana son:

- Elevada salinidad.
- Alto contenido de nitratos y nitritos.
- Alta concentración de herbicidas y otros pesticidas.

A fin de diseñar una solución que permita la potabilización de un agua que presente estos inconvenientes y permita su consumo por el ser humano es necesario centrar el proyecto en una fuente subterránea de la Comunidad Valenciana que se encuentre en esta situación y, a partir de la solución que se desarrolle y del conocimiento obtenido durante dicho proceso, poder extrapolar los resultados obtenidos a otros casos que presenten situaciones similares a las estudiadas.

Así, este proyecto se centra en el desarrollo de una planta potabilizadora de agua para el municipio de Moncófar (Castellón) puesto que sus recursos hídricos se caracterizan por poseer elevados niveles salinos, alta concentración de nitratos y presencia de herbicidas y otros pesticidas.

También es necesario indicar que la solución aquí desarrollada constituye una aproximación teórica que, para su aplicación real, precisará de actividad experimental en laboratorio y en planta piloto con el fin de conocer de forma verídica y precisa la efectividad de la solución desarrollada a la hora de potabilizar el agua y, en mayor medida, de eliminar/reducir los contaminantes que éste presenta.



## **CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES**

En los últimos años, la elevada presencia de nitratos y herbicidas en el agua amenaza el suministro de una agua potable segura y de calidad en varias poblaciones de la Comunidad Valenciana. Esta situación deriva en la necesidad de obtener una solución integral que permita eliminar o reducir contaminantes típicos de la actividad agrícola e industrial de la zona, como son nitratos y herbicidas, para lograr una agua apta para consumo.

A continuación, se describe la situación actual de las fuentes de captación de agua, así como las características de las diferentes técnicas de tratamiento y potabilización que se considerarán posteriormente en el diseño de la planta potabilizadora objeto de este trabajo.

### **2.1. SITUACIÓN ACTUAL**

La mayor problemática actual de los recursos hídricos es la escasez de agua acompañada por el incremento de su contaminación causada principalmente por la actividad humana y por su excesivo consumo. Esta situación provoca la necesidad de desarrollar e implementar nuevas plantas de potabilización de agua o adaptación de las convencionales y cuyo diseño se centre en la reducción de la concentración de los contaminantes que presenta el agua con el fin de obtener agua apta para el consumo humano.

Los principales contaminantes presentes en los acuíferos de la Comunidad Valenciana y sobre los que se centrará el diseño de la planta potabilizadora de agua objeto del presente proyecto son:

- Salinidad
- Nitratos
- Herbicidas (Pesticidas)

A continuación se describen las características de cada uno de los contaminantes indicados:

#### **2.1.1. Salinidad**

La salinidad en los acuíferos y aguas superficiales se ve alterada por muchas actividades humanas, como actividades agrarias, sobreexplotación de acuíferos y de extracción de recursos, aumentando así la concentración en sales disueltas de los recursos hídricos.

Este aumento en la concentración de sales disueltas en los puntos de extracción de agua para su posterior consumo puede provocar e inducir problemas en la salud humana si ésta no es tratada antes de ser consumida. Los problemas de salud más comunes que se desarrollan al consumir agua con una excesiva concentración salina son:

- Aumento de la hipertensión arterial.

- Empeoramiento de los problemas de corazón y arteriales.
- Aparición de osteoporosis en mujeres tras la menopausia.
- Empeoramiento sobre la salud en personas con úlcera de estómago.

La situación actual en la salinidad de los acuíferos y de las aguas superficiales probablemente empeorará debido a la creciente demanda de agua potable por la población que reduce la capacidad de los recursos hídricos para diluir sales y debido al vertido de efluentes con alta concentración salina. Además, como consecuencia del cambio climático se aumenta la evaporación de agua y se reducen las precipitaciones en algunas regiones que, junto con la sobreexplotación de los recursos hídricos, provoca la intrusión de agua marina tierra adentro en las zonas costeras, aumentando de forma considerable su salinidad.

En el caso de la Comunidad Valenciana, en la Revisión de Tercer Ciclo (2012-2027) del Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar se evaluó, a partir de datos del año 2017, la intrusión marina de las masas de agua costeras mediante el impacto por alteraciones en la dirección del flujo. En este estudio se consideró que una masa de agua subterránea costera está afectada por la intrusión marina cuando la concentración de cloruros supera el 75% del valor umbral (650 mg/l para la masa de agua de la Plana de Castellón) y cuyo índice de explotación (k), calculado como bombeo frente a recurso disponible, sea superior a 0,8.

Los resultados de este estudio indicaron que cinco masas de agua subterránea están actualmente afectadas por intrusión marina ya que cumplen con las dos condiciones expuestas anteriormente, éstas son:

- Plana de Oropesa – Torreblanca
- Plana de Castellón
- Plana de Sagunto
- Plana de Valencia Norte
- Plana de Gandía

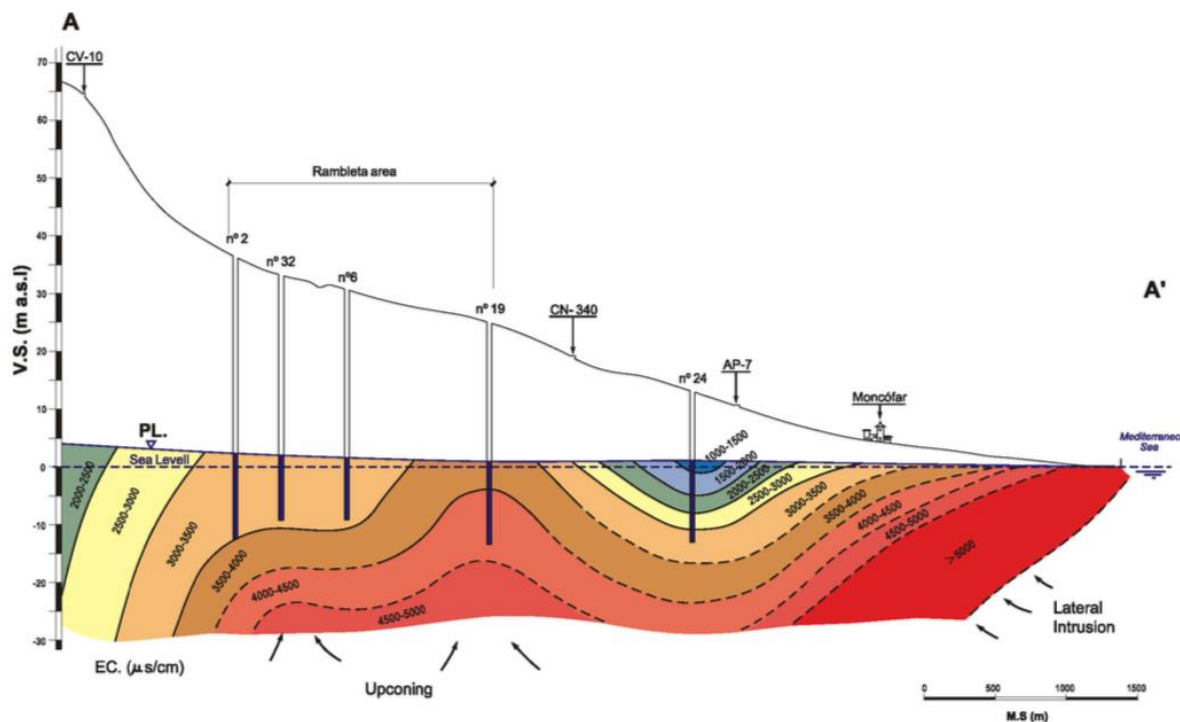
El presente proyecto se centrará en el agua subterránea de la masa de la Plana de Castellón, masa de agua que en los últimos 40 años ha sufrido una severa salinización de sus recursos hídricos a causa de una fuerte intrusión marina. Esta entrada de agua de mar tierra adentro es debido principalmente a la mala gestión de los recursos hídricos subterráneos que ha dado lugar a la construcción de una gran concentración de pozos muy cercanos entre ellos y próximos al mar. Además, la sobreexplotación de estos pozos desde principios de los años 60 ha causado el descenso del nivel freático de la zona, favoreciendo la entrada de agua de mar tierra adentro.

En el 2016, Olga García-Menéndez y *col.* estudiaron la evolución durante los últimos 42 años de la calidad del agua subterránea del área próxima a Moncófar. En este periodo de tiempo la evolución de la calidad del agua subterránea fue la siguiente:

1. Desde el año 1960, la intensa explotación de los pozos provocó la bajada del nivel freático de toda la zona, hecho que facilitó la progresión del agua de mar tierra adentro.

2. En 1984 la calidad de los pozos cercanos a Moncófar se deterioró considerablemente, tanto que la concentración de cloruros de sus aguas llegaron a superar los 2000 mg/L.
3. En 1995 las concentraciones de cloruros continuaban siendo muy elevadas, aunque descendieron de los 2000 mg/L en la zona norte de Moncófar.
4. Tras el periodo húmedo que la zona sufrió entre los años 2002 y 2004 y la mejora en el modelo de gestión del agua subterránea propició la disminución del efecto de intrusión marina.
5. En el año 2012 la intrusión marina aún persistía y las concentraciones de cloruros en la zona de Moncófar se encontraban entre 500 y 750 mg/L.

En la siguiente figura se muestra la distribución de la conductividad del agua subterránea ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) de la zona dependiendo de la profundidad en metros sobre el nivel del mar (m.a.s.l. por sus siglas en inglés) en el año 2013, donde se identifica la población de Moncófar y las carreteras principales que pasan por la zona:



**Figura 1:** Sección hidrogeoquímica. Fuente: (García-Menéndez y col., 2016)

Teniendo en cuenta la sección hidrogeoquímica mostrada en la Figura 1 y obviando la zona entre el mar y Moncófar por la elevada influencia que el agua de mar tiene sobre la conductividad, los rangos de conductividad del agua subterránea para unas profundidades de 5, 10 y 15 metros son:

- Profundidad de 5 m: 2000 – 4000  $\mu\text{S}/\text{cm}$
- Profundidad de 10 m: 2000 – 4500  $\mu\text{S}/\text{cm}$
- Profundidad de 15 m: 2000 – 4500  $\mu\text{S}/\text{cm}$

Como se puede observar, la conductividad del agua subterránea de la zona es muy elevada, lo que indica una gran concentración salina que provoca que según el Real Decreto 140/2003

ésta no sea apta para el consumo humano y, por lo tanto, precisa de un proceso de desalación para que, en términos de salinidad, pueda ser considerada apta para su consumo.

### 2.1.2. Nitratos y nitritos

La contaminación por nitratos, principalmente en aguas subterráneas, ha sido uno de los principales problemas de contaminación del agua en Europa en los últimos 30 años. Las áreas mediterráneas (zonas semiáridas) son especialmente vulnerables a la contaminación por nitratos, ya que en estas áreas un pequeño exceso de nitrógeno produce mayores concentraciones de nitratos que en los países más húmedos porque la recarga del acuífero es menor (Pérez-Martín y col., 2016).

Los nitratos provienen mayoritariamente de la actividad agrícola que, junto a otras actividades antropogénicas, han acelerado el ciclo natural del nitrógeno. Éste comprende un conjunto de transformaciones y procesos de transporte en el suelo que, unido al conjunto de variables que introducen, a las actividades desarrolladas en la superficie del terreno, a la naturaleza de la zona no saturada, al espesor, al tipo de riego, etc. condicionan la incorporación de compuestos de nitrógeno en mayor o menor volumen al flujo subterráneo (Fernández Ruiz, 2007).

El ciclo natural del nitrógeno se presenta en la siguiente figura:

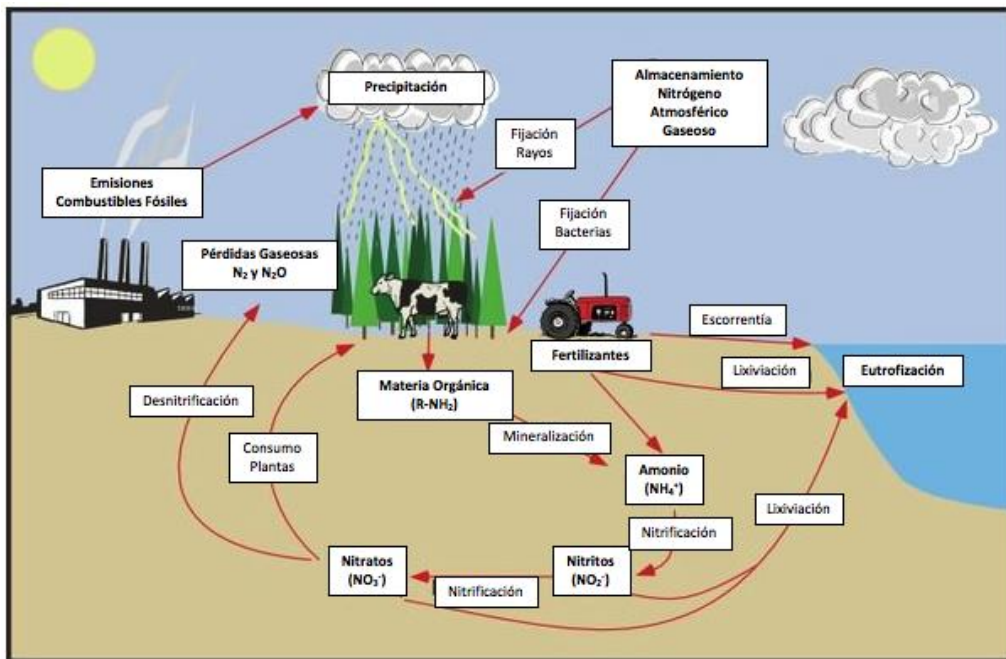


Figura 2: Procesos antropogénicos y naturales presentes en el ciclo del nitrógeno. Fuente: (Pidwirthy, 2006)

En ella se observa que el nitrógeno sufre numerosas transformaciones y procesos de transferencia que dan lugar a sus distintas formas tanto en la atmósfera como en la tierra y en el agua, siendo éste último susceptible a contaminación por una elevada concentración de nitratos y nitritos. Las actividades antropogénicas que provocan la contaminación de aguas por nitrógeno inorgánico se dividen entre fuentes puntuales y fuentes no puntuales.

En la siguiente tabla se muestran las principales fuentes antropogénicas de nitrógeno inorgánico al agua:

**Tabla 1:** Principales fuentes antropogénicas de nitrógeno inorgánico al agua. Fuente: (Camargo y Alonso, 2006)

Fuentes Puntuales
<ul style="list-style-type: none"><li>• Aguas residuales provenientes de actividades ganaderas.</li><li>• Emisiones de nitrógeno procedentes de operaciones de acuicultura.</li><li>• Efluentes municipales de alcantarillado (incluyendo efluentes de EDAR sin tratamiento terciario).</li><li>• Vertidos de agua residual de origen industrial.</li><li>• Lixiviados de vertederos.</li><li>• Desbordamientos de agua de tormentas y agua de alcantarillado sanitario.</li></ul>
Fuentes No Puntuales
<ul style="list-style-type: none"><li>• Cultivo de especies con capacidad de fijar biológicamente el N<sub>2</sub> atmosférico y la posterior movilización del nitrógeno a dominios terrestres, acuáticos y atmosféricos.</li><li>• Uso de estiércol de origen animal y de fertilizantes inorgánicos nitrogenados y su posterior escorrentía durante su uso agrario.</li><li>• Escorrentía de bosques y praderas quemadas.</li><li>• Escorrentía en zonas urbanas con y sin alcantarillado.</li><li>• Lixiviados sépticos y escorrentía de sistemas sépticos fallidos.</li><li>• Escorrentía de zonas en obras y de minas abandonadas.</li><li>• Cargas de nitrógeno a las aguas subterráneas y, consecuentemente, a las masas de agua superficiales (ríos, lagos, rías, zonas costeras) receptoras.</li><li>• Emisiones a la atmósfera de compuestos nitrogenados reducidos (provenientes de la volatilización de estiércol y fertilizantes) y oxidados (provenientes de la combustión de combustibles fósiles) y su consecuente deposición a aguas superficiales.</li><li>• Otras actividades que contribuyen a la movilización del nitrógeno desde depósitos de almacenamiento a largo plazo como es el quemado de biomasa y drenaje de humedales.</li></ul>

La importancia de reducir la concentración de nitratos en el agua destinada para el consumo humano radica en su potencial de generar efectos adversos sobre la salud, divididos principalmente en dos enfermedades:

1. Metahemoglobinemia:

Es una enfermedad inducida por la ingesta de nitritos y nitratos, ya que éstos se reducen en la vía de digestión a nitritos.

Esta enfermedad se caracteriza por la obstrucción de la capacidad de transporte de oxígeno de la hemoglobina, transformándola en metahemoglobina y produciendo cianosis, dolor de cabeza, estupor, fatiga, taquicardias, coma, convulsiones, asfixia y, en el peor de los casos, la muerte.

La población más vulnerable a la intoxicación con nitratos y nitritos y al posterior desarrollo de la metahemoglobinemia son los bebés de menos de 4 meses debido a las siguientes razones:

- Mayor ingesta de líquidos con respecto a su peso corporal que un adulto.
- La hemoglobina fetal de los bebés se oxida con mucha facilidad.
- Reducida actividad de metahemoglobina reductasa, la cual convierte la metahemoglobina en hemoglobina.

- Elevado pH gástrico que permite una mayor presencia de bacterias que reducen los nitratos a nitritos.
- Elevada susceptibilidad a padecer gastroenteritis.

## 2. Cáncer:

La ingesta de nitratos y nitritos contribuye a la formación de compuestos N-nitrosos, los cuales son unos de los compuestos cancerígenos conocidos más potentes para los mamíferos.

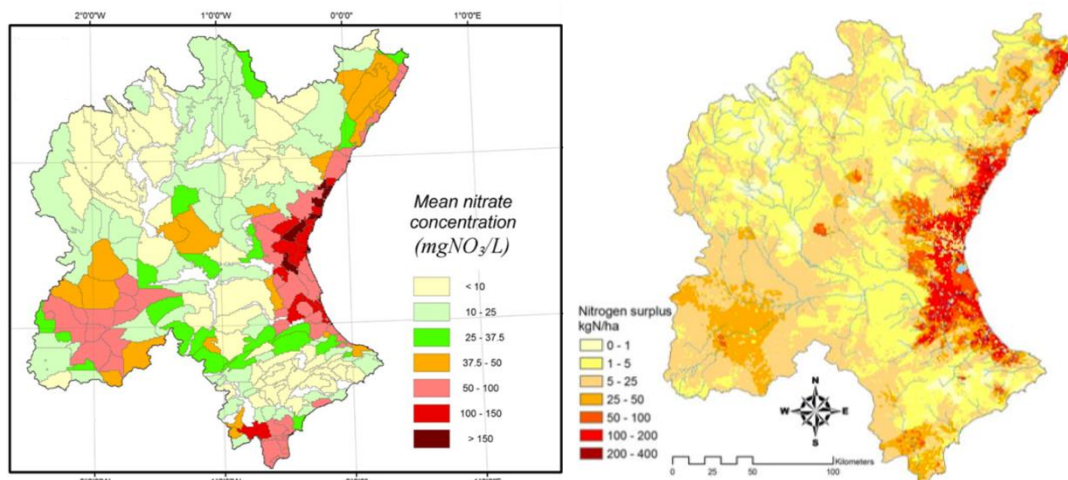
En el caso de las dimetil-nitrosaminas, la aparición de la enfermedad se debe a la ingesta de una elevada dosis de forma puntual o incluso por la ingesta continuada de pequeñas dosis de forma crónica.

Cabe destacar que se han documentado casos de formación endógena de nitrosaminas después de ingerir durante largos periodos de tiempo agua con una concentración de nitratos por debajo de los 10 mg NO<sub>3</sub>-N/L (Townsend *et al.*, 2003).

Debido a todas las enfermedades que la presencia de nitratos y nitritos en el agua potable puede provocar en el ser humano, el RD 140/2003 limita la concentración de nitratos a 50 mg/l y la concentración de nitritos a 0,1 mg/l. Como ya se ha mencionado anteriormente, la razón del menor límite de concentración de nitritos en el agua potable se debe a su elevada toxicidad para la salud humana.

En el caso de la Comunidad Valenciana, la elevada presencia de compuestos inorgánicos de nitrógeno, principalmente nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), es uno de los problemas más importantes de sus acuíferos. Esto es debido a que el nitrógeno puede aparecer en forma de NH<sub>3</sub> y NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y por oxidación, estas formas reducidas pueden transformarse en NO<sub>2</sub><sup>-</sup> y posteriormente NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (de Miguel Fernández & Vázquez Taset, 2006), siendo esta su forma más estable.

Pérez-Martín y *col.* realizó una estimación de las concentraciones de nitratos y del exceso de nitrógeno en las fuentes de agua subterránea para la cuenca del río Júcar para el periodo comprendido entre los años 2010 y 2012, obteniendo los resultados que se muestran en la Figura 3.



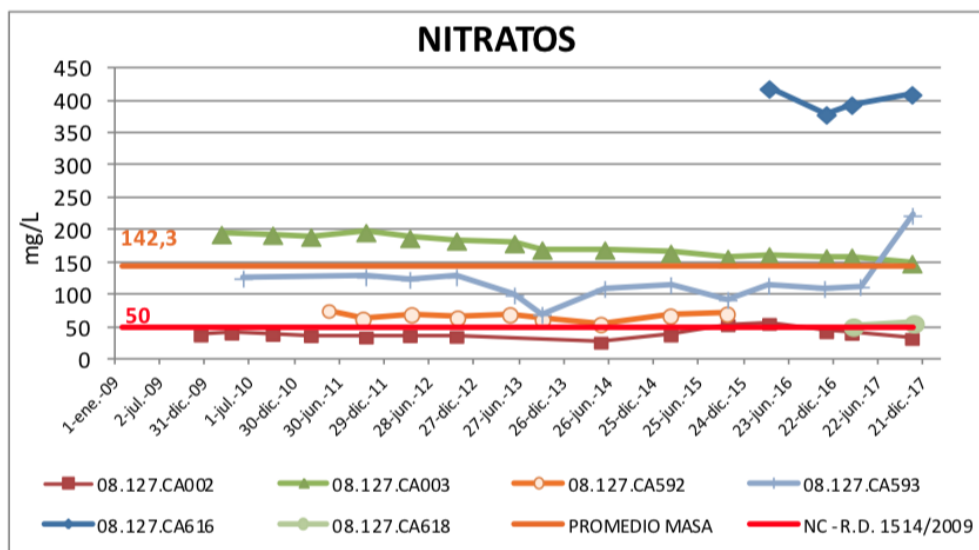
**Figura 3:** Concentración de nitratos (der.) y exceso de nitrógeno en las fuentes de agua subterránea de la cuenca hidrográfica del río Júcar para el periodo 2010-2012. Fuente: (Pérez Martín y *col.*, 2016)



Como se puede observar en la Figura 3, en general, las zonas costeras de la provincia de Valencia y de Castellón presentan concentraciones de nitratos superiores a los 50 mg/l en sus acuíferos subterráneos y la que presenta un mayor exceso de nitrógeno, entorno a 50-200 kgN/ha.

En la Revisión del Tercer Ciclo (2012-2027) del Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar se identificaron las masas de agua subterránea con exceso de concentración de nitratos analizando el periodo comprendido entre los años 2012 y 2017. En él se identificaron 25 masas de agua subterránea que superaban la concentración máxima de nitratos de 50 mg/L, siendo una de ellas la masa de agua de la Plana de Castellón.

La evolución de la concentración de nitratos en los pozos de la masa de agua subterránea de la Plana de Castellón (identificados en la leyenda con su código) desde enero del año 2009 hasta diciembre del año 2017 se muestra en la siguiente figura:

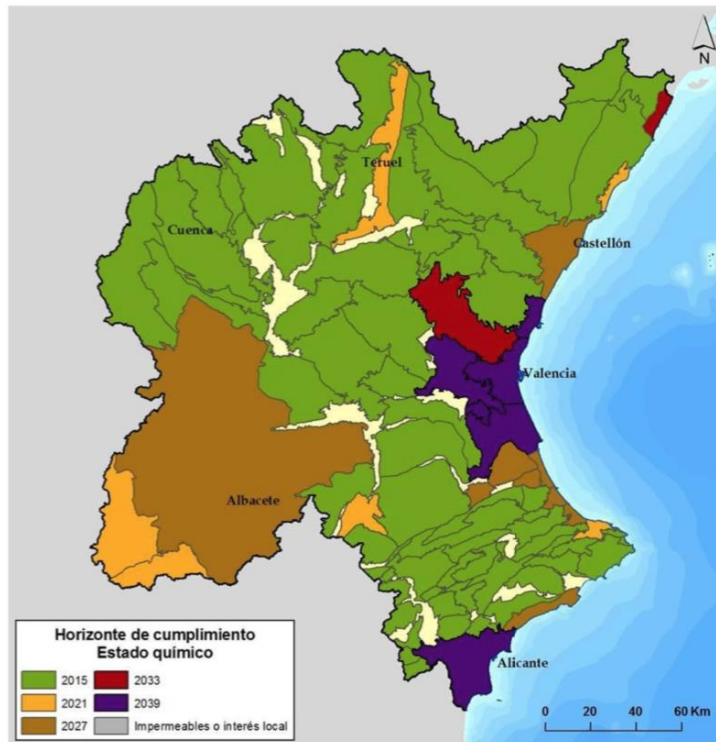


**Gráfico 1:** Evolución temporal de la concentración de nitratos en la masa de agua subterránea Plana de Castellón. Fuente: (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2017)

La concentración de nitratos en la masa de agua subterránea de la Plana de Castellón durante los años 2009 y 2017 no ha sufrido grandes cambios, pues se ha mantenido relativamente constante en este periodo de 8 años con una concentración media de 142,3 mg/L, lo que demuestra la necesidad de tratar el agua para reducir la concentración de nitratos por debajo de los 50 mg/L.

Ante esta situación, la Confederación Hidrográfica del Júcar, a través del Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar para el ciclo 2015-2021, estableció una serie de medidas para reducir la concentración de nitratos en los acuíferos de la cuenca hidrográfica del Júcar y, dependiendo de la situación de cada masa de agua subterránea, determinó los horizontes de cumplimiento para cada una de ellas.

En la siguiente figura se muestran los horizontes de cumplimiento establecidos para mejorar el estado químico de las masas de agua subterránea para la cuenca hidrográfica del río Júcar:



**Figura 4:** Objetivos medioambientales tras la aplicación de las medidas en las masas de aguas subterráneas con problemas de contaminación química. Fuente: (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2015)

Para el caso de la masa de agua subterránea de la Plana de Castellón se espera alcanzar un buen estado químico en términos de concentración de nitratos para el año 2027, siendo la evolución de la concentración de nitratos esperada la siguiente:



**Gráfico 2:** Objetivos concentración de nitratos en la Plana de Castellón. Fuente: (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2015)

Considerando una vida útil de la planta de potabilización de agua de 20 años, se espera que la concentración de nitratos siga una tendencia descendente a causa de la aplicación de las medidas de reducción de aportación de nitratos de la Confederación Hidrográfica del Júcar

hasta llegar a los 50 mg/l en el año 2027 aunque, tal y como se puede observar en el Gráfico 1, la disminución de la concentración de nitratos entre los años 2015 y 2017 no ha sido lo acusada que se esperaba en el Plan Hidrológico por lo que se puede dar el caso en el que el objetivo no se alcance en el año 2027. Aún así, la planta de potabilización que se diseñará en este proyecto deberá ser capaz de tratar elevados niveles de nitratos y deberá estar preparada ante situaciones de contaminación puntuales que aumenten temporalmente su concentración o cambios en la tendencia de la concentración de nitratos en los próximos años motivadas por un posible incremento en el consumo de fertilizantes nitrogenados, fuertes lluvias puntuales que aceleren el transporte de nitratos, etc.

### **2.1.3. Herbicidas (Pesticidas)**

Los pesticidas son un grupo de sustancias artificiales sintéticas empleadas para luchar contra plagas y mejorar la producción agrícola. Estas sustancias son, en general, tóxicas para los organismos vivos con efectos bioacumulativos persistentes y difíciles de degradar, siendo sustancias tóxicas (Ormad y col., 2008).

Los principales grupos de pesticidas que se comercializan en España según el Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (en adelante MAPAMA) son:

- Fungicidas y bactericidas.
- Herbicidas.
- Insecticidas y acaricidas.
- Reguladores de crecimiento y otros.

Los herbicidas, en particular, son un grupo de pesticidas dirigido hacia el control, limitación de crecimiento y eliminación de plantas y hierbas indeseadas, minimizando la erosión del suelo y la escorrentía del agua y mejorando su filtración.

En el ámbito nacional, los herbicidas más consumidos en España son:

- Fenoxifitohormonas.
- Triazinas y triazinonas.
- Amidas y anilidas.
- Carbamatos y bicarbamatos.
- Derivados de dinitroanalina.
- Urea y uracilo.

Existen muchos factores que rigen el potencial de contaminación en aguas subterráneas o superficiales de los herbicidas. Estos factores incluyen: las propiedades del suelo, las propiedades de los herbicidas, la carga hidráulica del suelo y las prácticas de gestión de cosechas (Kerle, E.A. y col., 1996).

Dos de los factores que más influyen en el potencial de contaminación de los herbicidas son su persistencia y movilidad:

- **Persistencia:** La persistencia de un herbicida es su resistencia a la degradación en el medio ambiente (degradación microbiana, degradación química y fotodegradación), cuantificada como la vida media del herbicida.
- **Movilidad:** La movilidad de un herbicida puede resultar en su redistribución en el lugar de aplicación o en su transporte fuera de la zona de aplicación. Los herbicidas se pueden: adsorber a las partículas de tierra, vegetación o a otras superficies y mantenerse cerca de la zona de aplicación, absorber a las partículas de tierra y transportarse mediante escorrentía o viento, disolverse en el agua y ser absorbidos por las plantas o transportarse mediante escorrentía o lixiviación y volatizarse o erosionarse en el follaje o en el suelo debido al viento. La movilidad de un herbicida se cuantifica a través del coeficiente de sorción y de la presión de vapor.

Con el fin de valorar el potencial de un herbicida (pesticida) para alcanzar las masas de agua subterránea se emplea el valor GUS (Groundwater Ubiquity Score) que relaciona la persistencia de los herbicidas (vida media) con su capacidad de sorción en el suelo ( $K_{oc}$ ).

En la siguiente tabla se relaciona el valor GUS con la velocidad de transporte en el suelo del herbicida (pesticida):

**Tabla 2:** Valor GUS.

Valor GUS	Velocidad de transporte
< 0,1	Extremadamente bajo
0,1 – 1,0	Muy bajo
1,0 – 2,0	Bajo
2,0 – 3,0	Moderado
3,0 -4,0	Elevado
> 4,0	Muy elevado

En el caso concreto de las zonas agrarias en las que el cultivo predominante es el naranjo, los herbicidas más empleados son: glifosato, diuron, diquat, bromacil, simazina, linuron, terbutilazina y terbumeton. (de Paz y col., 2006)

El riesgo de lixiviación y, por tanto, el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas de los herbicidas indicados junto con su valor GUS, su vida media ( $T_{1/2}$ ; tiempo necesario para que la mitad del herbicida se descomponga en productos de degradación) y capacidad de sorción en el suelo se presenta en la siguiente tabla:

**Tabla 3:** Propiedades de herbicidas. Fuente: (J.M. de Paz y J.L. Rubio, 2006)

Herbicida	$T_{1/2}$ (días)	$K_{oc}$ (ml/g)	GUS	Riesgo de lixiviación
Terbumeton	300	158	4,46	Alto
Bromacil	60	32	4,44	Alto
Simazina	60	130	3,35	Alto

**Tabla 3:** Propiedades de herbicidas. (Continuación) Fuente: (J.M. de Paz y J.L. Rubio, 2006)

Herbicida	T <sub>1/2</sub> (días)	K <sub>oc</sub> (ml/g)	GUS	Riesgo de lixiviación
Terbutilazina	60	250	2,85	Moderado
Linuron	60	400	2,49	Moderado
Diuron	90	480	2,58	Moderado
Glifosato	47	24.000	-0,64	Bajo
Diquat	1000	1.000.000	-6,00	Bajo

Como se puede observar en la tabla anterior, los tres herbicidas que por su baja capacidad de sorción en la tierra, su moderada y elevada vida media y su elevado riesgo de lixiviación muestran el mayor potencial de contaminar los recursos hídricos subterráneos son el terbumeton, el bromacil y la simazina. En el lado contrario, los dos herbicidas que presentan un menor riesgo de contaminar el agua subterránea son el glifosato y el diquat.

El uso de pesticidas en la agricultura y en actuaciones de control de plagas constituye una amenaza para la calidad del agua destinada a consumo humano debido a que estas sustancias son capaces de atravesar las distintas capas de la tierra y, por tanto, contaminar las aguas superficiales y subterráneas que se encuentren en las zonas donde se emplean.

Dependiendo de la tipología y origen químico del herbicida los efectos adversos sobre el ser humano son diferentes. En 2008, la Organización Mundial de la Salud clasificó los diferentes herbicidas y otros pesticidas según sus efectos adversos sobre la salud humana y la vía de exposición (O = oral, R = vía respiratoria, D = dermal/ocular). En la siguiente tabla se presenta dicha clasificación:

**Tabla 4:** Efectos adversos para la salud causados por clases seleccionadas de plaguicidas (O: oral; R: vía respiratoria; D: dermal/ocular). Fuente: (Thundiyil y col., 2008)

Clase Química	Ejemplos	Efectos sobre la salud	Vía de Exposición
Arsénicos	Trióxido de arsénico, CCA, arseniato de sodio	Dolor abdominal, náuseas, vómitos, olor a ajo, sabor metálico, diarrea sanguinolenta, dolor de cabeza, mareos, somnolencia, flojera, letargo, delirio, shock, insuficiencia renal y neuropatía.	O, R, D
Boratos (insecticida)	Ácido bórico, borax	Irritación de las vías respiratorias superiores, dolor abdominal, náuseas, vómitos, diarrea, dolor de cabeza, letargo, temblores e insuficiencia renal.	O,R, D
Carbamatos (insecticida)	Carbaril, thiram, aldicarb, mercabam	Malestar, debilidad, mareos, sudores, dolor de cabeza, salivación, náuseas, vómitos, diarrea, dolor abdominal, confusión, disnea, dermatitis y edema pulmonar.	O, D
Compuestos clorofenoxi (herbicida)	Ácido di/tri-clorofenoxiacético, MCPP	Irritación de las vías respiratorias superiores y de las mucosas, dolor abdominal, vómitos, diarrea, taquicardia, debilidad, espasmos musculares, coma, acidosis, hipotensión, ataxi, hipertonia, convulsiones, irritación dermal, dolor de cabeza, confusión y taquicardia.	O, D
Calciferol (raticida)	Colecalciferol, ergocalciferol	Fatiga, anorexia, debilidad, dolor de cabeza, náuseas, poliuria, polidipsia, lesión renal e hipercalcemia.	O
Cloralosa	Cloralosa	Vómitos, vértigo, temblores, mioclonus, fasciculaciones, confusión y convulsiones.	O

Diseño de una Potabilizadora para el Tratamiento de Agua con Alto Contenido Salino, Nitratos y Herbicidas para una Población de 20.000 Habitantes

**Tabla 4:** Efectos adversos para la salud causados por clases seleccionadas de plaguicidas (O: oral; R: vía respiratoria; D: dermal/ocular). (Continuación) Fuente: (Thundiyl y col., 2008)

Clase Química	Ejemplos	Efectos sobre la salud	Vía de Exposición
Compuestos de cobre (fungicidas)	Acetato de cobre, oleato de cobre	Dolor abdominal, vómitos, irritación dermal, irritación de la mucosa y de las vías respiratorias, disfunción renal y coma.	O, R, D
Cumarinas (rodenticida)	Brodifacoum, warfarin, pindone	Equimosis, epistaxis, sangrado excesivo, hematuria, tiempo prolongado de protombina, sangrado intracraneal, anemia, fatiga y disnea.	O, D
Dietiltoluamida (insecticida)	DEET	Dermatitis, irritación ocular, dolor de cabeza, agitación, ataxia, confusión, convulsiones y urticaria.	O, D
Dipiridilo (herbicida)	Paraquat, diquat	Irritación de la mucosa y del sistema respiratorio, dolor abdominal, diarrea, vómitos, hemorragia gastrointestinal, edema pulmonar, dermatitis, daño renal y hepático, coma y convulsiones.	O, D
Fosfonatos (herbicida)	Glifosato	Irritación de las vías respiratorias, la piel y las mucosas, dolor abdominal, náuseas, vómitos, shock, disnea e insuficiencia respiratoria.	O, R
Fluoroacetato (rodenticida)	Fluoroacetato de sodio	Vómitos, parestesias, temblores, convulsiones, alucinaciones, coma, confusión, arritmias, hipertensión e insuficiencia cardíaca.	O, D
Mercurio, orgánico (fungicida)	Metilmercurio	Gusto metálico, parestesias, temblor, dolor de cabeza, debilidad, delirio, ataxia, cambios visuales, dermatitis y disfunción renal.	O, R, D
Fosfuros metálicos (rodenticida, fumigante)	Fosfuros de zinc, aluminio, magnesio	Dolor abdominal, diarrea, acidosis, shock, ictericia, parestesias, ataxia, temblores, coma, edema pulmonar, tetania e irritación dérmica.	O, R, D
Halocarbonos (fumigante)	Bromuro de metilo	Irritación de la piel, vías respiratorias y mucosas, tos, disfunción renal, confusión, convulsiones, coma y edema pulmonar.	O, R, D
Nitrofenólicos y nitrocresólicos (herbicida)	Dinitrofenol, dinitrocresol, dinoseb, dinosarn	Sudoración, fiebre, confusión, malestar general, inquietud, taquicardia, tinción amarilla de la piel, convulsiones, coma, insuficiencia renal y daño hepático.	O, R, D
Organoclorados (insecticida)	Aldrin, dieldrina HCB, endrina, lindano	Cianosis, excitabilidad, mareos, dolor de cabeza, inquietud, temblores, convulsiones, coma, parestesias, náuseas, vómitos, confusión, temblor, arritmias cardíacas y acidosis.	O, R, D
Organofosfatos (insecticida)	Malatión, paratión, diclorvos, clorpirifos	Dolor de cabeza, mareos, bradicardia, debilidad, ansiedad, sudoración excesiva, fasciculaciones, vómitos, diarrea, calambres abdominales, disnea, miosis, parálisis, salivación, lagrimeo, ataxia, edema pulmonar, confusión e inhibición de la acetilcolinesterasa.	O, D
Organoestaño (fungicida)	Acetato de fentina, cloruro de fentina	Irritación de las vías respiratorias, la piel y las mucosas, dermatitis, salivación, delirio, dolor de cabeza, vómitos y mareos.	O, R, D
Derivados fenólicos (fungicida)	Pentaclorofenol, dinitrofenol	Irritación de la piel, vías respiratorias y mucosas, dermatitis, disnea, diaforesis, urticaria, taquicardia, dolor de cabeza, dolor abdominal, fiebre y temblores.	O, R, D

**Tabla 4:** Efectos adversos para la salud causados por clases seleccionadas de plaguicidas (O: oral; R: vía respiratoria; D: dermal/ocular). (Continuación) Fuente: (Thundiyil y col., 2008)

Clase Química	Ejemplos	Efectos sobre la salud	Vía de Exposición
Piretrinas, Piretroides	Alletrin, ciflutrina, permetrina	Reacciones alérgicas, anafilaxis, dermatitis, parestesias, sibilancias, convulsiones, coma, edema pulmonar, diarrea y dolor abdominal.	R, D
Estricnina (rodenticida)	Estricnina	Rigidez muscular, opistótono y rabdomiólisis.	O
Talio (rodenticida)	Sulfato de talio	Dolor abdominal, náuseas, vómitos, diarrea sanguinolenta, dolor de cabeza, debilidad, lesión hepática, pérdida del cabello, parestesias, neuropatía, encefalopatía e insuficiencia cardíaca.	O
Triazinas (herbicidas)	Atrazina, prometrina	Irritación de la membrana mucosa, ocular y dérmica.	O, R, D

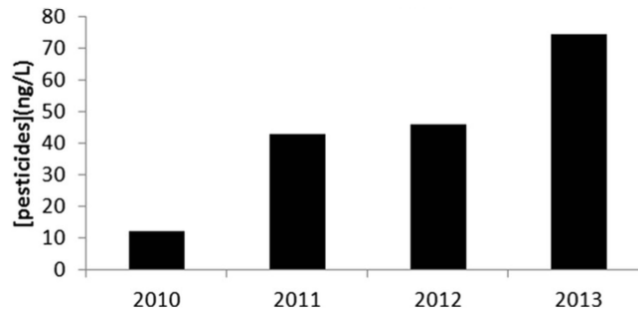
Como se puede observar, todos los herbicidas y demás pesticidas pueden causar efectos adversos sobre la salud humana cuando se ingieren por vía oral, como lo es la ingesta de agua. Es por ello que concentraciones elevadas de herbicidas (pesticidas) en el agua de consumo humano es un origen potencial de intoxicaciones.

Atendiendo a la Comunidad Valenciana, según la Revisión del Tercer Ciclo (2012-2027) del Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar existen 3 masas de agua subterránea que presentan concentraciones elevadas de pesticidas en el periodo comprendido entre el año 2012 y 2017, éstas son: Maestrazgo, Plana de Castellón y Sierra de las Agujas.

Una de las masas de agua subterránea que presenta un mal estado por contaminación por pesticidas es la masa objetivo del proyecto: la Plana de Castellón. Esto indica que en la zona de la Plana de Castellón se realiza un consumo excesivo de pesticidas y/o los métodos empleados para su uso y aplicación no son adecuados.

En 2017, Alfonso Menchen y col. realizaron un estudio de la contaminación de los acuíferos subterráneos de la cuenca hidrográfica del río Júcar analizando datos obtenidos durante el periodo comprendido entre los años 2010 y 2013 concluyendo que los pesticidas más comunes en esta zona son herbicidas de triazina (terbutilazina, bromacilo, simazina, etc.) cuyo GUS es mayor de 2 (a excepción de prometrina) y, por lo tanto, son herbicidas con una gran capacidad de lixiviación y una elevada tasa de detección en las aguas de los acuíferos.

A continuación, se muestra la evolución de la concentración media de pesticidas en la cuenca hidrográfica del río Júcar entre los años 2010 y 2013:

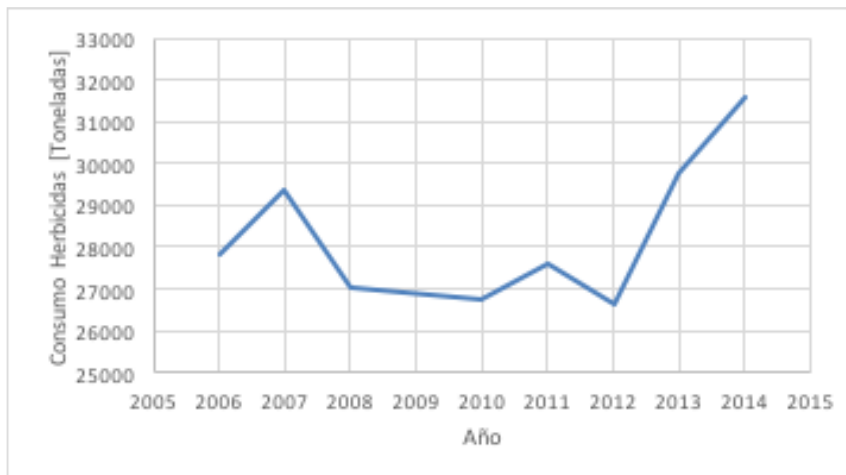


**Gráfico 3:** Evolución concentración media pesticidas en la Cuenca Hidrográfica del Júcar. Fuente: (Menchen y col. , 2017)

En el anterior gráfico se puede observar un claro aumento de la presencia de pesticidas en las aguas subterráneas de la Cuenca Hidrográfica del Júcar, lo que justifica la necesidad de tratar dicha agua con el fin de que pueda ser empleada para el consumo humano.

Además, un indicador directo de la fluctuación de la cantidad de herbicidas presente en los acuíferos donde se extrae el agua de consumo humano, es el consumo agrícola de herbicidas durante los últimos años.

En los siguientes gráficos se muestra la variación del consumo agrícola de herbicidas en España y en la Comunidad Valenciana durante el período temporal comprendido entre el 2006 y el 2015:

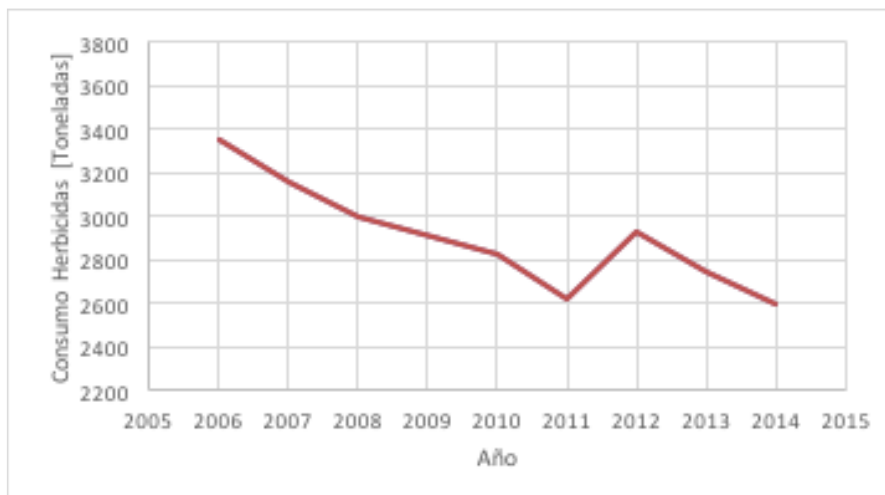


**Gráfico 4:** Consumo total (en toneladas) de herbicidas en España periodo 2006-2015. Fuente: (Instituto Aragonés de Estadística)

Como se observa en el Gráfico 4, el consumo total de herbicidas en España ha ido aumentando desde el año 2011 (con un consumo de 13.835 toneladas) hasta el año 2014 (con un consumo de 14.909 toneladas), indicando una mayor aportación a la tierra y, consiguientemente, al agua superficial y subterránea de esta sustancias contaminantes. Aunque ha habido fluctuaciones en el consumo, la variación final en el consumo de fertilizantes en el territorio español es al alza.



El Gráfico 5, muestra la situación en la Comunidad Valenciana de consumo de herbicidas en el mismo periodo.



**Gráfico 5:** Consumo total (en toneladas) de herbicidas en la Comunidad Valenciana periodo 2006-2015.  
Fuente: (Instituto Aragonés de Estadística)

Desde el año 2006 el consumo agrícola de herbicidas ha ido disminuyendo de forma paulatina, con un consumo de 3349,64 toneladas en 2006 y un consumo de 2596,60 toneladas en 2014. Aunque el consumo de herbicidas haya disminuido, la aportación de estas sustancias a la tierra y, consiguientemente, a las aguas superficiales y subterráneas de la zona continua a lo largo del tiempo y sigue siendo muy elevada, indicando un elevado riesgo de contaminación de los recursos hidrográficos de la Comunidad Valenciana.

#### 2.1.4. Situación actual – Comunidad Valenciana

La problemática de la elevada concentración de nitratos y herbicidas en el agua potable de la Comunidad Valenciana que la convierten en agua no apta para el consumo humano se refleja en artículos de prensa, que en la siguiente tabla se han recopilado para ilustrar dicha problemática:

**Tabla 5:** Artículos de prensa – situación actual de los acuíferos y del agua potable en la Comunidad Valenciana.

AÑO	CONTAMINANTE	FUENTE	TÍTULO	RESUMEN
2015	Herbicidas	Levante	Gandía instala filtros en las potabilizadoras de agua al hallar la presencia de herbicidas	Ante la presencia de herbicidas en el agua a potabilizar de Gandía, este municipio decide instalar dos filtros de carbón activo con el fin de eliminar os herbicidas del agua.
	Nitratos	Levante	La Unión Europea ya investiga la contaminación del agua de la Ribera	La UE investiga el posible incumplimiento de la normativa comunitaria de calidad de agua para consumo humano debido a la elevada presencia de nitratos.
			El agua que abastece a una urbanización de Torrent triplica el nivel de nitratos	El agua utilizada por varias zonas residenciales proviene de un pozo de riego con una elevada concentración de nitratos.

Diseño de una Potabilizadora para el Tratamiento de Agua con Alto Contenido Salino, Nitratos y Herbicidas para una Población de 20.000 Habitantes

**Tabla 5: Artículos de prensa – situación actual de los acuíferos y del agua potable en la Comunidad Valenciana. (Continuación)**

AÑO	CONTAMINANTE	FUENTE	TÍTULO	RESUMEN
2016	Salinidad	Las Provincias	El agua extraída del pozo de Xeraco no se puede beber por su salinidad	El agua extraída del pozo que se perforó en la partida de l'Arcà de Xeraco presenta valores elevados de sodio, cloruros y sulfatos, lo que hace indicar una moderada salinidad del agua.
	Herbicidas	Levante	Gandía invierte dos millones para eliminar herbicidas del agua potable	Gandía instalará unos filtros de carbón activo en las dos plantas de potabilización de agua para eliminar los herbicidas del agua potable.
	Nitratos	ABC	Un estudio alerta de la contaminación en aguas subterráneas por el uso de un fertilizante en Valencia	El empleo excesivo de gallinasa en la huerta valenciana contamina las aguas de la zona debido a la lixiviación de nitrato proveniente de la mineralización del nitrógeno orgánico de este tipo de fertilizantes.
		Las Provincias	Vecinos de Real de Gandía llevan 30 años con agua que duplica el nivel de nitratos	El agua potable de Real de Gandía posee una concentración de nitratos de 94 mg/l, casi el doble que los valores marcados por la OMS.
		Levante	Les Corts investigan la contaminación del agua de la Ribera	Los problemas hídricos de la Ribera (exceso de nitratos en sus acuíferos) dan el salto a la política autonómica.
	Náquera declara no apta para bebés ni embarazadas el agua que consumen 1.500 vecinos de la población		El exceso de nitratos en el agua potable de varias zonas de nitratos no la hacen apta para su consumo por embarazadas y bebés.	
Nitratos / Herbicidas	Las Provincias	Los nitratos y plaguicidas ponen en jaque los acuíferos valencianos	Más de 20 acuíferos de la demarcación hidrográfica del Júcar poseen elevadas concentraciones de nitratos y plaguicidas.	
2017	Nitratos	Levante	El agua de trece municipios de la Costera supera el umbral de nitratos	Trece municipios de la Costera se mantienen en la «lista negra» de zonas vulnerables a la contaminación por la presencia excesiva de niveles de nitratos de origen agrario en las masas de agua subterráneas de la Foia de Xàtiva y la Serra de les Agulles.
		Las Provincias	El Consorci de la Ribera inicia un proyecto para reducir el nivel de nitratos del agua	Con 'Life libernitrate' se pretende implementar un sistema sostenible e innovador basado en la utilización de filtros de silicio activo provenientes de las cenizas producidas por la combustión controlada de la paja del arroz.

Diseño de una Potabilizadora para el Tratamiento de Agua con Alto Contenido Salino, Nitratos y Herbicidas para una Población de 20.000 Habitantes

**Tabla 5: Artículos de prensa – situación actual de los acuíferos y del agua potable en la Comunidad Valenciana. (Continuación)**

AÑO	CONTAMINANTE	FUENTE	TÍTULO	RESUMEN
2018	Nitratos	Levante	Más de la mitad de los municipios tienen exceso de nitratos en el agua	Agricultura indica las zonas vulnerables a la contaminación por fuentes agrarias. En el caso de aguas subterráneas, existen 290 municipios de la Comunidad Valenciana afectados.
		Las Provincias	Carlet se suma al proyecto de nuevo abastecimiento de agua potable sin nitratos	El objetivo es garantizar el suministro de agua potable para más de veinte años y obtener agua de calidad, evitando el alto índice de nitratos existentes en las aguas subterráneas.
	Nitratos / Herbicidas	Levante	Más de 200.000 valencianos viven en zonas con agua contaminada por nitratos	Unas 453 captaciones de agua subterránea para producción de agua potable (especialmente en las comarcas más cercanas a la costa) se encuentran afectadas por nitratos o plaguicidas químicos como herbicidas e insecticidas
			La contaminación del agua por residuos agrícolas ya se extiende a toda la Safor	Un estudio realizado por la Confederación Hidrográfica del Júcar constata que hay 18 masas de agua subterránea en la Comunidad Valenciana que se encuentran afectadas por la presencia de nitratos y herbicidas.
2019	Nitratos	La Razón	Más de doscientos mil valencianos siguen bebiendo agua con nitratos	Según las estimaciones más recientes que son del año 2016, todavía hay 206.000 valencianos en la Comunitat que siguen bebiendo agua con alto contenido de nitratos, concretamente en concentraciones de más de 50 miligramos por litro.
		Las Provincias	La contaminación por nitratos amenaza ya tres parques naturales de la Comunitat	Las masas de agua contaminadas por nitratos continúan aumentando y son ya 33 las que han sido identificadas en la Comunitat Valenciana.
	Herbicidas	Las Provincias	Los ecologistas denuncian que la administración autoriza el uso de pesticidas prohibidos	Cifran en 365 los permisos excepcionales concedidos entre 2013 y 2017 y recuerdan que son productos nocivos para el medio ambiente y la salud.
	Nitratos/Herbicidas	Euronews	Cómo la agricultura irresponsable ha envenenado los recursos hídricos de España	Casi la mitad de las reservas de agua subterráneas de España están contaminadas, según el Ministerio para la Transición Ecológica.

Como se puede observar en la Tabla 5, la salinidad y elevada concentración de nitratos y la presencia de plaguicidas es un problema actual que se debe de solucionar mediante técnicas de potabilización de agua con el fin de obtener un agua potable apta para el consumo humano.



## **CAPÍTULO 3. INTRODUCCIÓN**

### **3.1. TÉCNICAS DE TRATAMIENTO**

Existen numerosas técnicas de tratamiento de contaminantes del agua que permiten reducir su concentración hasta niveles considerados como seguros para el consumo humano o incluso hasta concentraciones muy por debajo de las marcadas por la legislación (ver Capítulo 4 LEGISLACIÓN).

Las principales técnicas de tratamiento de agua para la eliminación o reducción de la concentración de nitratos y herbicidas y/o para reducir la salinidad son:

- Desinfección/oxidación química.
- Adsorción con carbón activo.
- Intercambio iónico.
- Ósmosis inversa.
- Electrodialisis.

A continuación se describen las principales características de las técnicas de tratamiento de agua enunciadas:

#### **3.1.1. Desinfección/Oxidación Química**

La desinfección es el proceso por el cual se inactivan o destruyen patógenos (p.e. bacteria, algas, esporas, virus, etc.) en el agua (Hetrick y *col.*, 2011). Este proceso, mediante oxidación, es capaz de eliminar o transformar compuestos orgánicos sintéticos tóxicos como herbicidas, medicinas, combustibles, etc., siendo los dos desinfectantes químicos con mayor potencial de oxidación de pesticidas el ozono (O<sub>3</sub>) y el cloro (p.e. NaClO).

Las sustancias químicas que se emplean en el proceso de potabilización de agua para consumo humano son: cloro, dióxido de carbono, permanganato y ozono.

Es importante destacar que los desinfectantes empleados para el tratamiento de agua deben poseer un alto poder bactericida a altas y bajas temperaturas y no deben de ser sustancias tóxicas.

Aunque la desinfección/oxidación química es capaz de eliminar o transformar pesticidas, esta técnica no es capaz de eliminar ni la salinidad del agua alimento ni la concentración de nitratos y, por tanto, ésta no es adecuada para el tratamiento de una agua que agrupe estos tres contaminantes.

### 3.1.2. Adsorción carbón activo

Las técnicas de adsorción para el tratamiento de aguas se emplean para el control del olor y sabor y para la eliminación de compuestos orgánicos sintéticos, metales tóxicos y cloro. Dentro de estas técnicas de adsorción se encuentra la adsorción con carbón activo, la cual se caracteriza por su elevado ratio área superficial – masa.

La adsorción es una operación de transferencia de masa en la que sustancias presentes en una fase líquida son adsorbidas en la superficie de un sólido, separándose del líquido tratado.

Existen dos tipologías de carbón activo:

- Carbón activo en polvo (PAC): se añade directamente al agua a tratar, por lo que puede ser empleado en varias de las etapas de potabilización de agua de la planta. Este carbón activo se separa del agua tratada mediante sedimentación o filtración.
- Carbón activo granular (GAC): se emplea habitualmente entre la etapa de filtración y la etapa de post-desinfección mediante un lecho fijo.

La capacidad de adsorción del carbón activo en la eliminación de pesticidas (herbicidas) está afectada por la concentración, temperatura, pH, competición entre otros contaminantes o materia orgánica, tiempo de contacto, modo de tratamiento y las propiedades físicas/químicas del contaminante (J. Hetrick *et al.*, 2011).

La eficacia en la eliminación de pesticidas mediante adsorción con carbón activo según el estudio realizado por M.P. Ormad *et al.* (2008) es de un 75% y su eficacia para la eliminación de herbicidas es de un 63% empleando un carbón activo con un área superficial de 1000 m<sup>2</sup>/g y un tamaño de partícula de 40 µm. Por el contrario, esta tecnología de tratamiento de aguas no es capaz de eliminar ni la conductividad del agua alimento ni los nitratos presentes en ella y, por lo tanto, no se considerará para el diseño de la planta potabilizadora de agua objeto de este proyecto.

### 3.1.3. Intercambio iónico

El intercambio iónico es un proceso utilizado para eliminar componentes iónicos disueltos que pueden causar problemas estéticos y de salud. (Crittenden *et al.*, 2012) Este proceso es ampliamente utilizado, principalmente en pequeñas instalaciones domésticas, para el ablandamiento y desmineralización del agua. En el caso de grandes instalaciones, esta tecnología se emplea comúnmente como pretratamiento del agua empleada en grandes equipos como lo son las calderas industriales y los lava-coches con el fin de evitar la formación de incrustaciones. Incluso, en aquellas implicaciones donde es necesario emplear un agua ultrapura, como es el caso del sector farmacéutico, la tecnología de intercambio iónico es adecuada por si sola o como tratamiento de afino tras una Ósmosis inversa.

Dependiendo de la naturaleza del ion que elimina de la corriente de agua a tratar las resinas de intercambio iónico se pueden dividir entre resinas catiónicas y resinas aniónicas:

- Resinas catiónicas: resinas de intercambio de iones con carga positiva empleadas principalmente para el ablandamiento del agua (eliminación de cationes Mg<sup>2+</sup> y Ca<sup>2+</sup>), dealcalinización y eliminación de bario y radio.

- **Resinas aniónicas:** resinas de intercambio de iones con carga negativa empleadas para la eliminación de nitratos, fluoruros, percloratos, arsénico, cromo, fosfatos, sulfatos y tiocianatos.

En el caso de la reducción de la salinidad del agua, la tecnología de intercambio iónico no es adecuada para dicho fin, pues en ella se sustituyen los iones a separar del agua por otros no contaminantes y/o inocuos, siendo en muchos casos los iones que la resina devuelve al agua tratada son los iones  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$ . Por tanto, en ningún momento se consigue reducir la salinidad del agua ya que no se eliminan iones, sino que se sustituyen iones manteniendo en gran medida su salinidad inicial. Además, esta tecnología únicamente se emplea para tratar aguas con salinidad baja, puesto que si la concentración de sales es elevada el tiempo de ruptura de las columnas de intercambio es muy corto, encareciendo e imposibilitando su empleo.

Además, para el caso de eliminación de pesticidas la tecnología de intercambio iónico no es adecuado, por lo que únicamente se podría emplear esta para la eliminación de nitratos.

### 3.1.4. Ósmosis inversa

La ósmosis inversa (OI) es un proceso de membranas densas semipermeables que permite que el solvente de una disolución sea capaz de atravesarla, reteniendo iones monovalentes como sales y otros solutos de bajo peso molecular. Esta técnica precisa de un aporte de presión al flujo alimento que permita superar la presión osmótica de la disolución y que, por tanto, fuerce el paso del agua (en el caso de disoluciones acuosas) a través de la membrana mediante el mecanismo de disolución-difusión.

Cabe destacar que la ósmosis inversa es el proceso por membranas que mayor selectividad posee, asimismo, también es el proceso de membranas que mayor aporte de presión necesita.

La tipología de los solutos que la ósmosis inversa es capaz de separar de la disolución alimento se muestran en la siguiente figura:

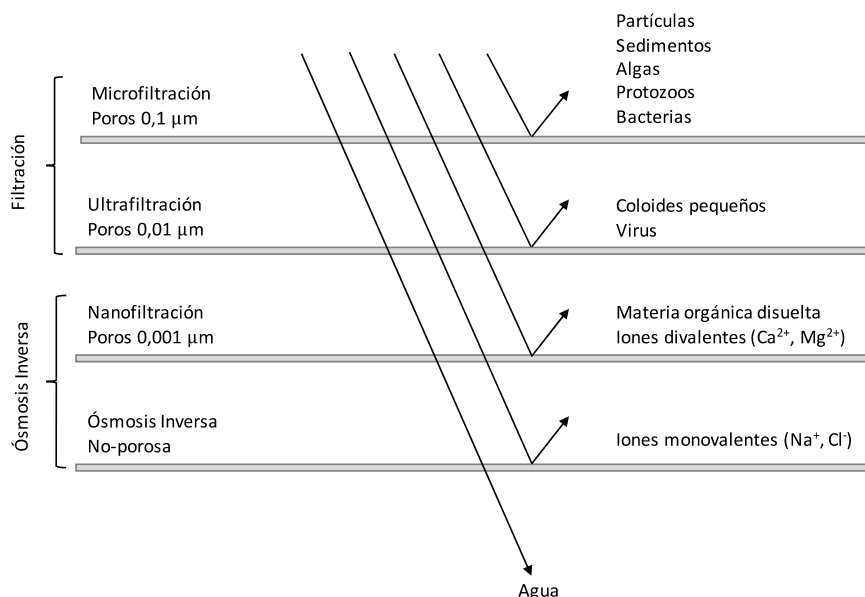


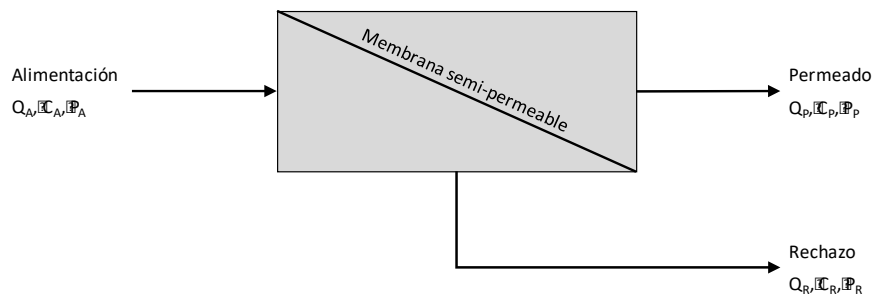
Figura 5: Solutos retenidos tecnología de membranas. Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, la ósmosis inversa es capaz de retener tanto materia orgánica disuelta (herbicidas) como especies monovalentes (nitratos y sales).

Existen tres tipos de corrientes en la operación de ósmosis inversa:

- Alimento: Corriente de la disolución que se quiere tratar.
- Permeado: Flujo de la disolución que ha atravesado la membrana densa, con concentraciones de solutos inferiores a la corriente alimento.
- Rechazo: Corriente de la disolución que no ha permeado por la membrana densa, la cual contiene componentes impermeables de la disolución.

En la siguiente figura se muestran las corrientes indicadas:



**Figura 6:** Mecanismo ósmosis inversa. Fuente: Elaboración propia.

Las principales ecuaciones que caracterizan un sistema de ósmosis inversa son:

- Balace de materia global:

$$Q_A = Q_P + Q_R \quad (1)$$

- Balace de materia de soluto:

$$Q_A \cdot C_A = Q_P \cdot C_P + Q_R \cdot C_R \quad (2)$$

- Conversión:

$$Y = \frac{Q_P}{Q_A} \quad (3)$$

- Rechazo:

$$R = 1 - \frac{C_P}{C_A} \quad (4)$$

Donde:

$Q_A, Q_P, Q_R$ : Caudal de alimento, permeado y rechazo respectivamente (en  $m^3$ ).

$C_A, C_P, C_R$ : Concentración de alimento, permeado y rechazo respectivamente (en ppm).

Y: Conversión (en %).

R: Rechazo (en %).



Finalmente, la ósmosis inversa precisa de una etapa de pretratamiento que acondicione el agua alimento a unas condiciones de calidad mínimas que permitan el correcto funcionamiento de las membranas y de una etapa de postratamiento para adecuar el agua de permeado al uso final al que vaya a ser destinada.

### 3.1.5. Electrodialisis

La electrodialisis consiste en un proceso de separación electroquímica en el que los iones atraviesan las membranas de intercambio impulsados por el voltaje de la corriente directa (CC). [GE Power & Water]

Una celda de electrodialisis consta de una serie de membranas catiónicas y aniónicas intercaladas entre dos electrodos positivos y negativos, tal y como se observa en la siguiente figura:

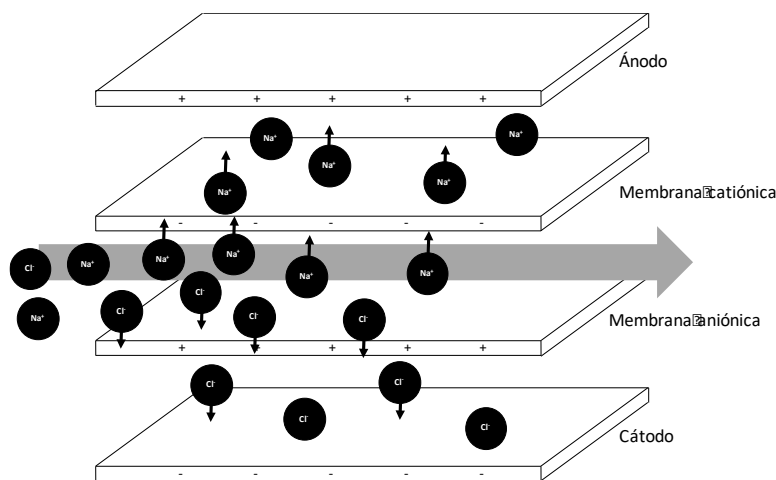


Figura 7: Mecanismo electrodialisis. Fuente: Elaboración propia.

Con el fin de evitar que los iones se acumulen en la superficie de las membranas de intercambio iónico y las obstruyan (evitar el scaling), se invierte la polaridad de los electrodos, lo que provoca la inversión del flujo de iones y causa la limpieza de la superficie de las membranas. El proceso se denomina electrodialisis reversible (EDR, por sus siglas en inglés).

En la ED y en la EDR las partículas no cargadas no son eliminadas por esta tecnología y, por ello, no se concentran en la superficie de las membranas, y están presentes en la corriente producto. Por tanto, la electrodialisis es capaz de eliminar sales y nitratos del agua alimento, no siendo capaz de separar los pesticidas del agua a tratar.



## CAPÍTULO 4. LEGISLACIÓN

Teniendo en cuenta el contexto de este trabajo, la legislación que es de aplicación es la siguiente:

El **REAL DECRETO 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo** define el agua para consumo humano como:

- *“Todas aquellas aguas, ya sea en su estado original, ya sea después del tratamiento, utilizadas para beber, cocinar, preparar alimentos, higiene personal y para otros usos domésticos, sea cual fuere su origen e independientemente de que se suministren al consumidor, a través de redes de distribución públicas o privadas, de cisternas, de depósitos públicos o privados.”*
- *“Todas aquellas aguas utilizadas en la industria alimentaria para fines de fabricación, tratamiento, conservación o comercialización de productos o sustancias destinadas al consumo humano, así como a las utilizadas en la limpieza de superficies, objetos y materiales que puedan estar en contacto con los alimentos.”*
- *“Todas aquellas aguas suministradas para consumo humano como parte de una actividad comercial o pública, con independencia del volumen medio diario de agua suministrado.”*

También, el artículo 7 del mismo Real Decreto indica que *“la dotación de agua deberá ser suficiente para las necesidades higiénico-sanitarias de la población y el desarrollo de la actividad de la zona de abastecimiento, como objetivo mínimo deberá tener 100 litros por habitante y día.”*

Teniendo en cuenta las distintas tipologías de aguas consideradas como aguas aptas para el consumo humano, el Real Decreto especifica una serie de parámetros indicativos que ésta debe de poseer, los cuales se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 6:** Parámetros indicativos agua destinada al consumo humano (RD 140/2003).

Parámetro	Valor paramétrico
Aluminio ( $\mu\text{g/l}$ )	200
Amonio ( $\text{mg/l}$ )	0,50
Carbón orgánico total ( $\text{mg/l}$ )	Sin cambios anómalos
Cloro combinado residual ( $\text{mg/l}$ )	2,0
Cloro libre residual ( $\text{mg/l}$ )	1,0
Cloruro ( $\text{mg/l}$ )	250
Color ( $\text{mg/l Pt/Co}$ )	15

**Tabla 6:** *Parámetros indicativos agua destinada al consumo humano (RD 140/2003). (Continuación)*

Parámetro	Valor paramétrico
Conductividad ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ a 20°C)	2500
Hierro ( $\mu\text{g/l}$ )	200
Manganeso ( $\mu\text{g/l}$ )	50
pH	6,5 – 9,5
Sabor (Índice de dilución, 25°C)	3
Sodio (mg/l)	200
Sulfato (mg/l)	250
Turbidez (UNF)	1

En el Real Decreto también se indican las concentraciones máximas de varios componentes químicos que en el agua destinada al consumo humano no se deben de superar ya que se consideran nocivas a partir de dichas concentraciones:

**Tabla 7:** *Parámetros químicos indicativos agua destinada al consumo humano (RD 140/2003).*

Parámetro	Valor paramétrico
Antimonio ( $\mu\text{g/l}$ )	5,0
Arsénico ( $\mu\text{g/l}$ )	10
Benceno ( $\mu\text{g/l}$ )	1,0
Benzo( $\alpha$ )pireno ( $\mu\text{g/l}$ )	0,010
Boro (mg/l)	1,0
Bromato ( $\mu\text{g/l}$ )	10
Cadmio ( $\mu\text{g/l}$ )	5,0
Cianuro ( $\mu\text{g/l}$ )	50
Cobre (mg/l)	2,0
Cromo ( $\mu\text{g/l}$ )	50
1,2-Dicloroetano ( $\mu\text{g/l}$ )	3,0
Fluoruro (mg/l)	1,5
Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos (HPA) ( $\mu\text{g/l}$ )	0,10
Mercurio ( $\mu\text{g/l}$ )	1,0
Microcistina ( $\mu\text{g/l}$ )	1,0
Níquel ( $\mu\text{g/l}$ )	20
Nitrato (mg/l)	50
Nitritos (mg/l)	0,1
Total de plaguicidas ( $\mu\text{g/l}$ )	0,50
Plaguicida individual ( $\mu\text{g/l}$ )	0,10
Plomo ( $\mu\text{g/l}$ )	10

**Tabla 7:** *Parámetros químicos indicativos agua destinada al consumo humano (RD 140/2003). (Continuación)*

Parámetro	Valor paramétrico
Selenio ( $\mu\text{g/l}$ )	10
Trihalometanos (THMs) ( $\mu\text{g/l}$ )	100
Tricloroeteno + Tetracloroeteno ( $\mu\text{g/l}$ )	10

En el apartado 5.3. de calidad del agua bruta y calidad del agua tratada se tendrán en cuenta las concentraciones máximas indicadas en el RD 140/2003 para evaluar el agua producto que se obtenga con la planta potabilizadora de agua diseñada en el presente proyecto.

Por último, atendiendo a las sustancias químicas que se pueden emplear en el proceso de potabilización de agua para consumo humano, el Real Decreto 902/2018, de 20 de julio, indica que dichos productos deben cumplir con lo establecido en el Reglamento (UE) n. 528/2012 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 22 de mayo de 2012, relativo a la comercialización y el uso de biocidas, para Tipo de Producto 5 (PT5).



## **CAPÍTULO 5. OBJETIVOS**

Los objetivos del TFM titulado *“Diseño de una potabilizadora para el tratamiento de agua con alto contenido salino, nitratos y herbicidas para una población de 20000 habitantes”* son los siguientes:

- Estudiar las diferentes tecnologías de tratamiento de agua para consumo humano con objeto de seleccionar las adecuadas para el diseño de la planta potabilizadora objeto del proyecto.
- Estudiar la legislación nacional vigente sobre la calidad del agua para consumo humano y las sustancias que se pueden emplear durante su tratamiento.
- Definir la ubicación de la planta potabilizadora y su capacidad de producción.
- Diseñar una planta potabilizadora para el tratamiento de agua con alto contenido salino, nitratos y herbicidas y que dé respuesta a la problemática actual.
- Realizar un presupuesto para la planta potabilizadora de agua diseñada.





## CAPÍTULO 6. CASO DE ESTUDIO/HIPÓTESIS

El caso de estudio sobre el que se diseña la planta potabilizadora para el tratamiento de agua con elevada contenido en sales, nitratos y herbicidas se presenta a continuación:

### 6.1. UBICACIÓN

La planta potabilizadora de agua se localizará cercana al pozo donde se extraerá dicha agua. Se trata del Pozo de Cañars (08.127CA001), el cual se sitúa en el término municipal de Moncófar (Castellón) y pertenece a la Confederación Hidrográfica del Júcar.

Las coordenadas según el sistema UTM 30 ETRS89 del Pozo de Cañars son:

- X: 742025
- Y: 4410439

En la siguiente figura se muestra la ubicación, resaltada en azul, del Pozo de Cañars dentro de la provincia de Castellón:



**Figura 8:** Ubicación 08.127CA001 Pozo de Cañars. Fuente: (Dirección General del Catastro)

Con el fin de seleccionar la parcela donde se ubicará la planta potabilizadora de agua es necesario estimar el espacio que ésta necesitará y, para ello, se toma como referencia los siguientes valores de superficie dependiendo de la capacidad diaria de producción de agua de la planta:

**Tabla 8:** *Requisitos de espacio típicos.* Fuente: (Voutchkov, 2013)

Capacidad de la planta (m <sup>3</sup> /día)	Requisitos de espacio típicos (m <sup>2</sup> )
1.000	800 – 1.600
5.000	2.500 – 3.200
10.000	4.500 – 6.100

Tal y como se explica en el apartado 6.2., la planta potabilizadora de agua objeto de este proyecto tendrá una capacidad de 3.900 m<sup>3</sup>/día por lo que, asumiendo una correlación lineal entre la capacidad de la planta y su superficie, la superficie que necesitará se encuentra entre los 2.030 m<sup>2</sup> y los 2.760 m<sup>2</sup>.

Teniendo en cuenta tanto la ubicación del pozo donde se extraerá el agua y las necesidades de espacio de la instalación, la planta se situará en la calle del Riu Millars 19 en Moncófar (Castellón) con referencia catastral 3901101YK4130S0001OD y una superficie de 2.330 m<sup>2</sup>, parcela que se encuentra a una distancia de 1.830 m de la ubicación del pozo.

En la siguiente figura se muestra, resaltada en rojo, la ubicación de la parcela donde se situará la planta de potabilización de agua diseñada en este proyecto:



**Figura 9:** *Ubicación parcela planta potabilizadora.* Fuente: (Dirección General del Catastro).

Las características de la parcela escogida se muestran en el Plano nº 1.

## 6.2. CAPACIDAD DE LA INSTALACIÓN

La capacidad de producción de la planta diseñada en este proyecto para el tratamiento de agua con elevados niveles de salinidad, nitratos y herbicidas se determinará teniendo en cuenta la población de la zona donde se ubicará la planta y los consumos de agua por habitante y día marcados por la legislación y los consumos reales en España y, concretamente, en la Comunidad Valenciana.

Tal y como se ha indicado en el apartado 3 de legislación, según el RD 140/2003 la producción de una planta potabilizadora de agua en España debe de asegurar un abastecimiento mínimo de 100 l/hab/día.

Según el Instituto Nacional de Estadística, los consumos medios de agua potable en España y en la Comunidad Valenciana durante el 2014 fueron:

**Tabla 9:** Consumo de agua potable por habitante y día en 2014 en España y en la Comunidad Valenciana  
Fuente: (Instituto Nacional de Estadística, 2016).

	Consumo
España	132 l/hab/día
Comunidad Valenciana	162 l/hab/día

Teniendo en cuenta que el consumo de agua potable en la Comunidad Valenciana es muy superior al mínimo establecido en la legislación y al medio en España, para la determinación de la capacidad de la instalación de la planta potabilizadora para el tratamiento de agua con elevadas concentraciones salinas, de nitratos y de herbicidas objeto del proyecto se tendrá en cuenta el consumo medio por habitante y día más elevado, 162 l/hab/día.

Además, se tomará un factor de seguridad de 1,2 con el fin de asegurar el abastecimiento de agua potable durante las fluctuaciones de consumo y ante un posible aumento de población en la zona.

Por tanto, el dato de consumo de agua que se empleará en el cálculo de la capacidad de la planta de potabilización de aguas es de 195 l/hab/día, por lo que, teniendo en cuenta que debe de abastecer a una población de 20.000 habitantes, la producción diaria de la nueva planta de tratamiento de agua deberá ser de 3.900 m<sup>3</sup>/día.

### 6.3. CALIDAD DEL AGUA BRUTA Y CALIDAD DEL AGUA TRATADA

El agua bruta que se tratará con la planta de potabilización objeto del proyecto corresponde con el agua del Pozo Cañars (080.127CA001) perteneciente a la masa de agua subterránea de la Plana de Castelló (080.127), cuya última analítica, la cual se presenta en la siguiente tabla, se realizó por la Confederación Hidrográfica del Júcar en el año 2015:

#### Análisis físico químico

**Tabla 10:** *Análisis físico-químico – 080.127CA001 Pozo Cañars.*

Parámetro	Valor
Temperatura del agua	20,2°C
pH	7,19
TDS	2932,00 mg/l
Conductividad eléctrica a 20°C	3287 µS/cm
Calcio	333,20 mg/l
Sodio	613,10 mg/l
Carbonatos	0,70 mg/l
Bicarbonatos	469,00 mg/l
Sulfatos	570,00 mg/l
Cloruros	700,00 mg/l
Nitratos	246,00 mg/l
Dióxido de carbono	41,79 mg/l

#### Análisis pesticidas

##### 1. Fungicidas:

**Tabla 11:** *Análisis fungicidas – 080.127CA001 Pozo Cañars.*

Parámetro	Valor
Imazalil	< 0,05 µg/l
Metalaxil	< 50 ng/l
Tiabendazol	< 0,05 µg/l

##### 2. Herbicidas:

**Tabla 12:** *Análisis herbicidas – 080.127CA001 Pozo Cañars.*

Parámetro	Valor
Bromacilo	< 50 ng/l
Clorotoluron	< 0,05 µg/l
Desetil-terbutilazina	0,47 µg/l
Desetilatrazina	< 0,05 µg/l
Desisopropilatrazina (DIA)	< 0,05 µg/l
Diurón	< 0,05 µg/l
Isoproturón	< 0,05 µg/l

**Tabla 12:** *Análisis herbicidas – 080.127CA001 Pozo Cañars. (Continuación)*

Parámetro	Valor
Linuron	< 0,05 ng/l
Prometrina	< 0,005 µg/l
Propazina	< 0,005 µg/l
Terbumeton-desetil	< 0,05 µg/l
Terbutilazina	< 0,005 µg/l

3. Insecticidas y acaricidas:

**Tabla 13:** *Análisis insecticidas y acaricidas – 080.127CA001 Pozo Cañars.*

Parámetro	Valor
Clorofenvinfos	< 0,005 µg/l
Clorpirifos	< 0,005 µg/l
Diazinon	< 0,005 µg/l
Malatión	< 0,005 µg/l

Atendiendo a la calidad final del agua tratada, se van a utilizar los límites establecidos en el RD 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano.

Los parámetros físicos y las concentraciones máximas finales que el agua tratada deberá de poseer se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 14:** *Valores límite de la composición del agua producto (RD 140/2003).*

Parámetro	Valor paramétrico
Sodio (mg/l)	200
Sulfatos (mg/l)	250
Cloruros (mg/l)	250
Nitratos (mg/l)	50
Nitritos (mg/l)	0,10
Total de plaguicidas <sup>1</sup> (µg/l)	0,50
Plaguicida individual (µg/l)	0,10
Conductividad (µS/cm)	2.500
pH	6,5 - 9,5
TDS (ppm)	500

Teniendo esto en cuenta, la potabilizadora para el tratamiento de agua diseñada deberá conseguir que las concentraciones de sodio, sulfatos, cloruros, nitratos y del herbicida desetil-terbutilazina se encuentren por debajo de los límites máximos indicados en el RD 140/2003. Asimismo, la concentración de sólidos disueltos totales y la conductividad del agua producto también se deberá reducir hasta niveles permitidos.

<sup>1</sup> Los plaguicidas incluyen pesticidas, herbicidas, insecticidas y acaricidas.



## CAPÍTULO 7. SELECCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA UTILIZADA

La alternativa de desalación y potabilización que se escoja para el tratamiento del agua objetivo deberá ser la solución más favorable en términos tanto técnicos como económicos, pues se pretende obtener un agua potable apta para el consumo humano y cuyo coste sea el menor posible teniendo en cuenta las limitaciones del estado de la técnica actual.

Por tanto, en primer lugar se describen las dos principales tecnologías consideradas para el diseño de esta planta potabilizadora y alrededor de la tecnología escogida se desarrollará el diseño de los demás procesos de potabilización necesarios para su correcto funcionamiento y para la obtención de un agua producto con la calidad indicada en el apartado 5.3.

En la actualidad, las dos tecnologías más empleadas en la actualidad para la potabilización de agua que presentan mejores resultados en cuanto a la calidad del agua producto y en cuanto a su eficiencia energética son la ósmosis inversa y la electrodiálisis.

### a) Análisis técnico

La ósmosis inversa y la electrodiálisis son dos tecnologías de separación basada en membranas semi-permeables cuyas particularidades y principios de funcionamiento se han descrito en los apartados 3.1.4. y 3.1.5. de esta memoria. A modo resumen se presenta una tabla con las principales características y las ventajas y desventajas de cada una de estas dos tecnologías:

**Tabla 15:** Comparación ósmosis inversa y electrodiálisis. Fuente: (Jensen et al., 2012)

	Ósmosis Inversa	Electrodiálisis
<b>Consideraciones de diseño (calidad del agua)</b>	Turbidez, hierro, manganeso, SDI, tamaño partículas, TSS, dureza, materia orgánica, metales (p.e. arsénico).	Turbidez, hierro, manganeso, TSS, sulfuro de hidrógeno, dureza, metales (p.e. arsénico).
<b>Pre-tratamiento</b>	Pre-filtro, tratamiento dureza.	Pre-filtro, tratamiento dureza.
<b>Post-tratamiento</b>	Ajuste pH, remineralización.	Ajuste pH, remineralización.
<b>Gestión de residuos</b>	Concentrado	Concentrado
<b>Tiempo de inicio</b>	Minutos	Minutos
<b>Conversión</b>	≤ 85%	≤ 95%
<b>Ventajas</b>	Eliminación de múltiples contaminantes, desalación (eliminación TDS) y eliminación de micro-contaminantes de bajo peso molecular sin carga.	Eliminación de múltiples contaminantes, mayor conversión (menor rechazo), desalación, no afectado por la sílice.
<b>Desventajas</b>	Ensuciamiento membrana (scaling y fouling), menor conversión, complejidad de operación, demanda energética, generación de residuos.	Demanda energética, complejidad de operación, generación de residuos, únicamente elimina iones cargados.



En un principio, la electrodiálisis es la que presenta mayores ventajas frente a la ósmosis inversa principalmente por las siguientes razones:

- Posee una mayor conversión que la ósmosis inversa.
- La EDR (electrodiálisis reversible) tiene una mayor resistencia al scaling.
- Pretratamiento menor que la ósmosis inversa.
- Mayor resistencia al cloro que la ósmosis inversa.
- Opera a menor presión que la ósmosis inversa.

Técnicamente el principal inconveniente de la electrodiálisis frente a la ósmosis inversa es que la electrodiálisis es una tecnología apropiada para la eliminación de iones monovalentes y divalentes de una agua contaminada, no siendo capaz de eliminar compuestos con bajo peso molecular y sin carga, como son los herbicidas, contaminante que presenta el agua alimento considerado en este proyecto. Además, la electrodiálisis tampoco es capaz de eliminar microorganismos del agua alimento.

Frente a la desventaja de la ósmosis inversa de su menor conversión en comparación con la de la electrodiálisis, ésta puede ser compensada mediante la mezcla del agua producto con el agua alimento, opción viable para el caso de ósmosis inversa pues la salinidad de su permeado es mucho menor que la del permeado de electrodiálisis y que la salinidad estándar para agua potable. (*L. Karimi y col., 2015*)

Por todo ello, debido a la necesidad de que la tecnología de potabilización escogida debe ser capaz de separar iones monovalentes y divalentes, micro-contaminantes con bajo peso molecular y no cargados y microorganismos que el agua alimento pueda contener, la tecnología que más se adecua a las necesidades del agua alimento objetivo es la ósmosis inversa. Además, gracias a la posibilidad de remineralizar el agua producto de la ósmosis mediante la mezcla con parte del agua alimento hace de esta tecnología una opción más atractiva para ser empleada en este proyecto.

#### b) Análisis energético y económico

En el caso de estas dos tecnologías de membranas, la única forma de energía consumida es la energía eléctrica, cuyo consumo depende de varios factores de diferente índole: calidad del agua alimento, los costes de capital de la planta, costes energéticos, costes de funcionamiento y mantenimiento, descarga o tratado del flujo de concentrado y las condiciones de financiación. Según *Ali Al-Karaghoulí y col.* el coste energético de la planta para el caso de que se emplee la tecnología de ósmosis inversa representa el 44% de los costes totales del agua obtenida.

Por tanto, teniendo en cuenta que el consumo de energía representa el factor más determinante que afecta al coste total del agua producto obtenido, es importante analizar las variables que determinan qué tecnología (ósmosis inversa o electrodiálisis) será la que consuma menos energía eléctrica con el agua objetivo del proyecto.

Los variables que afectan directamente al consumo de energía de los procesos de ósmosis inversa y electrodiálisis son: capacidad de la planta, su diseño, los materiales empleados y la calidad del agua alimento. El diseño y materiales empleados son factores difíciles de



cuantificar y valorar ya que su variabilidad es muy elevada, dependiente directamente del propio diseño que se realice en cada caso. Por tanto, para escoger la tecnología principal más adecuada se va a comparar las variables de calidad del agua alimento y de capacidad de la planta:

- Calidad del agua alimento

Se trata del principal factor a tener en cuenta a la hora de escoger una tecnología de membranas u otra, pues de ello dependerá en gran medida el consumo energético de la planta. La conductividad del agua alimento es un claro indicativo de la calidad el agua, pues una conductividad elevada indica una elevada concentración de sales disueltas y, por el contrario, una baja conductividad indica una baja concentración de sales disueltas.

En el caso de la ósmosis inversa, su consumo eléctrico se centra en el consumo de la bombas de alta presión que, en el caso de agua salobre, suelen trabajar entre 17 y 26 bar dependiendo de la presión osmótica del agua alimento y del factor de conversión que se quiera alcanzar. Por otro lado, en el caso de la electrodiálisis, la energía eléctrica se emplea en sus electrodos y en el funcionamiento de las bombas hidráulicas. El consumo energético de esta tecnología es mucho más sensible a la calidad del agua de alimentación que en la tecnología de ósmosis inversa, tal y como se puede observar en la siguiente tabla:

**Tabla 16:** Consumo energético medio dependiendo de la salinidad del agua alimento. Fuente: (A. Al-Karaghoulí y L.L. Kazmerski, 2012)

Tipo de proceso	Consumo energético
Ósmosis Inversa	1,5 – 2,5 kWh/m <sup>3</sup>
Electrodiálisis	
Salinidad baja (< 2500 ppm)	0,7 – 2,5 kWh/m <sup>3</sup>
Salinidad elevada (2500 – 5000 ppm)	2,64 – 5,5 kWh/m <sup>3</sup>

Esta relación fue estudiada por L. Karimi y col. para tres aguas alimento con diferente conductividad (1875, 3520 y 6025  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) y con las mismas condiciones de temperatura de agua alimento y de flujo de permeado, concluyendo que, para el tratamiento de agua salobre con baja salinidad (alrededor de 1700  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) la tecnología de electrodiálisis consume menos energía que la ósmosis inversa y que para el caso del agua con una conductividad elevada la tecnología de ósmosis inversa es energéticamente más eficiente que la electrodiálisis. Además, para aguas de baja salinidad, la ósmosis inversa es más sensible a las variaciones del flujo de permeado cuando los demás parámetros se mantienen constantes, mientras que para los casos de aguas con elevada salinidad la tecnología más sensible es la electrodiálisis.

- Capacidad de la planta

Dependiendo de la capacidad de la planta el consumo de energía del proceso de ósmosis inversa y de electrodiálisis es más competitivo o no. En los procesos de ósmosis inversa la energía eléctrica únicamente es consumida por las bombas hidráulicas de alta presión, mientras que en el caso de la electrodiálisis ésta es consumida por los electrodos de los módulos y por las bombas hidráulicas.

En la siguiente tabla se muestran los costes medios por m<sup>3</sup> de agua producto para el caso de potabilización de agua salobre teniendo en cuenta diferentes capacidades de producción de la planta:

**Tabla 17:** Coste medio de producción de agua de los principales procesos de desalación – agua salobre.  
Fuente: (A. Al-Karaghoulí y L.L. Kazmerski, 2012)

Tipo de proceso	Coste del agua (US\$/m <sup>3</sup> )
<b>Ósmosis Inversa</b>	
Gran capacidad: 40.000 m <sup>3</sup> /día	0,26 – 0,54
Mediana capacidad: 20 – 1.200 m <sup>3</sup> /día	0,78 – 1,33
Muy baja capacidad: pocos m <sup>3</sup> /día	0,56 – 12,99
<b>Electrodiálisis</b>	
Gran capacidad	0,6
Baja capacidad	1,05

Como se puede observar en la tabla anterior, la electrodiálisis es una opción económicamente viable para una planta de baja y mediana capacidad, mientras que a partir de una producción diaria de 1200 m<sup>3</sup>/día la ósmosis inversa se convierte en la opción más rentable.

Por tanto, atendiendo a los dos factores que condicionan de forma notable el coste global de la planta de potabilización, la opción de ósmosis inversa es la opción más viable pues en el proyecto se va tratar un agua salobre con una salinidad elevada (3287 µS/cm) y el flujo de permeado diario corresponde a una planta de capacidad mediana/grande (3900 m<sup>3</sup>/día).

A modo resumen, en la siguiente tabla se muestran los factores que justifican la Ósmosis Inversa como la tecnología técnicamente y económicamente más adecuada para la potabilización del agua bruta considerada en este proyecto:

**Tabla 18:** Resumen comparación ósmosis inversa y electrodiálisis.

Factor	Ósmosis inversa	Electrodiálisis
Eliminación salinidad	Sí	Sí
Eliminación nitratos	Sí	Sí
Eliminación sulfatos	Sí	Sí
Eliminación pesticidas	Sí	No
Eliminación microorganismos	Sí	No
Consumo energético específico (3287 µS/cm) <sup>2</sup>	1,5 – 2,5 kWh/m <sup>3</sup>	2,64 – 5,5 kWh/m <sup>3</sup>
Coste del agua (3900 m <sup>3</sup> /día) <sup>2</sup>	0,26 – 0,78 US\$/m <sup>3</sup>	0,6 US\$/m <sup>3</sup>

<sup>2</sup> Datos provenientes de (A. Al-Karaghoulí y L.L. Kazmerski, 2012).

## **CAPÍTULO 8. DISEÑO DE LA PLANTA POTABILIZADORA**

En este capítulo, en primer lugar se describe la metodología empleada para el diseño de la nueva planta potabilizadora y, posteriormente, se muestran los resultados obtenidos y su diseño final.

### **8.1. METODOLOGÍA**

Con el fin de realizar el diseño de la planta potabilizadora para el tratamiento de agua con alto contenido salino, nitratos y herbicidas se va a seguir la metodología que se describe a continuación:

#### **8.1.1. Captación y bombeo del agua de pozo**

El caudal de agua que se ha de abastecer a la planta potabilizadora viene determinado por la producción de diseño y por la conversión a la que operará el sistema de ósmosis inversa.

En este caso, debido a que se va a tratar agua subterránea, será necesaria la construcción de uno o varios pozos o sondeos. Para determinar la tipología y el número de pozos o sondeos a construir es preciso realizar un estudio geológico e hídrico para determinar qué solución es la más idónea, si es necesario la construcción de uno o más pozos, su ubicación, el diámetro de los pozos y su profundidad, entre otros factores.

Se considerarán las siguientes soluciones para la extracción del agua subterránea:

- **Pozo:** hueco cilíndrico excavado en el terreno con diámetro y profundidad variable que, una vez atravesado el lecho permeable, permite la afluencia del agua hacia el mismo mediante la disposición de material adecuado. Suele tener un diámetro de entre 0,3 y 1,2 metros y una profundidad variable, hasta 1.200 m para agua.
- **Pozo radial:** se diferencian de los pozos ordinarios en el mecanismo de captación, el cual consiste en unos tubos drenantes que se introducen en posición horizontal y siguiendo direcciones radiales para aumentar el caudal permisible de extracción y reducir el impacto de las fluctuaciones del nivel freático. Este tipo de pozo tiene el inconveniente de su elevado coste de construcción, el cual se debe de justificar con el aumento del agua extraída en comparación con los pozos ordinarios y con los sondeos.

Asimismo, para la determinación del número de pozos necesarios se calculará la capacidad de producción de cada uno a partir de la siguiente ecuación:

$$Q_{\text{pozo}} = T \times A_d / 4,4 \quad (5)$$

Donde:

$Q_{\text{pozo}}$ : Capacidad de producción de un pozo (en m<sup>3</sup>/día).

T: Transmisividad del acuífero (en m<sup>2</sup>/día).

$A_d$ : Descenso del nivel del acuífero considerado (en m).

Con la capacidad de producción de cada pozo y el caudal de alimento de la nueva potabilizadora se determinará el número de pozos que será necesario construir:

$$n_{\text{pozos}} = Q_a / Q_{\text{pozo}} \quad (6)$$

Donde:

$n_{\text{pozos}}$ : Número de pozos a construir.

$Q_a$ : Caudal de alimento a la potabilizadora de agua. (en m<sup>3</sup>/día).

$Q_{\text{pozo}}$ : Capacidad de producción de un pozo (en m<sup>3</sup>/día).

Por otro lado, para la selección de la tipología de bomba (sumergible o de superficie) se deberá tener en cuenta la solución para la captación de agua seleccionada (pozo o pozo radial), la altura de bombeo necesaria para la extracción y la posterior conducción del agua hacia la planta potabilizadora, las pérdidas de carga tanto en la aspiración como en la impulsión, las pérdidas de carga en todos los accesorios instalados (válvulas, codos, etc.), tiempo de funcionamiento de las bombas, condiciones de funcionamiento de las bombas para evitar la cavitación y el caudal de alimentación de la planta potabilizadora. La configuración escogida será de  $N + 1$ , dejando una bomba parada que se empleará en caso de que alguna de las bombas en funcionamiento se averíe o si se está realizando el mantenimiento a alguna de ellas.

Asimismo, tal y como se ha explicado en el apartado 1.1., se deberá estudiar la recarga del acuífero pues es necesario evitar su sobreexplotación que conllevaría al aumento de la intrusión marina en la zona (aumento de la salinidad) y al aumento de la concentración de nitratos y herbicidas, entre otros posibles contaminantes que pueden aparecer.

### **8.1.2. Línea de conducción a la planta potabilizadora y depósito de alimentación**

Para el diseño de la línea de conducción será necesario escoger el material del que estarán constituidas las tuberías que conducirán el agua bruta desde la estación de bombeo hasta el depósito de alimentación de la planta potabilizadora.

Asimismo, el dimensionamiento de las tuberías de la línea de conducción dependerá del propio diseño de la estación de captación de agua y de un estudio técnico-económico. Un diámetro de tubería menor reduciría el coste de la línea de conducción, pero aumentaría la pérdida de carga de la tubería y la potencia de la bomba. En el lado contrario, un elevado diámetro de tubería aumentaría el coste de la línea de conducción, pero reduciría las pérdidas de carga y, por consiguiente, la potencia necesaria de las bombas.

Teniendo en cuenta que en las líneas de conducción se recomienda una velocidad del agua entre los 1,2 m/s y los 2,4 m/s, se escogerá una velocidad intermedia y se calculará el diámetro

interior recomendado de la tubería para, a continuación, escoger el diámetro comercial más cercano al deseado. El diámetro interior de la tubería se calculará a partir de la siguiente ecuación:

$$D_i = \sqrt[4]{4 \cdot Q / \pi \cdot v} \quad (7)$$

Donde:

$D_i$ : Diámetro interior de la tubería (en m).

$Q$ : Caudal de agua en el interior de la tubería (en  $m^3/s$ ).

$v$ : Velocidad del agua en el interior de la tubería (en m/s).

Finalmente, estas tuberías conducirán el agua subterránea extraída a un depósito de alimentación con capacidad suficiente para abastecer durante un día completo a la planta potabilizadora en caso de avería de alguna de las tomas de captación.

### 8.1.3. Pretratamiento

El objetivo del pretratamiento es el de reducir, de la corriente alimento, el contenido de cualquier tipo de elementos causantes de scaling y fouling con el fin de conseguir un proceso de potabilización mediante ósmosis inversa seguro, eficiente y económico.

Los pasos que se seguirán en el diseño del pretratamiento de la planta potabilizadora de agua desarrollada en este proyecto son:

#### 8.1.3.1. Selección de etapas de pretratamiento

En el caso del agua a tratar, no se tienen datos suficientes como para diseñar un pretratamiento eficaz y a medida que permita el funcionamiento óptimo del sistema de ósmosis inversa, por lo que, debido a que se trata de un agua de pozo, se asume que dicha agua no posee un ensuciamiento significativo y, por tanto, no se precisa de un fuerte proceso de pretratamiento.

Teniendo en cuenta las características del agua alimento, según lo indicado en el capítulo "11. Guidelines for Pretreatment System Selection" (Voutchkox, 2017), existen tres posibles alternativas para el proceso de pretratamiento, éstas son:

- Filtros de cartucho.
- Filtros de cartucho y filtros de arena dual a presión de una sola etapa con una tasa de carga entre 16 y 25  $m^3/m^2h$ .
- Filtración a presión mediante membranas de ultra/microfiltración con un flux de diseño de 0,1 a 0,12  $m^3/m^2h$ .

Además, se valorará la posibilidad de emplear agentes antiincrustantes en el caso de que alguno de los compuestos que componen el agua a tratar presente concentraciones superiores a su punto de saturación en la corriente de rechazo del sistema de ósmosis inversa.

Finalmente, toda el agua pretratada se almacenará en un depósito que permita la alimentación del sistema de ósmosis inversa durante 2 horas seguidas.

### 8.1.3.2. Selección de equipos de filtración

Una vez escogido el proceso de pretratamiento se procederá a la selección de los equipos de filtración oportunos analizando catálogos comerciales de soluciones existentes y seleccionando aquellas cuyas características de funcionamiento se adecuen a las necesidades de la planta potabilizadora de agua.

Entre las propiedades que se deberán tener en cuenta destacan:

- Caudal de entrada al sistema de ósmosis inversa.
- Caudal recomendado y máximo de funcionamiento de los filtros.
- Área de filtración necesaria.

### 8.1.3.3. Selección y cálculo del caudal de antiincrustante

Se escogerá un antiincrustante comercial que evite la precipitación del compuesto que supere el límite de saturación en la corriente de rechazo tras el proceso de ósmosis inversa.

Una vez escogido, se calculará el caudal de antiincrustante a dosificar empleando el software de diseño IMSDesign™. Para ello es necesario introducir los siguientes datos:

- Concentración de la solución.
- Peso específico de la solución.
- Dosis de antiincrustante recomendada por el fabricante.

En la siguiente figura se muestra la pantalla de “Requisito químico” donde se calcula el caudal de antiincrustante a dosificar en la corriente de alimentación:

The screenshot displays the 'Requisito químico' screen in the IMSDesign software. The interface is organized into several sections:

- System Information:** Project: ESPA2-LD MAX, Calculado por: CARLOS VÁZQUEZ, Temperatura: 20,2 °C, Tipo de agua: Pozo salobre sin ensuciamiento, Fecha: 12/08/2019.
- Sistema (Paso 1):**

Caudal de alimentación.m3/h	108,40
Caudal de permeado.m3/h	81,30
Flujo total del producto.m3/h	81,30
- Resumen de Coste Químicos:**

	Permeado Paso1	Total Producto
EUR/m3	0,000	0,000
EUR/kgal	0,000	0,000
EUR/Mega litros	0,000	0,000
EUR/Mega usgal	0,000	0,000
EUR/Mega m3	0,000	0,000
EUR/Acre.ft	0,000	0,000
- Dosificación de SMBS alimentación:**

Conc Solution. %	10,0
Peso específico	1,10
Coste de Solución EUR/ l de 10% sol.	0,0
Dosis, mg/l Base 100%	0,0
Consumo kg/h	0,0
- Dosificación de antiincrustante:**

Conc Solution. %	40,0
Peso específico	1,00
Coste de Solución EUR/ l de 10% sol.	0,0
Dosis, mg/l Base 100%	0,0
Consumo kg/h	0,0
- NaOCl Dosificación alimentación:**

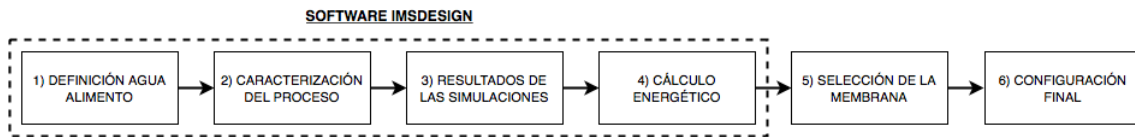
Conc Solution. %	10,0
Peso específico	1,30
Coste de Solución EUR/ l de 10% sol.	0,0
Dosis, mg/l Base 100%	0,0
Consumo kg/h	0,0

Figura 10: Pantalla “Requisito químico” IMSDesign.

### 8.1.4. Ósmosis inversa

En este apartado se realiza la selección de la membrana de ósmosis inversa que se empleará en la nueva planta de potabilización teniendo en cuenta para ello una serie de factores y condiciones excluyentes y se determina la configuración de la estación de ósmosis inversa.

La metodología seguida es la siguiente:



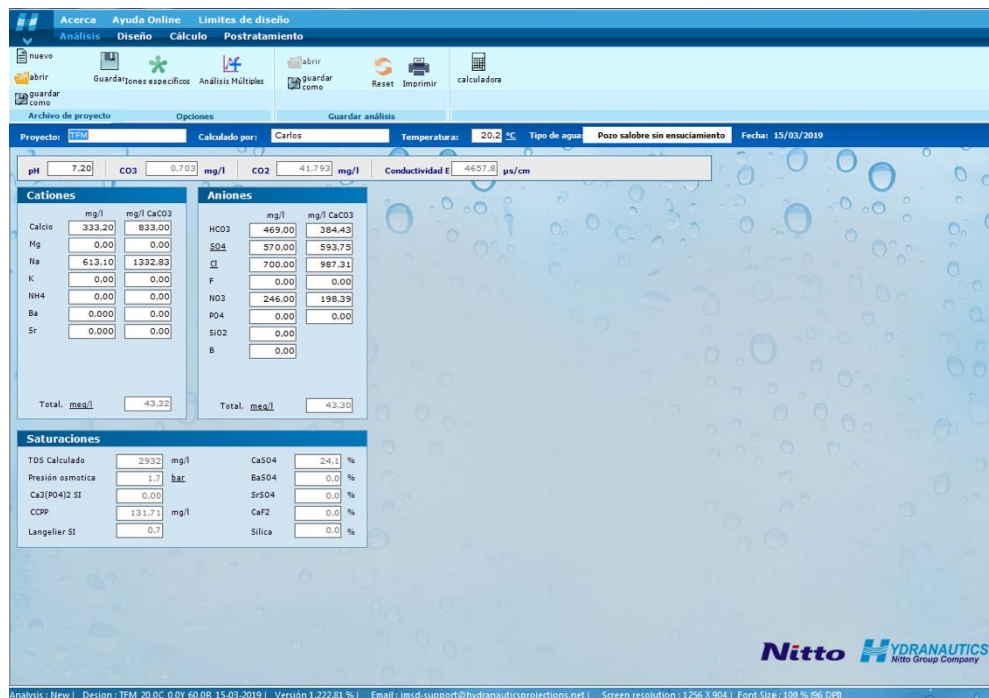
**Figura 11:** Metodología para el diseño del sistema de ósmosis inversa. Fuente: Elaboración propia.

Para la simulación de la planta con las distintas membranas consideradas se ha empleado el software comercial de Hydranautics IMSDesign™ (Integrated Membrane Solutions Design).

En los siguientes apartados se describe cada uno de los pasos indicados en la figura anterior:

#### 8.1.4.1. Definición agua bruta

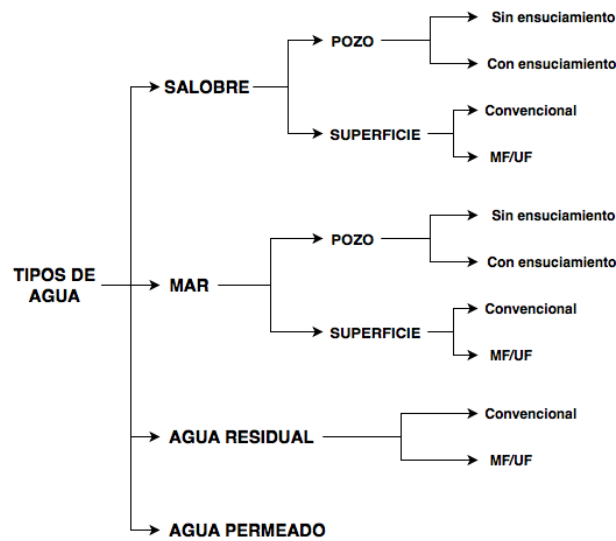
El primer paso en el diseño de la planta potabilizadora es la definición del agua alimento dentro del software de simulación. Para ello, en la pestaña “Análisis” aparece todos los datos que se deben de introducir para poder caracterizar el agua alimento a tratar.



**Figura 12:** Pantalla “Análisis” IMSDesign.

En esta pantalla se deben introducir los siguientes datos: nombre del proyecto, nombre de la persona que realiza el cálculo, temperatura, tipo de agua y pH. Es importante resaltar que, dependiendo del tipo de agua que se escoja, el software únicamente considerará, durante la simulación del funcionamiento de la planta, aquellas membranas de Hydranautics específicas para ese tipo de agua.

A continuación, se muestra un diagrama donde se presenta los distintos tipos de agua a escoger:



**Figura 13:** Tipos de agua en IMSDesign software. Fuente: Elaboración propia.

Además de estos datos, para poder introducir la composición del agua alimento existen dos alternativas, éstos son:

1. Analítica completa: en el caso de que se posea una analítica completa del agua, el software te permite introducir las concentraciones de los cationes e iones que contiene.

Una vez introducida la analítica, el software calcula la conductividad del agua alimento, los valores de saturación y las concentraciones de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CO}_3$ .

2. Valor de conductividad: en el caso de que únicamente se tenga el dato de conductividad del agua, el software te permite introducir este dato como aproximación a la analítica real del agua a tratar.

Con el valor de conductividad, temperatura y pH el software calcula la concentración de NaCl, los valores de saturación y las concentraciones de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CO}_3$ .

Una vez completada la pantalla de “Análisis” se procede a la simulación de varias membranas distintas avanzando a la pantalla “Diseño”.



### 8.1.4.2. Caracterización del proceso

La caracterización del proceso de ósmosis inversa se realiza en la pestaña “Diseño”, la cual se divide en tres secciones: sistema, trenes y especificaciones del sistema.

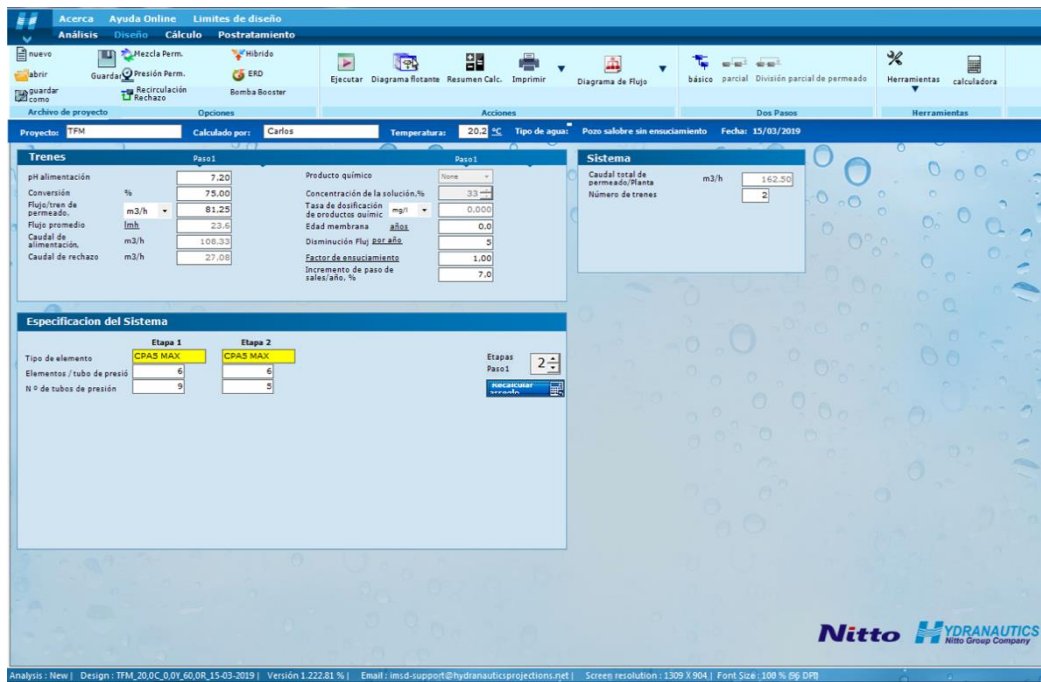


Figura 14: Pantalla “Diseño” IMSDesign.

Esta pantalla permite simular configuraciones de membranas distintas empleando la base de datos de membranas de Hydranautics que el software incorpora, los resultados de estas simulaciones se emplearán para determinar qué membrana es la más adecuada para tratar el agua presentada en el apartado 5.3.

A continuación, se indican los parámetros del proceso que se deben de introducir en cada sección y los parámetros que el propio software calcula antes de proceder con la propia simulación:

#### 1. Sistema:

En esta sección se debe de introducir:

- Número de trenes de la planta.

Con el número de trenes y el flujo de permeado por tren introducido en la sección “trenes”, el software calcula el siguiente dato:

- Caudal total de permeado de la planta.

#### 2. Trenes:

En esta sección se deben introducir los siguientes parámetros característicos de cada tren de la planta:

- pH alimentación: se mantiene el pH fijado en la pantalla “Análisis”.

- Conversión: con el fin de observar cómo afecta la conversión a la calidad del permeado y a la energía específica del sistema, para cada membrana estudiada se ha simulado las conversiones de 60%, 65%, 70% y 75%.
- Flujo de permeado por tren: flujo de permeado por tren teniendo en cuenta el flujo de permeado total que se desea obtener.
- Producto químico y concentración de la solución (%): el software te permite escoger el producto químico a utilizar (HCl o H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) y su concentración.
- Edad membrana: años que lleva instalada la membrana, en este caso 0 pues se trata de membranas nuevas. Dependiendo del valor que se introduzca el factor de ensuciamiento, que afecta negativamente a la capacidad de permeado de la membrana, variará.
- Disminución de flujo por año (%): se trata de la reducción del flujo por año de la membrana debido a las incrustaciones. En algunos casos se llega hasta un 10% de disminución de flujo por año, por lo que se ha considerado un valor intermedio para las simulaciones de las membranas (un 5%).
- Incremento del paso de sales por año (%): debido al paso del tiempo, las propiedades de rechazo de sales de la membrana disminuyen, por lo que se ha considerado que cada año se incrementará un 7% el paso de sales en la membrana.

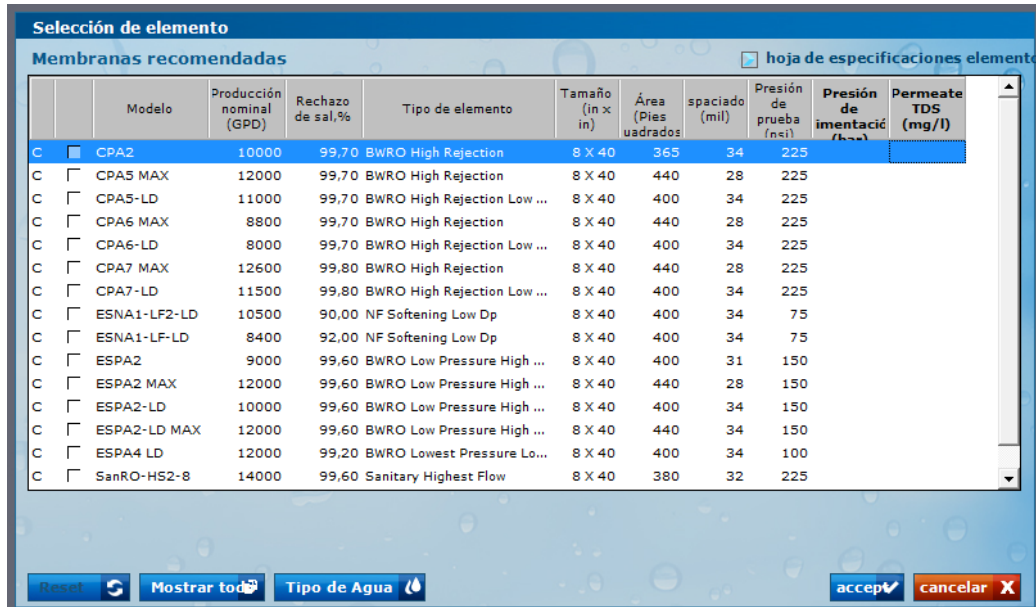
Con los datos introducidos, el software calcula los siguientes parámetros:

- Flujo promedio (lmh): flujo que atraviesa la superficie de la membrana (depende de la membrana que se seleccione).
- Caudal de alimentación (m<sup>3</sup>/h): caudal de agua bruta que entra en los trenes.
- Caudal de rechazo (m<sup>3</sup>/h): caudal rechazado por el sistema de ósmosis inversa.
- Tasa de dosificación de productos químicos (mg/l): dosificación en el agua alimento del producto químico en caso de que éste sea necesario.
- Factor de ensuciamiento: factor que caracteriza la degradación de las propiedades funcionales de la membrana debido a su ensuciamiento.

### 3. Especificación del sistema:

En esta sección se debe de escoger el modelo de membrana que se simulará a partir de una preselección que el software realiza teniendo en cuenta el tipo de agua que se va a tratar.

A continuación, se muestra la pantalla de la lista de membranas seleccionadas por IMSDesign:



	Modelo	Producción nominal (GPD)	Rechazo de sal, %	Tipo de elemento	Tamaño (in x in)	Área (Pies cuadrados)	spaciado (mil)	Presión de prueba (psi)	Presión de imentación (bar)	Permeate TDS (mg/l)
C	<input checked="" type="checkbox"/> CPA2	10000	99,70	BWRO High Rejection	8 X 40	365	34	225		
C	<input type="checkbox"/> CPA5 MAX	12000	99,70	BWRO High Rejection	8 X 40	440	28	225		
C	<input type="checkbox"/> CPA5-LD	11000	99,70	BWRO High Rejection Low ...	8 X 40	400	34	225		
C	<input type="checkbox"/> CPA6 MAX	8800	99,70	BWRO High Rejection	8 X 40	440	28	225		
C	<input type="checkbox"/> CPA6-LD	8000	99,70	BWRO High Rejection Low ...	8 X 40	400	34	225		
C	<input type="checkbox"/> CPA7 MAX	12600	99,80	BWRO High Rejection	8 X 40	440	28	225		
C	<input type="checkbox"/> CPA7-LD	11500	99,80	BWRO High Rejection Low ...	8 X 40	400	34	225		
C	<input type="checkbox"/> ESNA1-LF2-LD	10500	90,00	NF Softening Low Dp	8 X 40	400	34	75		
C	<input type="checkbox"/> ESNA1-LF-LD	8400	92,00	NF Softening Low Dp	8 X 40	400	34	75		
C	<input type="checkbox"/> ESPA2	9000	99,60	BWRO Low Pressure High ...	8 X 40	400	31	150		
C	<input type="checkbox"/> ESPA2 MAX	12000	99,60	BWRO Low Pressure High ...	8 X 40	440	28	150		
C	<input type="checkbox"/> ESPA2-LD	10000	99,60	BWRO Low Pressure High ...	8 X 40	400	34	150		
C	<input type="checkbox"/> ESPA2-LD MAX	12000	99,60	BWRO Low Pressure High ...	8 X 40	440	34	150		
C	<input type="checkbox"/> ESPA4 LD	12000	99,20	BWRO Lowest Pressure Lo...	8 X 40	400	34	100		
C	<input type="checkbox"/> SanRO-HS2-8	14000	99,60	Sanitary Highest Flow	8 X 40	380	32	225		

Figura 15: Pantalla "Selección de elemento" IMSDesign.

Tras seleccionar la membrana que se desea simular, el software calcula los siguientes parámetros de la planta:

- Número de etapas.
- Número de tubos de presión en cada etapa.
- Número de elementos por tubo de presión en cada etapa.

Una vez completada la pantalla de "Diseño" se procede a su simulación, obteniendo un informe donde se describen todas las características del funcionamiento del sistema de ósmosis inversa seleccionado.

### 8.1.4.3. Resultados de las simulaciones

El software IMSDesign, tras la simulación del sistema de ósmosis inversa caracterizado, muestra un resumen de los resultados obtenidos en la sección de “Resultados de Cálculo”, tal y como se puede observar en la siguiente figura:

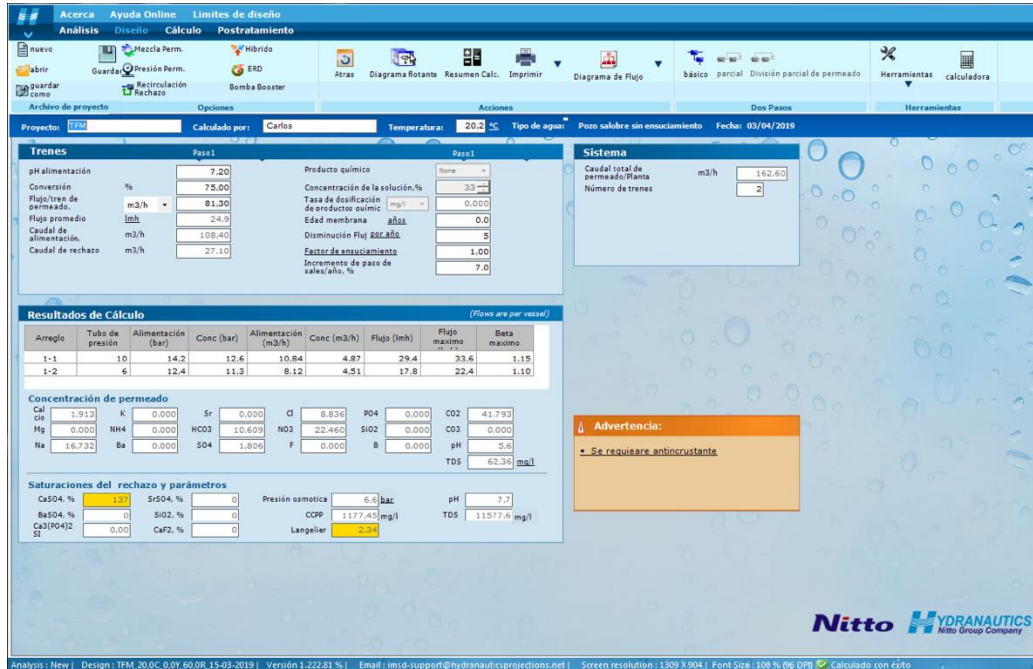


Figura 16: Pantalla “Resultados de Cálculo (Diseño)” IMSDesign.

Los resultados que el software muestra son:

- **Resultados por etapa:** se indica el número de tubos de presión, la presión y el caudal de las corrientes de alimento y concentrado, el flujo de permeado medio y máximo y el parámetro beta máximo.
- **Composición de la corriente de permeado:** se indican las concentraciones de los diferentes iones, así como el pH y los sólidos totales disueltos (TDS) de la corriente de permeado. La composición del agua de la corriente de permeado será uno de los criterios que se empleen para escoger la membrana que más se adecua al proyecto.
- **Saturación del rechazo y parámetros:** en este apartado se indican los porcentajes de saturación de los compuestos en el agua ( $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{BaSO}_4$ ,  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ,  $\text{SrSO}_4$ ,  $\text{SiO}_2$  y  $\text{CaF}_2$ ), la presión osmótica, el coeficiente de Langelier (LSI), pH y los sólidos totales disueltos (TDS) de la corriente de rechazo.
- **Advertencias:** en caso de que el LSI sea mayor a 2,50 y/o que el porcentaje de saturación de algún compuesto químico sea mayor al 100% en esta sección se indicarán las medidas que se deben tomar para evitar la aparición de scaling en la superficie de la membrana que pueda mermar su funcionalidad y operatividad. En este caso, el software indica que es necesario emplear antiincrustantes para evitar la aparición de incrustaciones de sulfato cálcico.

#### 8.1.4.4. Selección de membrana

Con el fin de seleccionar la membrana que más se ajuste a las necesidades de la planta potabilizadora se realiza un estudio sobre los resultados obtenidos en cada una de las simulaciones realizadas sobre las distintas membranas seleccionadas por el software de diseño IMSDesign.

A continuación, se muestran, en orden de aplicación, los criterios empleados para seleccionar la membrana óptima para tratar el agua alimento considerada en este proyecto:

1. Cumplimiento de los límites de diseño recomendados para cada módulo de ósmosis inversa en particular. En caso de que las condiciones de funcionamiento de cada membrana superen los límites de diseño recomendados por Hydranautics, esa membrana se descartará.
2. Cumplimiento de los valores límite indicados en el RD 140/2003 en el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. Debido a que el objetivo es potabilizar el agua para el consumo humano, toda membrana cuyo permeado no cumpla este Real Decreto será descartada.
3. Coste específico de producción de agua potable (€/m<sup>3</sup>) teniendo en cuenta el coste de inversión y el coste de operación y mantenimiento de la planta potabilizadora.
4. El último criterio de selección son las características técnicas de las membranas pues, tras descartar todas aquellas membranas que no cumplen con los anteriores cuatro criterios, aquella membrana con las mejores prestaciones técnicas y de funcionamiento y que, además, el coste de potabilización se menor será la elegida para ser empleada en la planta potabilizadora de agua objeto de este proyecto.

#### 8.1.4.5. Configuración final

El último paso es la definición y descripción del sistema de ósmosis inversa con la membrana que se haya escogido en el paso anterior. Las características que se definirán serán la configuración del sistema de ósmosis inversa diseñado (número de trenes, tubos de presión por tren y elementos de ósmosis inversa por tubo de presión), sus características de funcionamiento (presión, caudal, energía específica, etc.) y las concentraciones y otros parámetros característicos de las tres corrientes de agua (alimento, rechazo y permeado).

Debido a que el software IMSDesign no es capaz de simular el rechazo de herbicidas y de otros pesticidas presentes en el agua alimento y que para determinarlo sería necesario estudiar el rechazo de cada una de las membranas seleccionadas frente a estos agentes contaminantes, con el fin de realizar una estimación de la calidad del agua se va a tomar un valor conservador del 90%.

En el 2006, Bhattacharya y *col.* estudiaron el rechazo a tres pesticidas (atrazina, simazina y diuron) de varias membranas de baja presión, concluyendo que su rechazo muestra una tendencia similar a su rechazo de sales siendo el rechazo a sales de membranas de ósmosis inversa mayor al 90%. En otro estudio llevado a cabo por Tepus y *col.* en 2009 consiguió un rechazo del 95% para la desetyl atrazina y del 94,4% para la atrazina en rango de presiones de funcionamiento entre 2 y 15 bar y con una membrana de GE Osmonics con un rechazo a

MgSO<sub>4</sub> del 99,5% y una permeabilidad al agua de 1,95 L m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> bar<sup>-1</sup>. Con ello se demuestra que el valor tomado del 90% de rechazo a herbicidas y otros pesticidas corresponde con un valor conservador y que con el fin de calcular exactamente su concentración en las corrientes de permeado y rechazo sería necesario un estudio exhaustivo en laboratorio.

### 8.1.5. Postratamiento

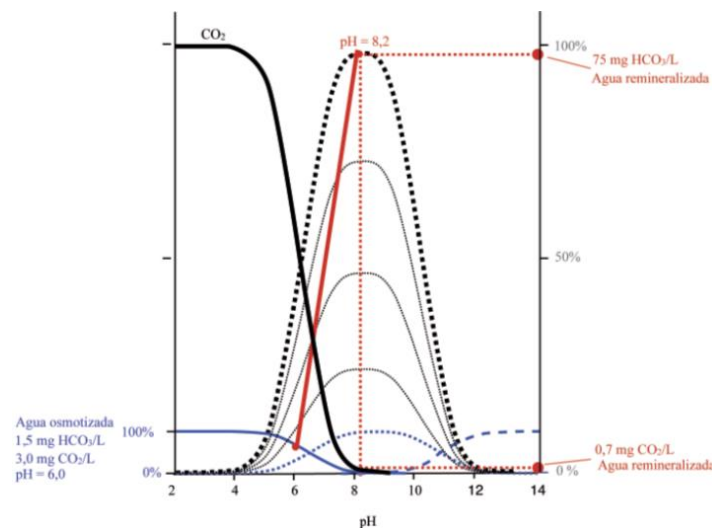
El postratamiento tiene como objetivo la remineralización del agua tratada y su desinfección desde el almacenamiento de agua potable hasta su uso final en la red de abastecimiento de agua.

Por tanto, en los siguientes apartados se describe las técnicas de remineralización y de desinfección que se emplearán en la planta potabilizadora de agua salobre:

#### 8.1.5.1. Remineralización

El objetivo de la remineralización es el de aumentar la dureza y la alcalinidad del agua con el fin de alcanzar un índice de saturación (LSI) igual o cercano a cero y en equilibrio con la atmósfera. Para ello, es necesario alcanzar el punto de equilibrio calcio-carbónico donde el pH, el calcio disuelto y la alcalinidad no varían o varían muy poco con el contacto con la atmósfera y, al mismo tiempo, minimizar el consumo de energía y de productos químicos durante este proceso.

En el siguiente gráfico se muestra el equilibrio entre el CO<sub>2</sub> y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> donde, para conseguir un agua remineralizada que esté en equilibrio o cercana al equilibrio con la atmósfera, ésta debe de poseer un pH de 8,2, una concentración HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> de 75 mg/L y una concentración de CO<sub>2</sub> disuelto de 0,7 mg/L:



**Gráfico 6:** Aspectos del equilibrio  $CO_2 \rightleftharpoons HCO_3^-$  en el proceso de remineralización del agua osmotizada.

Fuente: (Hernández-Suárez, 2009)

Diseño de una Potabilizadora para el Tratamiento de Agua con Alto Contenido Salino, Nitratos y Herbicidas para una Población de 20.000 Habitantes

Con el fin de alcanzar estas características del agua tratada, las diferentes técnicas disponibles en el estado de la técnica se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 19: Técnicas para la remineralización del permeado. Fuente: (Hernández-Suárez, 2009)

Proceso de remineralización	Reacción del proceso	Consumo de químicos por incremento de 1 mmol (61 mg) de HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Incremento del contenido en cationes y aniones por 1 mmol (61 mg) de HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
1 Carbonato Cálcico + Dióxido de Carbono	$\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + 2(\text{HCO}_3^-)$	50,1 mg CaCO <sub>3</sub> (100%) 22 mg CO <sub>2</sub>	20 mg Ca <sup>2+</sup>
2 Hidróxido Cálcico + Dióxido de Carbono	$\text{Ca}(\text{OH})_2 + 2\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + 2(\text{HCO}_3^-)$	37,1 mg Ca(OH) <sub>2</sub> (100%) 44 mg CO <sub>2</sub>	20 mg Ca <sup>2+</sup>
3 Dolomita + Dióxido de Carbono	$\text{MgOCaCO}_3 + 3\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+} + 4(\text{HCO}_3^-)$	35,1 mg MgOCaCO <sub>3</sub> (100%) 33 mg CO <sub>2</sub>	61 mg Mg <sup>2+</sup> 10 mg Ca <sup>2+</sup>
4 Carbonato Cálcico + Ácido Sulfúrico	$2\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + 2(\text{HCO}_3^-) + \text{Ca}(\text{SO}_4)$	100,1 mg CaCO <sub>3</sub> (100%) 49 mg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (100%)	40,1 mg Ca <sup>2+</sup> 48 mg SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
5 Cloruro Cálcico + Bicarbonato Sódico	$\text{CaCl}_2 + 2\text{NaHCO}_3 \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + 2(\text{HCO}_3^-) + 2 \text{NaCl}$	55,5 mg CaCl <sub>2</sub> (100%) 84 mg NaHCO <sub>3</sub> (100%)	23 mg Na <sup>+</sup> 20 mg Ca <sup>2+</sup> 35,5 mg Cl <sup>-</sup>

Las técnicas más utilizadas en la práctica son las técnicas 1 y 2 que se diferencia por su aporte de Ca<sup>2+</sup> mediante carbonato cálcico o hidróxido cálcico.

La determinación de la dosificación de los productos químicos a introducir en la corriente de permeado se realiza empleando el software IMSDesign que, en la pestaña de “Postratamiento” permite simular cómo variará la composición y características del agua dependiendo de los productos químicos dosificados:



Figura 17: Pantalla “Postratamiento” IMSDesign cálculo de antiincrustante.



Por otro lado, según la “Guía para la remineralización de las aguas desaladas”, la composición y características que el agua remineralizada debe de poseer son:

**Tabla 20:** Características recomendadas para las aguas desaladas con un nivel adecuado de remineralización. Fuente: (Hernández-Suárez, 2009)

Parámetro	Rango
pH	8,2 ± 0,1
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	68 ± 3
Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	21 ± 2
CO <sub>2</sub> (mg/L)	0,7 ± 0,1
LSI	± 0,15

En esta misma guía se estudió la dureza del agua remineralizada de 6 plantas de ósmosis existentes en España, concluyéndose que la dureza media de éstas es de 52,58 mg CaCO<sub>3</sub>/L, lo que se trata de un agua ligeramente dura.

Tras definir la técnica de remineralización que se empleará y de calcular la dosificación de los productos químicos empleados, se revisarán soluciones comerciales existentes y se escogerá una solución para instalarla en el nueva potabilizadora.

Asimismo, en caso de que el pH del agua producto no sea el adecuado, se considerará la posibilidad de emplear ácido o base para ajustarlo a un pH de 8,2 ± 0,1.

#### 8.1.5.2. Cloración

La última etapa del postratamiento del agua tratada es la cloración con la que se consigue asegurar un agua desinfectada desde que se almacena hasta su posterior consumo en la red de abastecimiento de agua. Es por ello por lo que en la dosificación del compuesto clorado se debe de asegurar una concentración de entre 0,5 y 1,0 ppm de cloro libre.

La concentración de cloro libre es aquella concentración de cloro restante tras la destrucción de reductores (Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, H<sub>2</sub>S, etc.), la formación de cloroaminas y su posterior destrucción, es en este momento donde se alcanza el punto de ruptura y todo el cloro que se añada será cloro libre (ver Figura 18) .



**Figura 18:** Demanda de cloro. Fuente: (ITE DOSING PUMPS)



En este caso se va a emplear el hipoclorito sódico ( $\text{NaClO}$ ) como solución desinfectante, el cual se comercializa en disoluciones de concentraciones entre el 3 y 15% en peso.

Cabe destacar que para poder determinar la cantidad idónea de  $\text{NaClO}$  a dosificar es necesario calcular la demanda de cloro (cantidad de cloro consumido hasta la aparición de cloro residual), cálculo que se realiza de forma analítica en el laboratorio. Por ello, debido a que el diseño de la planta potabilizadora objeto de este proyecto es un diseño teórico, se empleará la dosificación recomendada de entre 1 y 2 ppm para la desinfección.

El caudal de hipoclorito de sodio a dosificar se calculará empleando el software IMSDesign a través de la ventana de “Postratamiento” mostrada en la Figura 17.

#### **8.1.6. Almacenamiento de agua potable**

El agua potabilizada se almacenará en un depósito cuyo volumen útil será tal que permitirá distribuir agua potable a la población durante un día entero.

#### **8.1.7. Gestión del rechazo y de las aguas de limpieza**

En la gestión del rechazo y de las aguas de limpieza es necesario tener en cuenta su composición, puesto que dependiendo de ella será necesario emplear alguna etapa de tratamiento de aguas para reducir la concentración de ciertos contaminantes que impiden su evacuación. A partir de dicha composición, se escogerán los procesos de tratamiento más adecuados, pudiendo ser procesos de dilución, separación física, reacciones químicas o biológicos.

Una vez se hayan identificado los contaminantes químicos y la composición de las aguas de rechazo y limpieza se procederá a la selección de la opción que se empleará para su evacuación y al diseño del proceso necesario para efectuarlo:

##### 8.1.7.1. Selección opción para la evacuación de las aguas de rechazo y de limpieza

Teniendo en cuenta la composición de las aguas de rechazo y de limpieza se seleccionará una de las siguientes opciones para realizar la evacuación de dichas aguas:

- Vertido a una masa de agua superficial.
- Vertido a la red municipal de saneamiento.
- Inyección en pozos profundos.
- Vertido al mar.
- Estanques de evaporación.

##### 8.1.7.2. Diseño sistema de gestión y evacuación de las aguas de rechazo y de limpieza

Una vez seleccionada la opción para realizar la evacuación se procederá con su diseño identificando aquellos procesos de tratamiento de aguas que sean necesarios para que no genere un impacto nocivo e importante en el medioambiente.

### 8.1.8. Limpieza

En este apartado se definirán y diseñarán los procesos de limpieza de los filtros de arena y de las membranas de ósmosis inversa de la nueva potabilizadora de agua diseñada.

#### 8.1.8.1. Limpieza filtros de arena

La definición y diseño del proceso de limpieza de los filtros de arena de la planta potabilizadora se realiza a partir de las recomendaciones indicadas en el Manual de Agua Suez Degremont para la limpieza de filtros duales a presión.

#### 8.1.8.2. Limpieza membranas de ósmosis inversa

Para la definición y diseño de los procesos de limpieza de las membranas de ósmosis inversa se considerarán las recomendaciones y procesos indicados en el boletín de servicio técnico de la empresa HYDRANAUTICS TSB107.24.

Asimismo, también se definirá la tasa anual de reemplazo de las membranas teniendo en cuenta que la vida útil de éstas es de 6 años y que en cada tubo de presión se introducirán 6 elementos.

### 8.1.9. Selección bombas hidráulicas

La selección de las bombas hidráulicas se realizará dependiendo de si se trata de una bomba de impulsión o de una bomba de dosificación:

#### 8.1.9.1. Selección bombas hidráulicas de impulsión

La selección de las bombas hidráulicas de impulsión se realizará a partir de su punto de funcionamiento deseado (caudal y presión) y se seleccionará aquella bomba en la que el punto de funcionamiento se encuentre dentro o más cercana a la curva característica de la bomba con el mayor rendimiento posible y menor potencia eléctrica consumida.

Para la selección de la bomba de presión se emplea el software “Product Center” de la empresa GRUNDFOS:

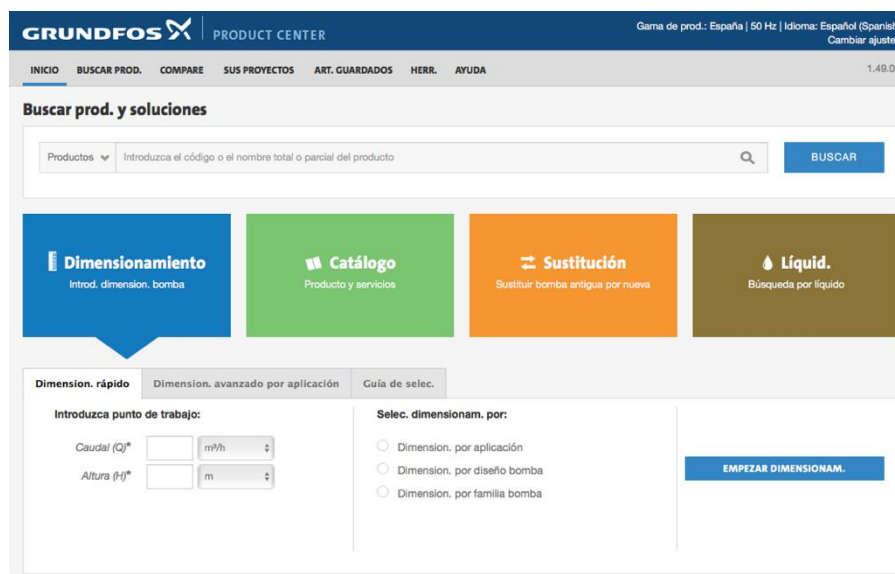


Figura 19: Pantalla principal buscador de productos y soluciones GRUNDFOS.

## Diseño de una Potabilizadora para el Tratamiento de Agua con Alto Contenido Salino, Nitratos y Herbicidas para una Población de 20.000 Habitantes

Tras indicar el punto de funcionamiento de la bomba y las condiciones de selección (por aplicación, por diseño de la bomba o por familia de bomba) el software de selección presenta una serie de bombas ordenadas por cercanía al punto de funcionamiento deseado o por menor coste de inversión y operación:

**Resultado del dimensionamiento**

Parám. dims. básicos EDITAR PARÁM. DIMENSION.

	Caudal (Q) m³/h	Altura (H) m	Selec. cómo dimensionar Dimension. por aplicación	Selección aplicación. Industria	Instalación Aumento de presión
--	--------------------	-----------------	--	------------------------------------	-----------------------------------

---

**PRODUCTOS ADECUADOS (8)**

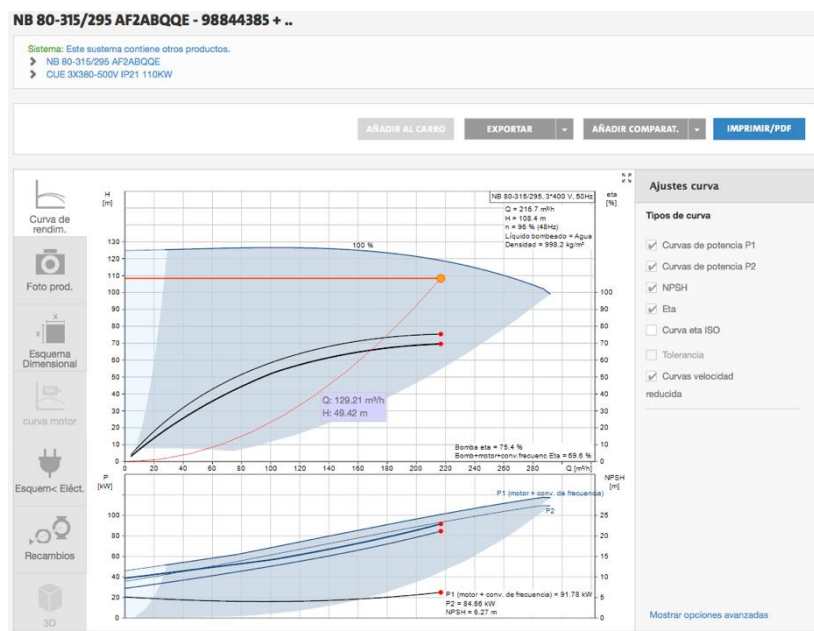
Acciones conjuntas: EXPORTAR AÑADIR COMPARAT. Dimension. tabla:  Mostrar ancho total

	Sistema	Producto n.º	Inf.	Nombre de producto	MPG	Coste del ciclo de vida [EUR/5 años]	Fases	U [V]	P2 [kW]	Tamaño de con. de salida	Funcionamiento máx. [bar]	Q [m³/h]	Q-dev [%]	H [m]	Id [l]
<input type="checkbox"/>	X	98844385 + ..		NB 80-315/295	51	162716	3	380 - 420	110	DN 80	16	216.8	0	108.4	
<input type="checkbox"/>	X	98972880 + ..		NK 80-315/295	51	166680	3	380 - 420	110	DN 80	16	216.8	0	108.4	
<input type="checkbox"/>	X	98844386 + ..		NB 80-315/310	51	167394	3	380 - 420	132	DN 80	16	216.8	0	108.4	
<input type="checkbox"/>	X	98972882 + ..		NK 80-315/310	51	172223	3	380 - 420	132	DN 80	16	216.8	0	108.4	
<input type="checkbox"/>	X	99087070 + ..		TP 100-1200/2	51	204042	3	380 - 420	132	DN 100	25	216.8	0	108.4	
<input type="checkbox"/>	X	99087069 + ..		TP 100-1410/2	51	212114	3	380 - 420	160	DN 100	25	216.8	0	108.4	
<input type="checkbox"/>	X	98303858 + ..		NBQ 125-80-315/295	51	162836	3	380 - 420	110	DN 80	16	216.8	0	108.4	
<input type="checkbox"/>		98844330		NB 65-315/308	22	146154	3	380-420D/660-725Y	90	DN 65	16	209.7	-3	108.3	

**Figura 20:** Pantalla "Resultado del dimensionamiento" GRUNDFOS.

Se selecciona la primera bomba de la lista mostrada por el software ya que se trata de la bomba cuyo punto de funcionamiento es igual o está más próximo al punto de funcionamiento deseado y cuyo coste de inversión y de operación es menor.

Tras seleccionar la bomba hidráulica, el software muestra la curva de rendimiento, la foto del producto, el esquema dimensional, la curva del motor eléctrico, el esquema eléctrico del equipo, los recambios disponibles, un modelo 3D del equipo, así como los resultados del dimensionamiento:



**Figura 21:** Pantalla resultados de la selección GRUNDFOS.

Finalmente, es posible descargar un informe de la selección de la bomba con todas sus características y condiciones de funcionamiento.

#### 8.1.9.2. Selección bombas hidráulicas de dosificación

En el caso de las bombas hidráulicas de dosificación se van a estudiar las bombas dosificadoras de membrana accionadas por motor y bombas dosificadoras de membrana por solenoide de la empresa Lutz-Jesco. Para ello se tendrá en cuenta que la bomba sea capaz de aportar el caudal a dosificar deseado y que, además, la presión a la que lo aporte sea mayor que la presión de la corriente de agua sobre la que se inyectará la solución a dosificar.

## 8.2. DISEÑO

En los siguientes apartados se describe el diseño final de la planta de potabilización para el tratamiento de agua con alto contenido salino, nitratos y herbicidas para una población de 20000 habitantes.

Asimismo, en el Plano nº 2 y en el Plano nº 3 se muestra el diagrama de bloques y el diagrama de flujo de la solución final diseñada.

### 8.2.1. Captación y bombeo del agua de pozo

Antes de definir la solución para la extracción de agua subterránea es necesario considerar el caudal de agua que se debe abastecer a la planta de potabilización, determinándose a partir de la producción de diseño y de la conversión a la que el sistema de ósmosis inversa operará. Según se indica más adelante, las necesidades de captación son de aproximadamente 5.203,2 m<sup>3</sup>/día.

En primer lugar, se calcula la capacidad de producción de los pozos empleando la ecuación [5] y considerando el valor de transmisividad media de 300 m<sup>2</sup>/día indicada por Olga García-Menéndez y col. para la zona cercana a Moncófar y un valor de descenso del nivel del acuífero de 10 m:

$$Q_{\text{pozo}} = (300 \times 10) / 4,4 = 681,82 \text{ m}^3 / \text{día} = 0,00789 \text{ m}^3 / \text{s} \quad (5)$$

Considerando que normalmente los pozos verticales son más económicos que los pozos radiales y que éstos se emplean para aportar una cantidad de agua menor a 20.000 m<sup>3</sup>/día (productividad entre 0,004 y 0,044 m<sup>3</sup>/s) para el diseño de esta planta potabilizadora se considerarán pozos verticales.

Por otro lado, con la capacidad de producción de cada pozo y el caudal de alimento de la nueva potabilizadora se determina el número de pozos necesarios:

$$n_{\text{pozos}} = 5.203,2 / 681,82 = 7,63 \approx 8 \text{ pozos} \quad (6)$$

Será necesaria la construcción de 9 pozos (8 + 1R) para alimentar a la planta potabilizadora de un caudal suficiente para mantener su capacidad de producción de diseño.

En el caso de las dimensiones del pozo (profundidad y diámetro) se realizan las siguientes consideraciones:

- **Profundidad:** se toma como referencia la profundidad del pozo n° 19 de la Figura 1 por su cercanía geográfica a los pozos que se construirán para alimentar a esta nueva potabilizadora, siendo su profundidad estimada 40 m.
- **Diámetro:** con el fin de determinar el diámetro óptimo del pozo vertical se consideran las siguientes dimensiones dependiendo de la capacidad del pozo:

**Tabla 21:** Dimensiones pozo vertical. Fuente: (Voutchkov, 2013)

Capacidad del pozo (m <sup>3</sup> /día)	Diámetro óptimo tubería del pozo (mm)
< 545	150
409 – 954	200
818 – 1910	250
1640 – 3820	300
2730 - 5450	350
4360 – 9810	400
6540 – 16.400	500
10.900 – 20.700	600

Teniendo en cuenta que la capacidad calculada de los pozos es de 681,82 m<sup>3</sup>/día, el diámetro óptimo de la tubería de PVC del pozo debe ser de 200 mm.

Para la captación y bombeo del agua de pozo se empleará la bomba hidráulica SP 30-5 de la empresa GRUNDFOS que funcionará con un caudal de 27,1 m<sup>3</sup>/h y una altura de impulsión de 41,5 m.

Una vez extraída el agua de los pozos, ésta llegará a un depósito pulmón de captación con capacidad de abastecer una hora el caudal de alimentación de la planta, desde donde será enviada hacia el depósito de alimentación de la planta potabilizadora. El volumen útil de dicho depósito será de 220 m<sup>3</sup>.

### **8.2.2. Línea de conducción a la planta potabilizadora y depósito de alimentación**

La línea de conducción desde el depósito pulmón de captación hasta el depósito de alimentación de la planta potabilizadora estará constituida por varias bombas de impulsión y por tuberías de acero inoxidable que evitará su corrosión debido a los elevados niveles salinos del agua.

En este caso se ha escogido la bomba NB 100-250/205 de la empresa GRUNDFOS, la cual bombeará un caudal de 217,6 m<sup>3</sup>/h con una altura de impulsión de 50,38 m desde el depósito pulmón de captación hasta el depósito de alimentación de la planta potabilizadora. La configuración del sistema de bombeo será de 1+1R bombas hidráulicas, con una bomba como redundancia en caso de que la primera falle.

Atendiendo a las tuberías de conducción de acero inoxidable, con el fin de seleccionar su diámetro nominal es necesario calcular su diámetro interior. Para su cálculo se considera una velocidad del agua de 1,8 m/s y un caudal de 0,0602 m<sup>3</sup>/s (216,8 m<sup>3</sup>/h):

$$D_i = \sqrt{4 \cdot 0,0602 / \pi \cdot 1,8} = 0,206 \text{ m} = 206 \text{ mm} \quad (7)$$

Por tanto, para la conducción del agua desde el depósito pulmón de captación hasta el depósito de alimentación de la planta potabilizadora se emplearán tuberías de acero inoxidable DN-200.

Por último, debido a que el depósito de alimentación deberá ser capaz de abastecer durante un día completo a la planta potabilizadora en caso de avería de alguna de las tomas de captación, éste deberá poseer un volumen útil de 5.250 m<sup>3</sup>.

### **8.2.3. Pretratamiento**

En los siguientes apartados se describe el diseño del proceso de pretratamiento de la planta potabilizadora objeto de este proyecto:

#### **8.2.3.1. Selección de etapas de pretratamiento**

Se selecciona la opción de emplear filtros de cartucho y filtros de arena dual a presión de una sola etapa con una tasa de carga entre 16 y 25 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h debido a las siguientes razones:

1. Se descarta la opción de emplear únicamente filtros de cartucho pues se desconoce el potencial de ensuciamiento del agua alimento y, por tanto, se decide emplear una solución conservadora que permita una mayor seguridad al sistema de ósmosis inversa.
2. El empleo de membranas de ultrafiltración y de microfiltración es una opción más cara y únicamente es práctica para los casos de aparición periódica de contaminantes como hierro y manganeso en su forma reducida.

Además del pre-tratamiento mediante etapas de filtración, tal y como se ha indicado anteriormente, también será necesario la adición de agentes antiincrustantes debido a la sobresaturación de CaSO<sub>4</sub> en la corriente de rechazo del sistema de ósmosis inversa.

Se empleará la bomba NKE 80-160/161 (configuración 1+1R) que trabajará a un caudal de 216,7 m<sup>3</sup>/h y una altura de 20,2 mca y toda el agua pretratada será almacenada en un depósito de 450 m<sup>3</sup>, lo que permitirá la alimentación durante 2 horas del sistema de ósmosis inversa.

### 8.2.3.2. Selección de equipos de filtración

Para el diseño de los filtros de arena dual a presión y de los filtros de cartucho se van a escoger equipos comerciales teniendo en cuenta las necesidades de la planta potabilizadora de agua objeto del proyecto:

#### Filtros de arena dual a presión

Los filtros de arena dual a presión que se tienen en cuenta para este proyecto son los filtros de arena DIN Series GRP de la empresa A FILTER, cuyas características técnicas se muestran a continuación:

**Tabla 22:** Características técnicas filtros de arena DIN Series GRP.

Díámetro interior	(mm)	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600
Área de filtración	(m <sup>2</sup> )	0,50	0,79	1,13	1,54	2,01	2,54	3,14	3,80	4,52	5,31
Tasa de carga a 30 m/h	(m <sup>3</sup> /h)	15	24	34	46	60	76	94	114	136	159
Entrada	DN	80	100	125	125	150	200	200	200	250	250
Salida	DN	80	100	125	125	150	200	200	200	250	250
Número de boquillas	(piezas)	37	61	91	121	163	199	253	301	349	423



**Figura 22:** Ejemplo filtro de arena DIN Series GRP.

La opción idónea elegida de las opciones mostradas en la Tabla 22 será aquella que cumpla con las siguientes dos condiciones:

1. Debido a que se desconoce la intensidad de pretratamiento necesaria para el agua alimento, se opta por una opción conservadora donde la tasa de carga del filtro se encontrará entre 20 y 21 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h (valores intermedios dentro del rango recomendado de 16 – 25 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h).
2. Se escogerá el modelo que permita el filtrado del caudal de alimento empleando el menor número de filtros posibles con el fin de simplificar la instalación y optimizar al máximo sus costes.

Para ello, empleando el software MATHCAD, se ha calculado el número de filtros necesarios para cada modelo distinto y en todo el rango de tasa de carga considerado empleando la siguiente ecuación:

$$N(\text{tasa}) = \text{ceil}\left(\frac{Q_a}{A \cdot \text{tasa}}\right) \quad (8)$$

Donde:

N: Número de filtros de arena necesarios.

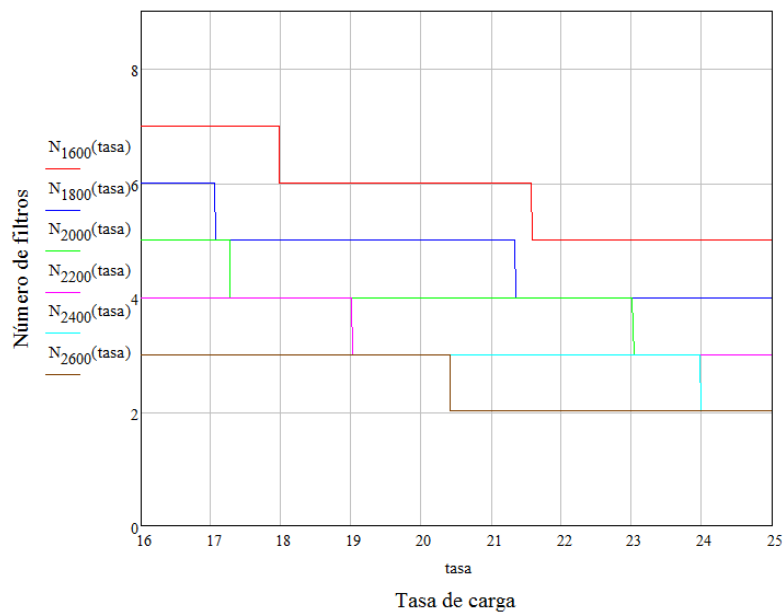
ceil(z): Función de MathCad que devuelve el entero más pequeño mayor o igual a z.

$Q_a$ : Caudal de alimento, 216,8 m<sup>3</sup>/h.

A: Área de filtración en m<sup>2</sup>.

tasa: Tasa de carga del filtro, entre 16 y 25 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h.

En el siguiente gráfico se muestra el número de filtros necesarios dependiendo del modelo de filtro y de la tasa de carga de funcionamiento:



**Gráfico 7:** Número de filtros de arena dependiendo de la tasa de carga de funcionamiento.

Tal y como se puede observar, el menor número de filtros de arena posible es 2 en el caso de que se emplee el modelo con un diámetro interior de 2600 mm, cuya tasa de carga será de 20,41 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h. Además, se instalarán dos filtros de arena adicionales para que, en caso de que dos de los filtros se estén lavado o se estropeen, el funcionamiento de la planta no se vea afectado, siendo 4 el número de filtros de arena total a instalar.



La composición del filtro de arena dual a presión DIN Series GRP con diámetro interior de 2600 mm se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 23:** Composición del filtro de arena dual a presión DIN Series GRP Di 2600 mm.

Filtro de arena de 1500 mm		Ø2600	Altura Capa
<b>Multicapa</b>	Hidro-Antracita	2575 kg	600 mm
	Arena 0,4 – 0,8 mm	4475 kg	600 mm
	Grava 1 – 2 mm	800 kg	100 mm
	Grava 2 – 3 mm	800 kg	100 mm
	Grava 3 – 5 mm	800 kg	100 mm

### Filtros de cartucho

La etapa de filtración de cartucho es el último pretratamiento al que se somete el agua de alimento antes de su tratamiento mediante ósmosis inversa. Con ello se consigue eliminar todas las partículas mayores de 5 µm, requisito demandado por los fabricantes de membranas de ósmosis inversa.

Se va a emplear filtros ECOCART de la empresa EATON Filtration GmbH, los cuales son depósitos metálicos SS 304 donde se introducen los distintos cartuchos que filtrarán el agua alimento.



**Figura 23:** Filtros ECOCART de la empresa EATON Filtration GmbH.

Por otro lado, los filtros de cartucho seleccionados son el modelo LOFTOP de la misma empresa fabricados con microfibras de polipropileno de alta pureza, cuyas características técnicas principales son:

- Finura de filtración: 5 µm.
- Longitud: 40''.
- Conexiones: DOE y adaptador O-ring.
- Material: Micro fibras de polipropileno puro fabricadas según normativa FDA, termoligado a un núcleo de polipropileno.
- Resistencia a temperatura: 80 °C continuo (121 °C durante esterilización por vapor).

- Presión diferencial máxima: 4.0 bar/25°C.
- Caudal de funcionamiento recomendado: 12 l/min/10'' longitud.



**Figura 24:** Cartuchos LOFTOP de la empresa EATON Filtration GmbH.

Para determinar la configuración idónea de los filtros de cartuchos que incorporará la planta de potabilización de agua se siguen los siguientes pasos:

1. Cálculo del número de cartuchos necesarios para tratar un caudal de 216,8 m<sup>3</sup>/h.
2. Cálculo del número mínimo de filtros para albergar el número de cartuchos necesarios.

Los resultados obtenidos en el dimensionamiento de los filtros de cartucho se muestran a continuación:

1. Cálculo del número de cartuchos necesarios para tratar un caudal de 216,8 m<sup>3</sup>/h:

Con el fin de reducir al máximo el coste total de la instalación se escogen los cartuchos de 40'' de longitud, por lo que el número de cartuchos necesarios para tratar el caudal de alimento objetivo son:

$$N_{\text{cartuchos}} = \frac{Q_{\text{alimento}}}{Q_{\text{cartucho}}} = \frac{216,8}{2,88} = 75,28 \approx 76 \text{ cartuchos} \quad (9)$$

Donde:

$N_{\text{cartuchos}}$ : número de cartuchos total.

$Q_{\text{alimento}}$ : caudal de entrada al sistema de ósmosis inversa (en m<sup>3</sup>/h).

$Q_{\text{cartucho}}$ : caudal que un cartucho puede filtrar (en m<sup>3</sup>/h).

2. Cálculo del número mínimo de filtros para albergar el número de cartuchos necesarios:

Debido a que se van a emplear cartuchos de 40'', los dos filtros que pueden albergar esta tipología de cartucho y el número total que pueden albergar son:

- Filtro 1240-E: Capacidad para albergar 12 cartuchos.
- Filtro 2240-E: Capacidad para albergar 22 cartuchos.

A partir de su capacidad, se ha calculado el número mínimo de filtros a partir de la siguiente ecuación:

$$N_{filtros} = \frac{N_{cartuchos}}{N_{cartuchos\_filtro}} \quad (10)$$

Donde:

$N_{filtros}$ : número de filtros total.

$N_{cartuchos\_filtro}$ : número total de cartucho por filtro.

El número de filtros a emplear se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 24:** Número mínimo de filtros de cartucho.

Filtro	Número de filtros	Caudal por filtro (m <sup>3</sup> /h)
1240-E	7	30,97
2240-E	4	54,20

Como se puede observar, el modelo que precisa de un menor número de filtros para el caudal alimento objetivo es el filtro 2240-E, cuya configuración y caudal de funcionamiento es:

**Tabla 25:** Configuración filtros de cartucho.

Filtro	Número de filtros	Caudal por filtro (m <sup>3</sup> /h)	Número de cartuchos	Caudal por cartucho (l/min)
2240-E	4 + 1	54,20	88	41,06

### 8.2.3.3. Selección y cálculo del caudal de antiincrustante

La necesidad de emplear antiincrustantes en la corriente alimento se debe a que, durante el proceso de ósmosis inversa, en la corriente de concentrado existe una supersaturación de sulfato cálcico.

Se empleará el antiincrustante basado en fosfonato disódico HYPERSPERSE MDC704 de la empresa GE Water & Process Technologies España, S.L. con un buen efecto inhibidor sobre el sulfato cálcico. Según el fabricante, la dosificación media recomendada se encuentra entre los 3 y 6 ppm.

El punto de dosificación del HYPERSPERSE MD704 será después de los filtros de arena para evitar que éstos retengan parte del producto y antes de los filtros de cartucho para evitar que el producto no disuelto correctamente pase a las membranas.

El software de diseño IMSDesign permite calcular el caudal de antiincrustante a dosificar y, para ello, es necesario introducir los siguientes datos:

- Concentración de la solución: 4,2% en peso
- Peso específico: 1,18
- Dosis: 4 ppm

Tras ello se obtiene que será necesaria la dosificación de 9,2 l/h del antiincrustante HYPERSPERSE MD704 con una concentración del 4% en peso en la corriente de alimentación del sistema de ósmosis inversa.

Para realizar la dosificación de antiincrustante se emplearán dos bombas modelo MINIDOS A 40 de la empresa LUTZ en disposición 1 + 1R.

Se instalarán dos depósitos agitados en paralelo con un volumen útil de 1,1 m<sup>3</sup> con el fin de asegurar una autonomía de 7 días en caso de una dosificación de 6 ppm. Además, esta disposición permitirá la preparación de la disolución en un depósito mientras que en el otro se está agotando la mezcla.

#### 8.2.4. Ósmosis inversa

Para realizar el diseño de la planta potabilizadora se han seguido los pasos indicados en el apartado anterior de metodología, cuyos resultados se describen a continuación:

##### 8.2.4.1. Definición agua bruta

Con el fin de definir el agua alimento en el software IMSDesign, en primer lugar, se han introducido todos los datos y parámetros indicados en el apartado 8.2.4.1. de esta memoria: nombre del proyecto, persona que realiza el cálculo, temperatura, tipo de agua y pH. Los valores de temperatura y pH introducidos son aquellos expuestos en la Tabla 10. Por otro lado, se ha escogido el tipo de agua “agua salobre de pozo sin ensuciamiento” puesto que el agua alimento proviene de un pozo salobre y, analizando su analítica físico-química, ésta no presenta ningún tipo de ensuciamiento destacable.

A continuación, puesto que se posee una analítica completa del agua alimento (ver Tabla 10), se ha optado por introducir la composición del agua de forma manual para que, posteriormente, el software calcule de forma automática la conductividad, los valores de saturación y las concentraciones de CO<sub>2</sub> y CO<sub>3</sub>.

Una vez definida el agua alimento en el software se procede con la caracterización del proceso de ósmosis inversa.

##### 8.2.4.2. Caracterización del proceso

El primer paso realizado para caracterizar el proceso de ósmosis inversa es concretar la configuración del sistema de ósmosis inversa determinando el número de trenes de la planta y, con el valor de flujo de permeado por tren, el software calcula el caudal total de permeado:

**Tabla 26:** Datos introducidos y calculados - “sistema”.

Sistema	
Número de trenes de la planta	2 trenes
Caudal total de permeado de la planta	162,5 m <sup>3</sup> /h

Por otro lado, en la sección de “trenes” se han introducido los siguientes datos característicos de la planta potabilizadora diseñada:

**Tabla 27:** Datos introducidos - “trenes”.

Trenes	
pH alimentación	7,2
Conversión	60% - 65% - 70% - 75%

**Tabla 27:** Datos introducidos – “trenes”. (Continuación)

Trenes	
Flujo de permeado por tren	81,3 m <sup>3</sup> /h
Producto químico y concentración	HCl (33%)
Edad de la membrana	0 años
Disminución de flujo por año	5%/año
Incremento de paso de sales por año	7%/año

Tal y como se puede observar en la anterior tabla, se va a simular una instalación compuesta por dos trenes, por lo que el caudal de permeado por tren será de 81,3 m<sup>3</sup>/h y dependiendo de la conversión considerada (entre el 60% y el 75%) se empleará la ecuación (3) para calcular el caudal de alimento y con el balance de materia global indicado en la ecuación (1) se calculará el caudal de permeado del tren.

Por tanto, con los datos de la Tabla 27 el software calcula los siguientes parámetros del proceso:

**Tabla 28:** Datos calculados - “trenes”.

Trenes	
Flujo promedio	Depende de la membrana considerada.
Caudal de alimentación	Conversión 60%: 135,50 m <sup>3</sup> /h
	Conversión 65%: 125,08 m <sup>3</sup> /h
	Conversión 70%: 116,14 m <sup>3</sup> /h
	Conversión 75%: 108,40 m <sup>3</sup> /h
Caudal de rechazo	Conversión 60%: 54,20 m <sup>3</sup> /h
	Conversión 65%: 43,78 m <sup>3</sup> /h
	Conversión 70%: 34,84 m <sup>3</sup> /h
	Conversión 75%: 27,10 m <sup>3</sup> /h
Tasa de dosificación producto químico	0 mg/l
Factor de ensuciamiento	1,00

Por último, antes de proceder con la simulación del sistema, el software IMSDesign sugiere una serie de membranas distintas y, para cada membrana en particular, calcula la configuración idónea del sistema (número de etapas, número de tubos de presión en cada etapa y número de elementos por tubo de presión).

En las siguientes tablas se muestran las membranas recomendadas por IMSDesign y la configuración calculada para cada caso particular:

**Tabla 29:** Membranas recomendadas por IMSDesign.

Módulo	Caudal de permeado (m <sup>3</sup> /d)	Rechazo de sales (%)	Tipo de elemento	Tamaño (mm x mm)	Área activa (m <sup>2</sup> )	Espaciado (mm)	Presión de prueba (MPa)
CPA2	37,9	99,70	BWRO Alto Rechazo	200 x 1016	33,9	0,864	1,55
CPA5 MAX	45,4	99,70	BWRO Alto Rechazo	200 x 1016	40,9	0,712	1,55

Diseño de una Potabilizadora para el Tratamiento de Agua con Alto Contenido Salino, Nitratos y Herbicidas para una Población de 20.000 Habitantes

**Tabla 29: Membranas recomendadas por IMSDesign. (Continuación)**

Módulo	Permeado (m <sup>3</sup> /d)	Rechazo de sales (%)	Tipo de elemento	Tamaño (mm x mm)	Área activa (m <sup>2</sup> )	Espaciado (mm)	Presión de prueba (MPa)
CPA5-LD	41,6	99,70	BWRO Alto Rechazo Baja Presión Diferencial	200 x 1016	37,2	0,864	1,55
CPA6 MAX	33,3	99,75	BWRO Alto Rechazo	200 x 1016	40,9	0,712	1,55
CPA6-LD	30,3	99,75	BWRO Alto Rechazo Baja Presión Diferencial	200 x 1016	37,2	0,864	1,55
CPA7 MAX	47,7	99,80	BWRO Alto Rechazo	200 x 1016	40,9	0,712	1,55
CPA7-LD	43,5	99,80	BWRO Alto Rechazo Baja Presión Diferencial	200 x 1016	37,2	0,864	1,55
ESNA1-LF2-LD	45,4	91,00 (CaCl <sub>2</sub> )	NF Ablandamiento Baja Presión Diferencial	200 x 1016	37,2	0,864	0,52
ESNA1-LF-LD	36,0	93,00 (CaCl <sub>2</sub> )	NF Ablandamiento Baja Presión Diferencial	200 x 1016	37,2	0,864	0,52
ESPA2	34,1	99,60	BWRO Baja Presión Alto Rechazo	200 x 1016	37,1	0,788	1,05
ESPA2 MAX	45,4	99,60	BWRO Baja Presión Alto Rechazo	200 x 1016	40,9	0,712	1,03
ESPA2-LD	37,9	99,60	BWRO Baja Presión Alto Rechazo Baja Presión Diferencial	200 x 1016	37,2	0,864	1,03
ESPA2-LD MAX	45,4	99,60	BWRO Baja Presión Alto Rechazo Baja Presión Diferencial	200 x 1016	40,9	0,864	1,03
ESPA4-LD	45,4	99,20	BWRO Presión Más Baja Baja Presión Diferencial	200 x 1016	37,2	0,864	0,70

**Tabla 30: Configuración por tren del sistema de ósmosis inversa.**

Módulo	Etapas	Nº tubos de presión	Elemento/tubo de presión	Nº Total Elementos
CPA2	Etapa 1	10	6	96
	Etapa 2	6	6	
CPA5 MAX	Etapa 1	9	6	84
	Etapa 2	5	6	
CPA5-LD	Etapa 1	10	6	90
	Etapa 2	5	6	
CPA6 MAX	Etapa 1	9	6	84
	Etapa 2	5	6	
CPA6-LD	Etapa 1	10	6	90
	Etapa 2	5	6	
CPA7 MAX	Etapa 1	9	6	84
	Etapa 2	5	6	
CPA7-LD	Etapa 1	10	6	90
	Etapa 2	5	6	

**Tabla 30:** Configuración por tren del sistema de ósmosis inversa. (Continuación)

Módulo	Etapa	Nº tubos de presión	Elemento/tubo de presión	Nº Total Elementos
ESNA1-LF2-LD	Etapa 1	10	6	90
	Etapa 2	5	6	
ESNA1-LF-LD	Etapa 1	10	6	90
	Etapa 2	5	6	
ESPA2	Etapa 1	10	6	90
	Etapa 2	5	6	
ESPA2 MAX	Etapa 1	9	6	84
	Etapa 2	5	6	
ESPA2-LD	Etapa 1	10	6	90
	Etapa 2	5	6	
ESPA2-LD MAX	Etapa 1	9	6	84
	Etapa 2	5	6	
ESPA4-LD	Etapa 1	10	6	90
	Etapa 2	5	6	

Con las configuraciones indicadas en la tabla anterior, se procedió a su simulación variando la conversión del sistema con el fin de determinar qué membrana y con qué conversión es la configuración óptima para su empleo en la planta potabilizadora diseñada en este proyecto.

#### 8.2.4.3. Resultados de las simulaciones

Se han realizado un total de 56 simulaciones correspondientes a las 14 membranas consideradas y, para cada una de éstas, se ha simulado su funcionamiento para una conversión del 60%, 65%, 70% y 75%.

Los resultados en detalle se muestran en el apartado 8.2.4.4. "Selección de membrana" donde se comparan los distintos módulos estudiados con el fin de escoger la membrana que más se ajusta a las necesidades del proyecto.

Cabe destacar que en todas las simulaciones el software advierte de la necesidad de emplear antiincrustante debido a la saturación de sulfato cálcico en la corriente de rechazo. El cálculo de la dosificación necesaria de antiincrustante en la corriente de alimento se describe en el apartado 8.1.3.3.

#### 8.2.4.4. Selección de membrana

A continuación, para cada criterio indicado en el apartado 7.1.4. se presentan los resultados de las simulaciones realizadas y se describen las razones que motivan la selección de la membrana ESPA2-LD y la exclusión de los demás elementos considerados:

- Cumplimiento de los límites de diseño recomendados por Hydranautics

El primer criterio considerado es que las condiciones de funcionamiento de la membrana que finalmente se escojan para la planta potabilizadora de agua no deberán estar fuera de los límites recomendados por el fabricante, en este caso Hydranautics.





- Coste anual de producción de agua potabilizada

El tercer criterio de exclusión considerado es el coste de producción de cada m<sup>3</sup> de agua potabilizada teniendo en cuenta el coste de inversión y el coste de operación y mantenimiento en una planta potabilizadora de agua por ósmosis inversa. El cálculo de dichos costes se describe a continuación:

Coste de capital o de inversión

El coste de capital o de inversión se ha obtenido a partir del coste de los bastidores de membranas ya que se conoce el coste de la unidad de ósmosis inversa, el cual se compone por el coste de los elementos de cada uno de las membranas estudiadas (ver Tabla 33), el coste de los tubos de presión empleados (904,71 € para el tubo de presión “Pentair CodeLine 80S30-6 8" x 240" FRP Membrane Housing”), el coste de los grupos bomba-motor y del grupo reserva (estimado en 70.702,79 € cada uno) y en los costes del montaje de equipos, tuberías, instrumentación y control, electricidad, obra civil, estructuras, edificios, aislamiento y pintura donde se han considerado unos factores para cada uno de estos conceptos en relación con el precio del conjunto membranas, tubos de presión y grupo bomba-motor.

A partir del coste del sistema de Ósmosis Inversa ya calculado y considerando los porcentajes del coste de inversión total mostrados entre paréntesis en la Tabla 32 se procede al cálculo de cada uno de los conceptos que componen los costes de capital o inversión del proyecto.

Para realizar dicho cálculo se ha tenido en cuenta una distribución típica de los diferentes conceptos de gasto, siendo el peso considerado de cada gasto el porcentaje mostrado entre paréntesis:

**Tabla 32:** Coste de capital o inversión total para un proyecto de baja complejidad. Fuente: (Lora)

Tipo de coste		Porcentaje del coste de inversión total (%)
<b>Costes directos de inversión (Construcción)</b>		
1	Acondicionamiento del terreno (accesos, parking, etc.)	1,5 – 2,0 (1,5)
2	Captación de agua	4,5 – 6,0 (5,5)
3	Pretratamiento	8,5 – 9,5 (9,0)
4	Sistema de Ósmosis Inversa	38,0 – 44,0 (38,0)
5	Postratamiento	1,5 – 2,5 (2,0)
6	Gestión del concentrado	3,0 – 4,0 (3,5)
7	Gestión de residuos	2,5 – 3,5 (3,0)
8	Sistemas eléctricos	2,5 – 3,5 (3,0)
9	Equipamiento y servicios auxiliares	2,5 – 3,0 (2,5)
10	Edificios	4,5 – 5,5 (5,0)
11	Puesta a punto	1,5 – 2,5 (2,5)
<b>Total costes directos de construcción</b>		<b>70,0 – 85,0 (75,5)</b>

Diseño de una Potabilizadora para el Tratamiento de Agua con Alto Contenido Salino, Nitratos y Herbicidas para una Población de 20.000 Habitantes

**Tabla 32:** Coste de capital o inversión total para un proyecto de baja complejidad. (Continuación) Fuente: (Lora)

Tipo de coste		Porcentaje del coste de inversión total (%)
<b>Servicios de ingeniería</b>		
1	Estudio previo de ingeniería	0,5 – 1,0 (1,0)
2	Puesta a punto	0,0 – 0,5 (0,5)
3	Diseño	3,5 – 4,5 (4,0)
4	Control y supervisión de la construcción	1,0 – 2,0 (1,5)
<b>Total costes del servicio de ingeniería</b>		<b>5,0 – 8,0 (7,0)</b>
<b>Desarrollo del proyecto</b>		
1	Administración, contratación y dirección	1,0 – 1,5 (1,5)
2	Permisos medioambientales	0,5 – 3,5 (3,0)
3	Servicios legales	0,5 – 1,0 (1,0)
<b>Total costes del desarrollo del proyecto</b>		<b>2,0 – 6,0 (5,5)</b>
<b>Financiación del proyecto</b>		
1	Interés durante la construcción	0,5 – 2,5 (1,5)
2	Servicio de reserva de la deuda	2,0 – 5,5 (2,5)
3	Otros costes de financiación	0,5 – 1,0 (1,0)
<b>Total costes de la financiación del proyecto</b>		<b>3,0 – 9,0 (5,0)</b>
<b>Contingencia</b>		<b>5,0 – 7,0 (7,0)</b>
<b>Total costes indirectos de capital</b>		<b>15,0 – 30,0 (24,5)</b>
<b>Total costes de capital</b>		<b>100 (100)</b>

El coste de cada membrana se ha obtenido de cuatro empresas comercializadoras de membranas de Hydranautics: Evoqua Water Technologies LLC, Forever Pure Corporation, GAPS Water Treatment y WaterAnywhere. Debido a que el precio indicado por estas empresas se expresa en dólares estadounidenses y en libras esterlinas, con el fin de realizar una comparación del coste de las membranas lo más cercana a la realidad, se ha considerado el valor del euro del día 28 de agosto de 2019: 0,902 €//\$ y 1,107 €/£.

En la siguiente tabla se muestran los precios de las membranas considerados para cada caso particular:

**Tabla 33:** Precio considerado de las membranas.

Membrana	Precio elemento		Empresa comercializadora
	\$ o £	€	
CPA2	824,44 \$	743,64 €	Evoqua Water Technologies LLC
CPA5 MAX	924,44 \$	833,84 €	Evoqua Water Technologies LLC
CPA5-LD	846,67 \$	763,70 €	Evoqua Water Technologies LLC
CPA6 MAX	840,00 \$	757,68 €	Forever Pure Corporation
CPA6-LD	922,22 \$	831,84 €	Evoqua Water Technologies LLC
CPA7 MAX	896,40 £	992,31 €	GAPS Water Treatment

**Tabla 33:** Precio considerado de las membranas. (Continuación)

Membrana	Precio elemento		Empresa comercializadora
	\$ o £	€	
CPA7-LD	913,33 \$	823,82 €	Evoqua Water Technologies LLC
ESPA2	816,00 \$	736,03 €	WaterAnywhere
ESPA2 MAX	982,22 \$	885,96 €	Evoqua Water Technologies LLC
ESPA2-LD	866,67 \$	781,74 €	Evoqua Water Technologies LLC
ESPA2-LD MAX	1.000,00 \$	902,00 €	GAPS Water Treatment

Por otro lado, el precio de los tubos de presión considerados se ha obtenido la empresa comercializadora Forever Pure Corporation, siendo su coste de 904,71 € para el tubo de presión "Pentair CodeLine 80S30-6 8" x 240" FRP Membrane Housing".

#### Coste de operación y mantenimiento

En el caso del coste de operación y mantenimiento, en primer lugar se ha calculado el coste del recambio de las membranas para una tasa de reemplazo del 20% y de los filtros de cartucho considerando su coste un 15% del coste de reemplazo de las membranas.

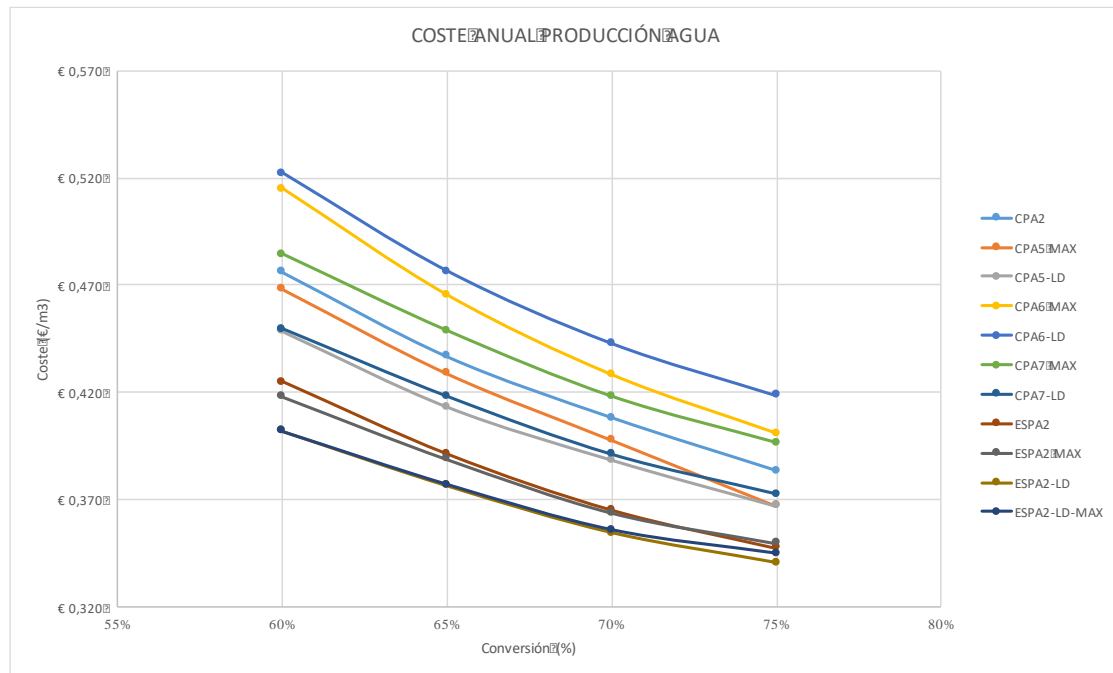
Por otro lado, con el precio de la energía eléctrica (0,094 €/kWh), la producción anual de agua (1.423.500 m<sup>3</sup>) y el consumo energético específico de cada membrana en particular se ha calculado el coste energético específico de la planta.

Teniendo en cuenta el coste de reemplazo de membranas y de filtros de cartucho y el coste energético específico de la planta se calcula el resto de las tipologías de coste a considerar en el caso de operación y mantenimiento de la potabilizadora considerando los siguientes porcentajes sobre el coste total mostrados entre paréntesis:

**Tabla 34:** Coste de operación y mantenimiento para un proyecto de baja complejidad. Fuente: (Lora)

Tipo de coste		Porcentaje del coste de operación y mantenimiento (%)
<b>Costes variables de operación y mantenimiento</b>		
1	Energía	40,0 – 56,0 (50,0)
2	Reactivos	3,0 – 6,5 (6,0)
3	Recambio de membranas y filtros de cartucho	5,0 – 9,0 (7,0)
4	Gestión de residuos	2,5 – 5,5 (4,0)
<b>Total costes variables de operación y mantenimiento</b>		<b>55,5 – 82,0 (67,0)</b>
<b>Costes fijos de operación y mantenimiento</b>		
1	Término de potencia	5,0 (5,0)
2	Mano de obra	5,0 – 9,0 (8,0)
3	Mantenimiento	6,5 – 12,5 (7,0)
4	Funcionamiento y control ambiental	0,5 – 4,0 (2,0)
5	Costes indirectos	7,5 – 18,5 (11,0)
<b>Total costes fijos de operación y mantenimiento</b>		<b>19,5 – 44,5 (33,0)</b>
<b>Total costes de operación y mantenimiento</b>		<b>100</b>

El coste específico por m<sup>3</sup> de agua para cada una de las tipologías de membranas estudiadas y para cada porcentaje de conversión se muestra en el siguiente gráfico:



**Gráfico 9:** Coste específico del agua potabilizada.

Analizando los costes específicos por m<sup>3</sup> de agua potabilizada se identifican dos membranas cuyo coste cuando funcionan con una conversión del 75% es muy próximo entre sí, éstas son: ESPA2-LD y ESPA2-LD-MAX. El hecho de considerar el coste para la conversión más alta estudiada se debe al objetivo de reducir al máximo el flujo de rechazo y, por tanto, obteniendo el mayor caudal de permeado posible al mismo tiempo que se consigue el menor coste posible.

El resto de membranas (CPA2, CPA5 MAX, CPA5-LD, CPA6 MAX, CPA6-LD, CPA7 MAX, CPA7-LD, ESPA2 y ESPA2 MAX) se han descartado debido a su elevado coste de producción de agua potable.

En la siguiente tabla se muestra el coste por m<sup>3</sup> de agua cuando las membranas seleccionadas operan a una conversión del 75%:

**Tabla 35:** Coste específico del agua potabilizada.

Módulo	Conversión	Coste
ESPA2-LD	75%	0,339 €/m <sup>3</sup>
ESPA2-LD MAX	75%	0,345 €/m <sup>3</sup>

Debido a que la diferencia del coste de producción del agua es muy pequeña (diferencia de 0,004 €/m<sup>3</sup>) se evalúan las prestaciones técnicas de cada una de estas dos membranas para escoger la membrana más rentable y técnicamente más avanzada.

- Comparativa de las características técnicas de las membranas seleccionadas

Las dos membranas consideradas pertenecen a la familia ESPA (Energy Saving Polyamide), las cuales son las membranas idóneas para aplicaciones que precisan de una elevada eficiencia energética, al mismo tiempo que presentan buenas prestaciones en cuanto a productividad y rechazo de sales.

Dentro de la familia ESPA existen las versiones LD y MAX:

- LD: Se trata de la tecnología Low Differential LD que permiten minimizar el fouling coloidal cuando se emplea un pre-tratamiento convencional.
- MAX: Se trata de una variante con un área activa de 40,9 m<sup>2</sup>, por lo que este incremento de el área activa de la membrana reduce los costes capitales pues se requiere de un menor número de elementos y de un menor espaciado entre capas de membrana.

Atendiendo a las particularidades de cada una de las versiones de la familia de membranas ESPA, a priori la membrana ESPA2-LD-MAX parece ser la membrana técnicamente más adecuada ya que, además de ser una membrana que minimiza el fouling, posee una mayor área activa que la membrana ESPA2-LD-MAX lo que le permite reducir el número de elementos necesarios para obtener una producción de 3.900 m<sup>3</sup>/día pero debido a su mayor coste (902 € frente a 866,67 €) hace que el coste de producción de la membrana ESPA2-LD sea menor. Así, teniendo en cuenta que la versión MAX únicamente aumenta el área activa y no aumenta su vida útil, se escoge la membrana ESPA2-LD puesto que presenta las mismas prestaciones que la membrana ESPA2-LD-MAX y, además, el coste por m<sup>3</sup> de agua tratada es menor.

#### 8.2.4.5. Configuración final

Tras seleccionar la membrana ESPA2-LD como la membrana con las prestaciones y características técnicas que más se aproximan a las necesidades de la planta potabilizadora se presenta la configuración final del sistema de ósmosis inversa y las características y propiedades particulares de dicho sistema para una conversión del 75%:

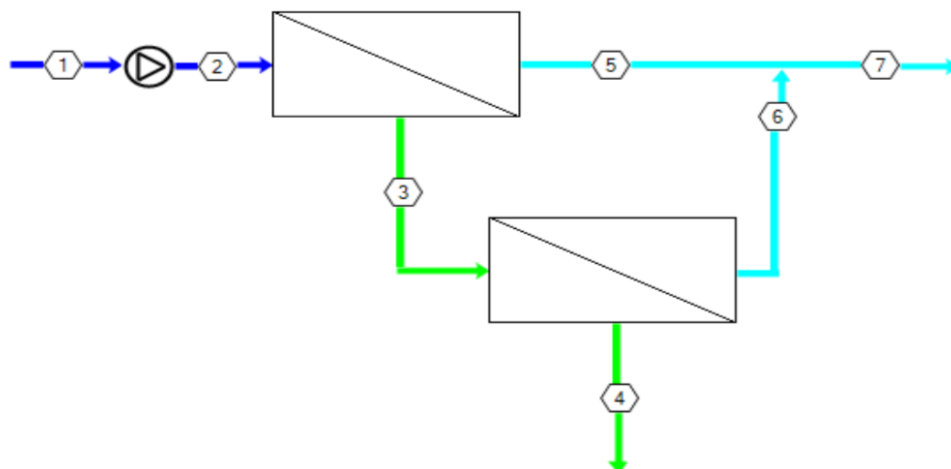


Figura 25: Esquema sistema de ósmosis inversa.

Diseño de una Potabilizadora para el Tratamiento de Agua con Alto Contenido Salino, Nitratos y Herbicidas para una Población de 20.000 Habitantes

---

Donde:

- Corriente 1: Corriente de entrada a la bomba de presión.
- Corriente 2: Corriente de alimentación a la primera etapa.
- Corriente 3: Corriente rechazo de la primera etapa y alimento de la segunda etapa.
- Corriente 4: Corriente de rechazo de la segunda etapa y del sistema global.
- Corriente 5: Corriente de permeado de la primera etapa.
- Corriente 6: Corriente de permeado de la segunda etapa.
- Corriente 7: Corriente de permeado global (mezcla permeado etapas 1 y 2).

A continuación, se presenta los principales parámetros de funcionamiento del sistema diseñado (se recuerda que el sistema está constituido por dos bastidores) y las características de la membrana seleccionada (ESPA2-LD):

**Tabla 36:** Configuración y características de un bastidor del sistema de ósmosis inversa con la membrana ESPA2-LD.

Paso - Etapa	Caudal Perm. (m <sup>3</sup> /h)	Caudal/Tubo		Flujo (lmh)	DP (bar)	Flujo Máx. (lmh)	Presión por etapas			TDS Perm. (mg/l)	Elemento	Nº Elementos	Nº Tubos por Nº Elementos
		Alim. (m <sup>3</sup> /h)	Conc. (m <sup>3</sup> /h)				Alim. (bar)	Perm. (bar)	Conc. (bar)				
1-1	65,1	10,8	4,3	29,2	0,8	34,6	10,6	0	9,8	47,1	ESPA2-LD	60	10 x 6M
1-2	16,2	8,7	5,4	14,6	0,7	19,7	9,8	0	8,9	238,2	ESPA2-LD	30	5 x 6M

**Tabla 37:** Características de la membrana ESPA2-LD. Fuente: (Hydranautics)

Descripción General	
Flujo de permeado	37,9 m <sup>3</sup> /día
Rechazo de sales	99,6% (99,5% mínimo)
Condiciones del test	Solución de 1500 ppm NaCl. Presión aplicada de 1,03 MPa. Temperatura de operación de 25 °C. Conversión del 15%. Rango de pH entre 6,5 y 7,0.
Descripción Membrana	
Configuración	Membrana enrollada en espiral de bajo ensuciamiento (bajo fouling)
Material	Poliamida
Área activa	37,2 m <sup>2</sup>
Espaciador	0,86 mm
Usos y Restricciones	
Presión máxima	4,14 MPa
Concentración máxima de cloro	< 0,1 ppm
Temperatura máxima de operación	45 °C
Rango de pH, continuo (limpieza)	2 – 10,6 (1 – 12)
Turbidez máxima agua alimento	1,0 NTU

**Tabla 37:** Características de la membrana ESPA2-LD. (Continuación) Fuente: (Hydranautics)

Usos y Restricciones	
SDI máxima agua alimento (15 min)	5,0
Flujo de alimentación máximo	19,3 m <sup>3</sup> /h
Flujo de rechazo mínimo	2,7 m <sup>3</sup> /h
Pérdida de presión máxima por elemento	0,10 MPa

Asimismo, para el bombeo del agua pretratada a los bastidores de ósmosis inversa se empleará la bomba NB 80-315/295 de la empresa GRUNDFOS en configuración 2+1R con una bomba adicional de seguridad que bombeará un caudal de 216,8 m<sup>3</sup>/h a una presión de 10,6 bar.

Por otro lado, las concentraciones de los distintos iones que componen el agua tratada, así como su valor de TDS y de pH para las corrientes de alimentación, permeado y rechazo son:

**Tabla 38:** Composición corrientes del sistema de ósmosis inversa.

Ion/Compuesto (mg/l)	Alimentación	Permeado	Rechazo 1	Rechazo 2
Dureza, como CaCO <sub>3</sub>	833,00	6,58	3321,90	3321,90
Ca <sup>2+</sup>	333,20	2,63	832,30	1328,80
Na <sup>+</sup>	613,10	22,92	1516,50	2390,60
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0,70	0,00	5,40	15,50
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	469,00	14,61	1156,80	1833,80
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	570,00	2,50	1425,50	2279,10
Cl <sup>-</sup>	700,00	12,19	1743,10	2771,50
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	246,00	30,57	590,40	894,90
CO <sub>2</sub>	41,79	41,80	41,79	41,79
TDS	<b>2932,00</b>	<b>85,40</b>	<b>7270,04</b>	<b>11514,17</b>
pH	<b>7,20</b>	<b>5,77</b>	<b>7,56</b>	<b>7,74</b>

Atendiendo a la concentración de herbicidas y otros pesticidas, como se ha indicado anteriormente, se considera un rechazo del 90%, por lo que sus concentraciones en las corrientes de alimento, permeado y rechazo son:

**Tabla 39:** Composición corrientes del sistema de ósmosis inversa – pesticidas.

Pesticida	Alimentación	Permeado	Rechazo
Imazalil	< 0,05 µg/l	< 5,00 ng/l	< 0,185 µg/l
Metalaxil	< 0,05 µg/l	< 5,00 ng/l	< 0,185 µg/l
Tiabendazol	< 0,05 µg/l	< 5,00 ng/l	< 0,185 µg/l
Bromacilo	< 0,05 µg/l	< 5,00 ng/l	< 0,185 µg/l
Clorotoluron	< 0,05 µg/l	< 5,00 ng/l	< 0,185 µg/l
Desetil-terbutilazina	0,47 µg/l	47,00 ng/l	1,739 µg/l
Desetilatrizona	< 0,05 µg/l	< 5,00 ng/l	< 0,185 µg/l

**Tabla 39:** Composición corrientes del sistema de ósmosis inversa – pesticidas. (Continuación)

Pesticida	Alimentación	Permeado	Rechazo
Desisopropilatrizona (DIA)	< 0,05 µg/l	< 5,00 ng/l	< 0,18 5µg/l
Diurón	< 0,05 µg/l	< 5,00 ng/l	< 0,185 µg/l
Isoproturón	< 0,05 µg/l	< 5,00 ng/l	< 0,185 µg/l
Linuron	< 0,05 ng/l	< 5,00 pg/l	< 0,185 ng/l
Prometrina	< 0,005 µg/l	< 0,50 ng/l	< 0,0185 µg/l
Propazina	< 0,005 µg/l	< 0,50 ng/l	< 0,0185 µg/l
Terbumeton-desetil	< 0,05 µg/l	< 5,00 ng/l	< 0,185 µg/l
Terbutilazina	< 0,005 µg/l	< 0,50 ng/l	< 0,0185 µg/l
Clorofenvinfos	< 0,005 µg/l	< 0,50 ng/l	< 0,0185 µg/l
Clorpirifos	< 0,005 µg/l	< 0,50 ng/l	< 0,0185 µg/l
Diazinon	< 0,005 µg/l	< 0,50 ng/l	< 0,0185 µg/l
Malatión	< 0,005 µg/l	< 0,50 ng/l	< 0,0185 µg/l

Como se puede observar, en ningún caso se supera el límite máximo de 0,1 µg/l por pesticida individual y de 0,5 µg/l de concentración global de pesticidas.

Por otro lado, es importante prestar atención a los índices de saturación del sistema, pues es necesario el uso de antiincrustantes debido a que la concentración de CaSO<sub>4</sub> es mayor al 100% y debido a que el valor del LSI (Índice de Langelier) es positivo :

- $\frac{CaSO_4}{kspp} * 100\%$ : 137% (Concentrado).
- LSI: 2,33 (Concentrado).

La dosificación de antiincrustantes necesaria en la corriente de alimento se calcula en el apartado 8.2.3.3. *Selección y cálculo caudal antiincrustante.*

Toda el agua osmotizada será almacenada en un depósito de 350 m<sup>3</sup> de volumen útil, lo que permitirá la alimentación de la línea de postratamiento durante 2 horas y, siguiendo esta misma línea, el agua de la corriente de rechazo se almacenará en un depósito de 110 m<sup>3</sup> de capacidad útil.



### 8.2.5. Postratamiento

En este apartado se describen las etapas de postratamiento que es necesario realizar con el fin de que el agua osmotizada pueda ser empleada y consumida por las personas.

Para el bombeo del agua osmotizada por el sistema de postratamiento se empleará la bomba SMD 150-320 B que bombeará un caudal de 162,6 m<sup>3</sup>/h con una presión de 3 bar.

Por tanto, en los siguientes apartados se describe las técnicas de remineralización y de desinfección que se emplearán en la planta potabilizadora de agua salobre:

#### 8.2.5.1. Remineralización

Antes de diseñar el proceso de remineralización del agua permeada es necesario escoger, entre las técnicas de remineralización mostradas en la Tabla 19, la técnica más adecuada para obtener un agua adecuada para el consumo humano que presente una composición que se encuentre dentro de los rangos de concentración, pH y LSI indicados en la Tabla 20.

Teniendo en cuenta que en el agua permeado obtenido tras el proceso de ósmosis inversa diseñado en este proyecto existe una concentración elevada de CO<sub>2</sub> disuelto, no será necesario realizar un aporte adicional de dióxido de carbono durante el proceso de remineralización. Además, con el fin de reducir dicha concentración a un valor cercano a 0,7 mg/l que corresponde con el valor característico del equilibrio del agua con la atmósfera (ver Gráfico 6), se empleará la técnica 2 ya que, por estequiometría de la reacción del proceso, éste consume el doble de CO<sub>2</sub> que la técnica 1 y, por lo tanto, facilitará su disminución en el agua y eliminará la necesidad de emplear un desgasificador en el proceso.

Por todo ello, para la remineralización del permeado se va a emplear carbonato cálcico (CaCO<sub>3</sub>) y sosa caustica (NaOH) para aumentar el pH del agua. La determinación de la dosificación de carbonato cálcico y de sosa caustica a introducir en la corriente de permeado se ha realizado empleando el software IMSDesign que, en la pestaña de “Postratamiento”, permite simular cómo variará la composición y características del agua dependiendo de los productos químicos dosificados:

Por tanto, con el fin de determinar la cantidad de Ca(OH)<sub>2</sub> que se dosificará al agua tratada se calcula de forma aproximada la dosificación necesaria de este compuesto químico para alcanzar una dureza de 52,58 mg CaCO<sub>3</sub>/L empleando las siguientes ecuaciones:

- Cálculo de Ca<sup>2+</sup> a dosificar para alcanzar una dureza de 52,58 mg CaCO<sub>3</sub>/L:

$$Dureza = \left( \frac{Ca_{pot}}{PM_{Ca}} + \frac{Mg_{pot}}{PM_{Mg}} \right) \cdot PM_{CaCO_3} \quad (11)$$

$$Ca_{remin} = Ca_{pot} - Ca_{perm} \quad (12)$$

Donde:

Dureza: dureza del agua objetivo (52,58 mg CaCO<sub>3</sub>/L).

Ca<sub>pot</sub> y Mg<sub>pot</sub>: concentración de Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup> en el agua potable.

Ca<sub>remin</sub>: concentración de Ca<sup>2+</sup> a aportar durante la remineralización.

Ca<sub>perm</sub>: concentración de Ca<sup>2+</sup> en la corriente de permeado.

$PM_{Ca}$ ,  $PM_{Mg}$  y  $PM_{CaCO_3}$ : Peso molecular de  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  y  $CaCO_3$ .

- Cálculo de la dosificación de  $Ca(OH)_2$  necesaria:

Teniendo en cuenta la relación  $1 \text{ mol } Ca^{2+} \leftrightarrow 1 \text{ mol } Ca(OH)_2$ :

$$Ca(OH)_2 = \frac{Ca_{remin} * PM_{Ca(OH)_2}}{PM_{Ca}} \quad (13)$$

Donde:

$Ca(OH)_2$ : concentración de  $Ca(OH)_2$  a dosificar.

$PM_{Ca(OH)_2}$ : peso molecular de  $Ca(OH)_2$ .

Se determina que la dosificación adecuada de  $Ca(OH)_2$  es de 33,8 mg/l (considerando una concentración del 100%), dato que se introduce en el software IMSDesign, obteniéndose los siguientes resultados:

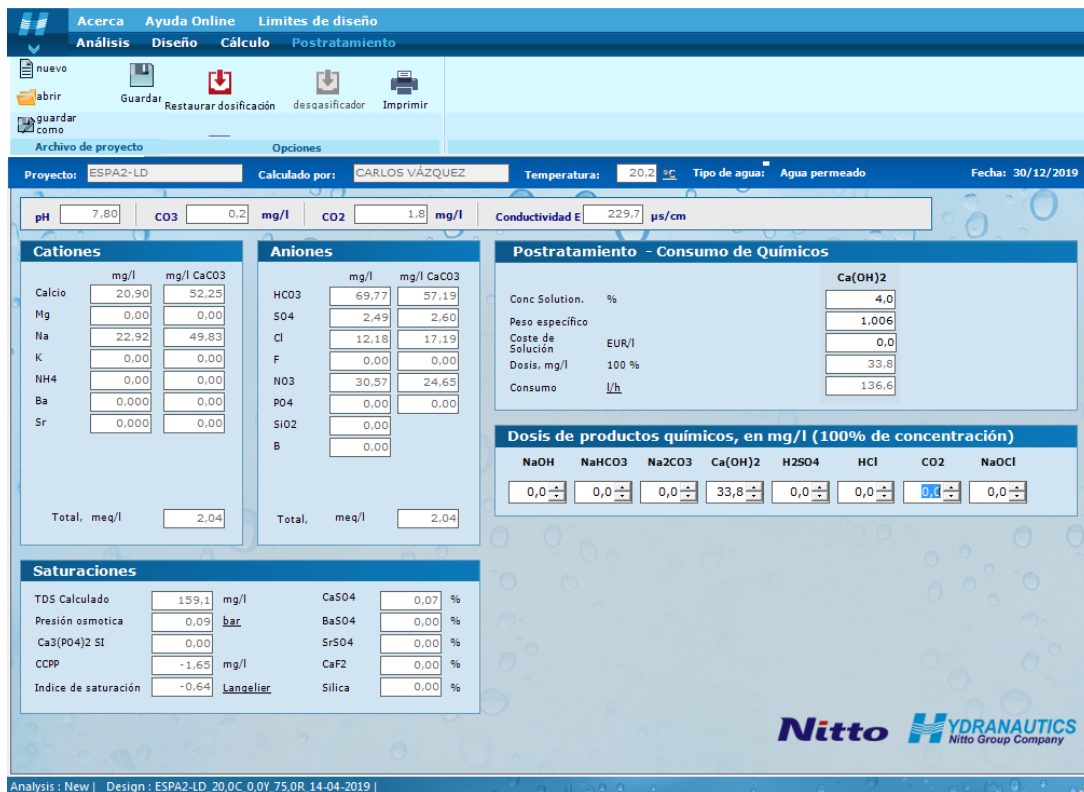


Figura 26: Pantalla "Postratamiento" IMSDesign – dosificación de  $Ca(OH)_2$ .

La lechada de cal que se emplearán tendrá una concentración del 4% ya que se trata de la concentración máxima recomendada para evitar la aparición de problemas como pueden ser la obstrucción de las tuberías por precipitación del carbonato cálcico.

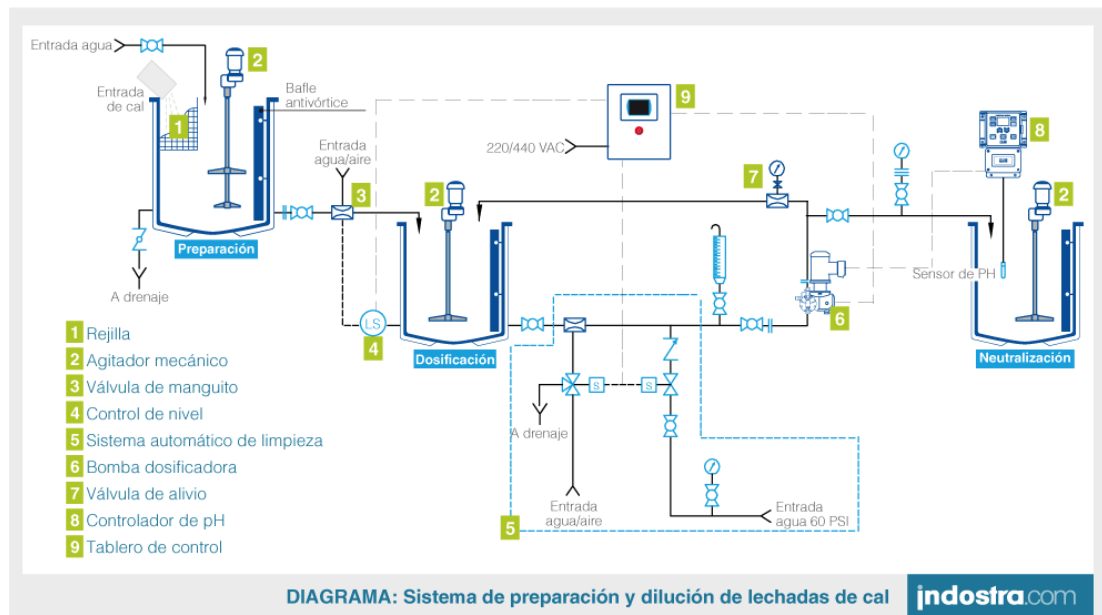
Diseño de una Potabilizadora para el Tratamiento de Agua con Alto Contenido Salino, Nitratos y Herbicidas para una Población de 20.000 Habitantes

El caudal de lechada de cal al 4% a dosificar es de 136,6 l/h, alcanzando la siguiente composición y características en el agua producto:

**Tabla 40:** Características y composición del agua producto tras dosificación de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Parámetro	Rango	Agua Producto
pH	$8,2 \pm 0,1$	7,80
$\text{HCO}_3^-$ (mg/l)	$68 \pm 3$	69,77
$\text{Ca}^{2+}$ (mg/l)	$21 \pm 2$	20,90
$\text{CO}_2$ (mg/l)	$0,7 \pm 0,1$	1,80
LSI	$\pm 0,15$	- 0,64

Para la preparación y dosificación de la lechada de cal se empleará una solución industrial ya diseñada como es el caso de la solución de la empresa INDOSTRA, S.A., cuya instalación se muestra en la siguiente figura:

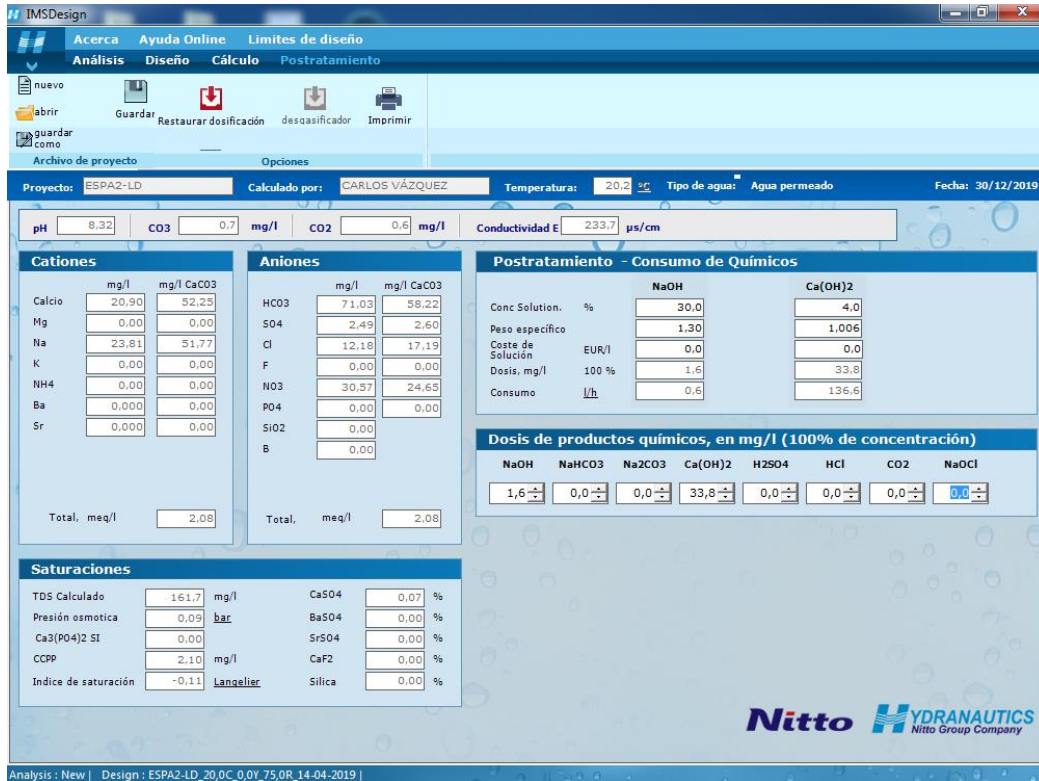


**Figura 27:** Sistema de preparación y dilución de lechadas de cal. Fuente: (INDOSTRA, S.A.)

Por otro lado, con el fin de aumentar el pH hasta un valor cercano a 8,2, aumentar, el valor de LSI hasta dentro del rango recomendado y reducir la concentración de  $\text{CO}_2$  disuelto hasta una concentración de alrededor de 0,7 mg/L se dosificará NaOH con una concentración del 30%.

Como se puede observar en la siguiente pantalla de IMSDesign, será necesario una dosificación de 1,6 mg/l de NaOH al 100%, lo que se traduce en una dosificación de 0,6 l/h con una concentración del 30%. Para realizar dicha dosificación se empleará la bomba dosificadora de diafragma de solenoide MAGDOS LP 05 de la empresa LUTZ-JESCO que bombeará el NaOH desde un depósito de 15 L (capacidad para alimentar durante un día al sistema).

## Diseño de una Potabilizadora para el Tratamiento de Agua con Alto Contenido Salino, Nitratos y Herbicidas para una Población de 20.000 Habitantes



**Figura 28:** Pantalla “Postratamiento” IMSDesign – dosificación de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y de  $\text{NaOH}$ .

La composición del agua final se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 41:** Características y composición del agua producto tras dosificación de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y de  $\text{NaOH}$ .

Parámetro	Rango	Agua Producto	
		$\text{Ca}(\text{OH})_2$	$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{NaOH}$
pH	$8,2 \pm 0,1$	7,80	8,32
$\text{HCO}_3^-$ (mg/l)	$68 \pm 3$	69,77	71,03
$\text{Ca}^{2+}$ (mg/l)	$21 \pm 2$	20,90	20,90
$\text{CO}_2$ (mg/l)	$0,7 \pm 0,1$	1,80	0,60
LSI	$\pm 0,15$	-0,64	-0,11

Como se puede observar, la composición del agua final se encuentra dentro del rango de la composición y características recomendadas.

### 8.2.5.2. Cloración

En el caso de la cloración, se realizará una dosificación de NaClO de 1,5 ppm empleando una disolución al 10% en peso. Para calcular el caudal de hipoclorito sódico a dosificar se emplea el software IMSDesign obteniendo el siguiente resultado:

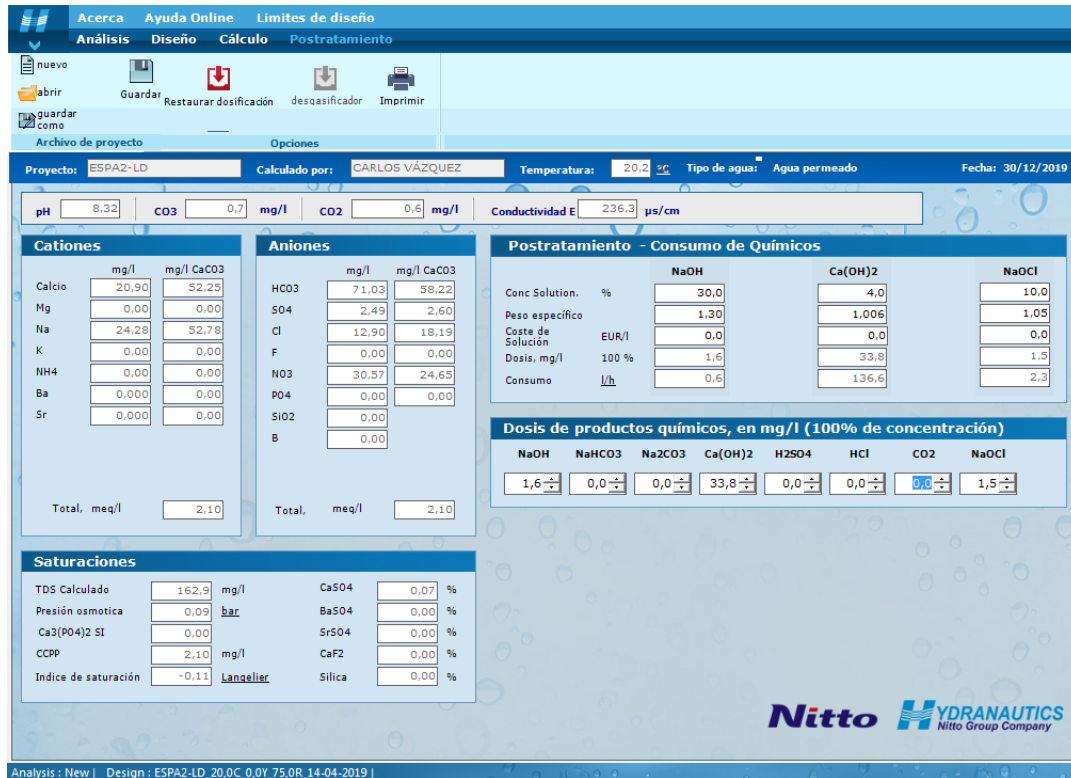


Figura 29: Pantalla “Postratamiento” IMSDesign – dosificación de NaOCl.

Como se puede observar en la figura anterior, será necesario dosificar un caudal de 2,3 l/h de disolución de NaClO al 10% en peso.

La disolución de para la dosificación de NaClO se emplearán dos bombas de dosificación MAGDOS LP 2 de la empresa LUTZ-JESCO en disposición 1 + 1R que bombearán la disolución de NaClO desde un depósito de 60 L con capacidad suficiente para alimentar al sistema durante un día entero.

Tras el proceso de postratamiento, la composición del agua potable final es la siguiente:

Tabla 42: Composición agua potable final.

Ion/Compuesto (mg/l)			
Conductividad (µS/cm)	236,30	Cl <sup>-</sup>	12,90
Ca <sup>2+</sup>	20,90	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	30,57
Na <sup>+</sup>	24,28	CO <sub>2</sub>	0,60
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0,70	TDS	162,90
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	71,03	pH	8,32
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2,49		

En el caso de los pesticidas, su concentración no varía en la etapa de postratamiento, por lo que ésta se puede observar en la Tabla 39.

Todas las concentraciones obtenidas en el agua potable final cumplen con los límites indicados en el RD 140/2003.

#### **8.2.6. Almacenamiento de agua potable**

Teniendo en cuenta que el depósito de agua potable deberá permitir abastecer agua potable durante un día completo a una población de 20.000 habitantes se empleará un depósito con un volumen útil de 4.000 m<sup>3</sup>. Desde este depósito se dará suministro al sistema de agua potable de la zona.

#### **8.2.7. Gestión del rechazo y de las aguas de limpieza**

Antes de proceder con el diseño del sistema de gestión del rechazo y de las aguas de limpieza es necesario identificar qué contaminantes químicos posee y su composición:

- Composición agua de rechazo: ver Tabla 38 y Tabla 39.
- Composición agua de lavado:
  - Filtros de arena: Agua con partículas sólidas retenidas en el filtro.
  - Membranas de ósmosis inversa: soluciones químicas de lavado, partículas de las incrustaciones, partículas coloidales, etc.

Tras identificar los contaminantes químicos y la composición de las aguas de rechazo y de limpieza se procede a la selección de la opción que se empleará para su evacuación y al diseño del proceso necesario para efectuarlo:

##### 8.2.7.1. Selección opción para la evacuación de las aguas de rechazo y de limpieza

Analizando la composición de las aguas de rechazo y de limpieza, la geografía hídrica cercana a Moncófar y los costes de cada opción para su evacuación se descartan las siguientes opciones:

- Vertido a la red municipal de saneamiento: la composición de las aguas de rechazo supera considerablemente los límites máximos de concentración de sulfatos, cloro y nitratos, lo que dificultaría considerablemente su tratamiento y, por consiguiente, aumentaría el coste de la planta.
- Inyección en pozos profundos: la construcción de esta tipología de pozos y de sus instalaciones es muy costosa, por lo que únicamente se consideraría como última opción si las demás alternativas no fueran adecuadas.
- Vertido al mar: es necesario realizar una inversión elevada para realizar la captación de agua de mar que se empleará en la dilución de la corriente rechazo de la planta potabilizadora y para su evacuación mediante emisarios submarinos.
- Estanques de evaporación: es necesario el empleo de grandes extensiones de terreno y, además, su efectividad depende del clima puesto que en éstos el agua se evapora, dejando un lodo que se debe retirar y tratar.

Teniendo en cuenta que en las proximidades de la planta potabilizadora existe una EDAR (Estación Depuradora de Aguas Residuales) a 1 km de distancia aproximadamente, se escoge la opción de vertido a una masa de agua superficial ya que la EDAR posee capacidad suficiente para tratar la corriente de rechazo de la planta potabilizadora y verterla al río Belcaire.



**Figura 30:** Distancia entre la planta potabilizadora diseñada y la EDAR de Moncófar. Fuente: (Google Maps)

Gracias a esta solución se consigue reducir el coste de construcción y operación de la planta potabilizadora puesto que únicamente será necesario la construcción de una línea de bombeo de agua desde el depósito de almacenamiento de agua de rechazo y de limpieza de la potabilizadora a la entrada de la EDAR de Moncófar, no siendo necesario el empleo de otras infraestructuras para el tratamiento y evacuación de la corriente de rechazo de la planta potabilizadora diseñada.

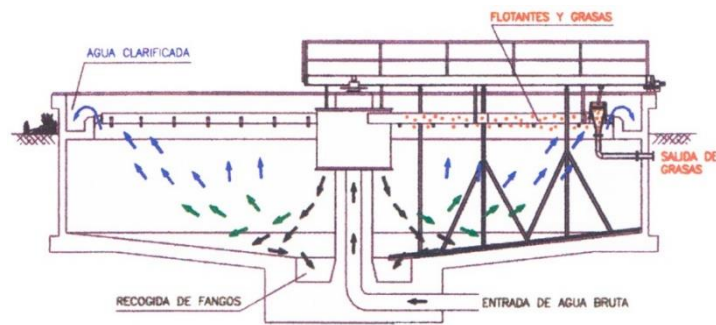
Por tanto, teniendo en cuenta que la capacidad de la EDAR de Moncófar es de 6.000 m<sup>3</sup>/día, ésta puede asumir los 1.300 m<sup>3</sup>/día de agua de rechazo que genera la planta potabilizadora diseñada. Con ello se alcanzaría un factor de dilución mayor a 1:4 lo que, junto con los tratamientos efectuados en la EDAR, se alcanzaría una composición del agua apta para su evacuación al río.

#### 8.2.7.2. Diseño sistema de gestión y evacuación de las aguas de rechazo y de limpieza

Para el bombeo de las aguas de rechazo y de limpieza que la planta potabilizadora genere al depósito de dilución de la planta EDAR de Moncófar es necesario realizar una primera etapa de separación de los sólidos en suspensión que éstas puedan tener. Para ello, se empleará un depósito decantador que tendrá la función de, por un lado, servir como depósito pulmón y, por otro lado, recoger los posibles fangos producidos por la decantación de las partículas propias de las incrustaciones retiradas de las membranas y de las partículas retiradas de los distintos filtros de los que el proceso se compone.



El diseño y funcionamiento del depósito decantador se muestra en la siguiente figura:



**Figura 31:** Diseño y funcionamiento del depósito decantador. Fuente: (Hidrometalica)

En este caso se escoge el modelo DCR-800 de la empresa HIDROMETALICA con una capacidad de tratar un caudal medio de  $65,3 \text{ m}^3/\text{h}$  y con un volumen útil de  $125 \text{ m}^3$ .

El agua clarificada será bombeada a la planta EDAR mediante una bomba modelo NBE 50-160/167 de la empresa GRUNDFOS (en configuración 1 +1R) a través de una tubería de acero inoxidable DN-100 (cálculo realizado con la ecuación 7 y considerando una velocidad del agua de  $1,8 \text{ m/s}$  y un caudal de  $60 \text{ m}^3/\text{h}$ ).

Por otro lado, el fango que se recoja será deshidratado mediante el escurrido compactador sinfín modelo ECSF-200 de la empresa HIDROMETALICA con capacidad de tratar un caudal entre  $0,5$  y  $1 \text{ m}^3/\text{h}$  de fangos y reducir su volumen entorno a un 70%. Los fangos deshidratados serán enviados a una cuba de recogida de fangos mediante un tornillo sinfín modelo TRSF-150 de la empresa HIDROMETALICA, mientras que el agua extraída será recirculada al depósito decantador.

### 8.2.8. Limpieza

A continuación, se definen y describen los procesos e instalaciones de limpieza de los filtros de arena y de las membranas de ósmosis inversa de la nueva potabilizadora de agua diseñada.

#### 8.2.8.1. Limpieza filtros de arena

La limpieza de los filtros de arena se realizará cuando exista una pérdida de presión entre la entrada y salida de los filtros entre  $1$  y  $2 \text{ kg/cm}^2$ .

Debido a que se trata de un filtro dual a presión, los pasos que se seguirán para su limpieza indicados en el Manual de Agua Suez Degremont son:

1. Reducir el nivel del agua al nivel del difusor superior.
2. Desobstrucción del filtro con agua filtrada ( $15 \text{ m}^3/\text{h}$ ).
3. Reducir el nivel del agua por debajo del nivel del difusor superior.
4. Inyectar aire a contracorriente ( $50 \text{ m}^3/\text{h}$ ).
5. Lavado a contracorriente con agua filtrada ( $15 \text{ m}^3/\text{h}$ ).
6. Enjuague con agua alimento al caudal normal de funcionamiento.



Teniendo en cuenta que el área de filtrado de cada filtro es de 5,31 m<sup>2</sup> y que funcionarán dos filtros en paralelo, el caudal de agua filtrada y de aire que será necesario emplear es de aproximadamente 160 m<sup>3</sup>/h y 530 m<sup>3</sup>/h respectivamente.

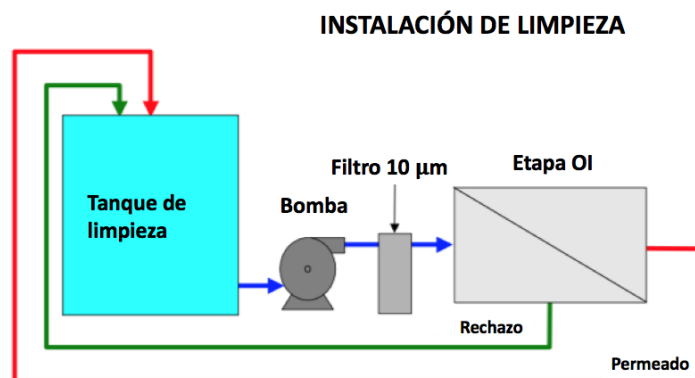
El agua filtrada que se empleará en el lavado de los filtros será el agua rechazada por las membranas de ósmosis inversa, la cual será separada de la corriente que se dirige al depósito decantador y será almacenada en un depósito de 160 m<sup>3</sup> de volumen útil, capacidad suficiente para realizar el proceso de lavado durante una hora.

Para el bombeo del agua filtrada se empleará la bomba NB 80-200/188 de la empresa GRUNDFOS que bombeará un caudal de agua 165 m<sup>3</sup>/h con una altura de 42,56 mca. Asimismo, también será necesario la instalación del soplante GRa 13.6 de la empresa AERZEN que soplará 530 m<sup>3</sup>/h de aire a una presión de 1 bar.

#### 8.2.8.2. Limpieza membranas de ósmosis inversa

Siguiendo las recomendaciones del dossier de servicio técnico TSB107.24 de la empresa HYDRANAUTICS, las membranas deben ser sometidas periódicamente a limpieza con distintos reactivos químicos para eliminar los precipitados salinos, materia orgánica, bacterias o elementos coloidales que han ido depositándose sobre ellas a lo largo del ciclo de funcionamiento de la planta. En general, el proceso de limpieza consiste en la recirculación durante un tiempo de una serie de reactivos disueltos en el agua para eliminar la causa del ensuciamiento de las membranas.

La instalación para la limpieza de las membranas recomendada por HYDRANAUTICS es la siguiente:



**Figura 32:** Instalación para la limpieza de las membranas de ósmosis inversa. Fuente: (Hydranautics)

Esta instalación está compuesta por:

- **Tanque de limpieza:** tanque con un volumen útil de 7,5 m<sup>3</sup> que permite su completo drenaje y permite un fácil acceso para la introducción y mezcla de químicos.
- **Bomba hidráulica:** bomba que deberá ofrecer un caudal entre los 151 l/min y los 201 l/min por tubo de presión con una presión máxima recomendada de 4 bar a la entrada de los tubos para minimizar la producción de permeado durante el proceso de limpieza y reducir la redeposición convectiva de la suciedad en la superficie de la membrana.

- Filtro de cartucho de 10  $\mu\text{m}$ : empleado para eliminar la suciedad que ha sido desplazada durante el proceso de limpieza.
- Calentador o enfriador del depósito de limpieza: sistema que permitirá aumentar o reducir la temperatura de la solución de limpieza.
- Agitador del depósito de limpieza: empleado para la realización de las disoluciones de limpieza.

Por otro lado, el procedimiento para la limpieza de las membranas de ósmosis inversa es el siguiente:

1. Realizar un lavado a baja presión (4 bar o menos) de los tubos de presión bombeando agua limpia (agua de permeado) con el fin de desplazar cualquier solución que se encuentre en las membranas de ósmosis inversa.
2. Preparar un "batch" de la solución de limpieza seleccionada en el depósito de limpieza empleando agua limpia. La temperatura y pH deben ser ajustados a los niveles objetivo. Comprobar valores de conductividad, turbidez y concentración de hierro en la solución preparada.
3. Bombear la solución de limpieza por los tubos de presión durante el periodo de tiempo deseado. Al inicio es necesario drenar el agua desplazada con el fin de no diluir la solución de limpieza y, posteriormente, también se debe drenar hasta el 20% de la solución de limpieza puesto que ésta es la parte más contaminada. Para los primeros 5 minutos, aumentar lentamente el caudal de la solución de limpieza hasta 1/3 del caudal máximo de diseño. Para los posteriores 5 minutos, aumentar el flujo hasta 2/3 del caudal máximo de diseño y, posteriormente, aumentar el caudal al caudal máximo de diseño. Tras cada paso es necesario comprobar la conductividad, turbidez y contenido de hierro de la solución puesto que si ésta aumenta significativamente, será necesario drenar la solución y volver a preparar una nueva solución de limpieza.
4. Durante el proceso de limpieza es común realizar una secuencia de remojo y limpieza. El tiempo de remojo puede variar entre 0,5 y 8 horas dependiendo de las recomendaciones del fabricante. Normalmente, el proceso de limpieza consiste en ciclos de 30 minutos de bombeo de la solución y 30 minutos de remojo.
5. Una vez completados los ciclos de limpieza, se debe realizar un proceso de aclarado a baja presión empleando agua limpia con el fin de eliminar cualquier traza de sustancia química de limpieza. Drenar y aclarar el tanque de limpieza para, a continuación, rellenar el tanque con agua limpia para el aclarado del sistema de ósmosis inversa. Aclarar el sistema de ósmosis inversa bombeando el agua limpia por éste. En este punto se puede realizar un segundo proceso de limpieza si es necesario.
6. Una vez el sistema de ósmosis inversa está completamente libre de químicos de limpieza, se debe realizar un enjuague final a baja presión empleando agua pretratada. Este proceso se debe realizar a una presión por debajo de los 4 bar por un tiempo entre 15 y 60 minutos. Con este proceso se consigue eliminar cualquier traza de detergente o espuma que puede haber quedado en las membranas. El agua empleada debe ser drenada.

7. Una vez se han realizado todas las etapas de limpieza, el sistema de ósmosis inversa puede ser reiniciado, efectuándose en un primer momento un aclarado de servicio en el que se emplea agua pretratada, finalizándose cuando el permeado cumple con los requisitos de calidad. Toda el agua empleada en esta etapa debe ser drenada.

Atendiendo a los equipos que se emplearán para el sistema de limpieza, será necesario un tanque agitado de 7,5 m<sup>3</sup> desde una bomba NB 80-160/177 de la empresa GRUNDFOS que permitirá bombear un caudal entre 151 l/min y 201 l/min a una presión menor a los 4 bar. Asimismo, se empleará el filtro ECOCART 520-E con capacidad para 5 cartuchos LT-30-10-A de 10 µm de la empresa EATON.

Por otro lado, las soluciones de limpieza que se empleen serán aquellas que, para cada caso de ensuciamiento particular, HYDRANAUTICS recomiende en su dossier de servicio técnico.

Atendiendo a la renovación de las membranas de ósmosis inversa en la planta potabilizadora diseñada, la tasa de reemplazo será del 20% anual, lo que supone un total de 18 membranas por año (3 tubos de presión completos). Este porcentaje se debe a que todas las membranas deberán de haber sido reemplazadas al final de su vida útil (6 años).

#### **8.2.9. Selección bombas hidráulicas**

A continuación, se indican las bombas hidráulicas seleccionadas para cada aplicación particular de la planta potabilizadora dependiendo de la etapa del proceso en la que se instalarán:

##### 8.2.9.1. Selección bombas hidráulicas de impulsión

Las bombas hidráulicas de impulsión serán necesarias en todas las etapas de las que se compone el proceso de potabilización del agua, siendo éstas:

##### Captación y bombeo del agua de pozo

Atendiendo a la bomba hidráulica que será necesario emplear, debido a que las estaciones de extracción se encuentran a una mayor elevación que la planta potabilizadora y a que se desconoce las pérdidas de carga que habrá entre la estación de bombeo y la planta potabilizadora, se considera que la altura de impulsión que la bomba debe ofrecer será la diferencia de altura entre el nivel del agua (teniendo en cuenta la depresión máxima local de 10 metros considerada) y la altura de la estación de bombeo con un factor de seguridad de 1,1, obteniendo el siguiente punto de funcionamiento

- Altura de impulsión: 38,5 metros.
- Caudal de impulsión: 27,1 m<sup>3</sup>/h

En este caso se selecciona el modelo SP 30-5 de la empresa GRUNDFOS puesto que se trata de la bomba hidráulica con mayor rendimiento y cuyo punto de funcionamiento se encuentra muy próximo al deseado, permitiendo bombear un caudal de 27,2 m<sup>3</sup>/h con una altura de impulsión de 41,5 m:



Figura 33: Bomba hidráulica SP de GRUNDFOS.

La curva característica de la curva y su punto de funcionamiento se muestran en la siguiente figura:

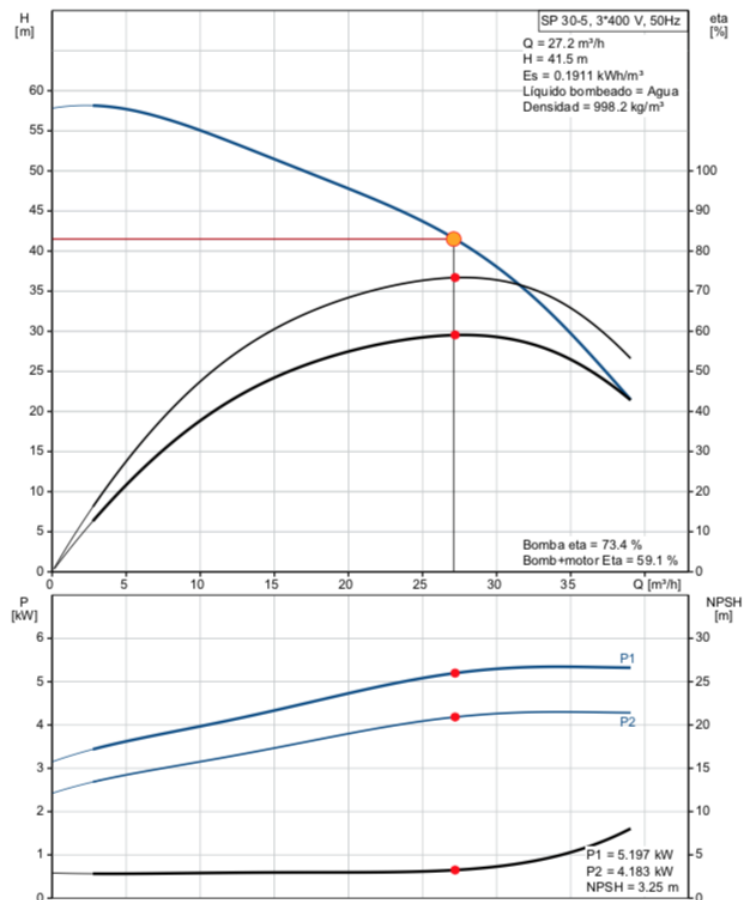


Gráfico 10: Curva característica y punto de funcionamiento bomba SP 30-5 GRUNDFOS – captación y bombeo de agua de pozo.

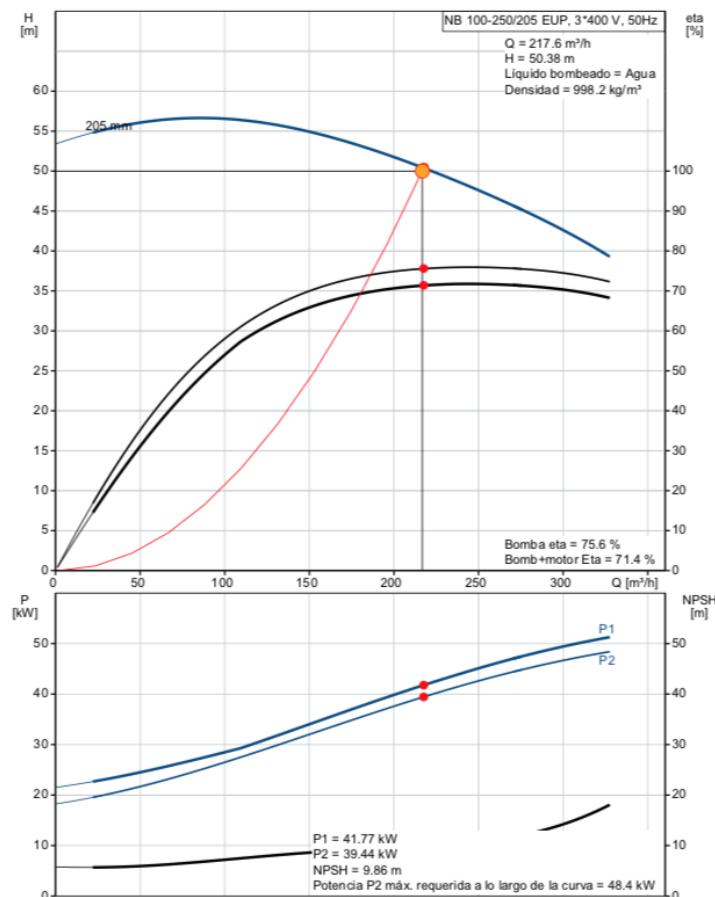
Línea de conducción a la planta potabilizadora

Para el bombeo del agua a la planta potabilizadora se ha escogido la bomba NB 100-250/205 EUP de la empresa GRUNDFOS que permitirá bombear un caudal de 217,6 m<sup>3</sup>/h con una altura de impulsión de 50,38 m<sup>3</sup>. Se empleará una bomba más como redundancia.



**Figura 34:** Bomba hidráulica NB de GRUNDFOS.

La curva característica y el punto de funcionamiento de la bomba NB 100-250/205 EUP se muestra en la siguiente figura:



**Gráfico 11:** Curva característica y punto de funcionamiento bomba NB 100-250/205 EUP GRUNDFOS – línea de conducción a la planta potabilizadora.

<sup>3</sup> Se considera una altura de impulsión aproximada de 50 mca puesto que se desconocen las pérdidas de carga y la variación de la altura en el itinerario de la línea de conducci

### Pretratamiento

El agua a pretratar se bombeará desde el depósito de alimentación, por todo el sistema de pretratamiento, hasta el depósito de agua pretratada. Para ello se ha seleccionado la bomba NKE 80-160/161 de la empresa GRUNDFOS que bombeará un caudal de 216,7 m<sup>3</sup>/h a una altura de 20,2 mca<sup>4</sup>.



Figura 35: Bomba hidráulica NKE de GRUNDFOS.

El punto de funcionamiento y la curva característica de la bomba hidráulica escogida se muestra a continuación:

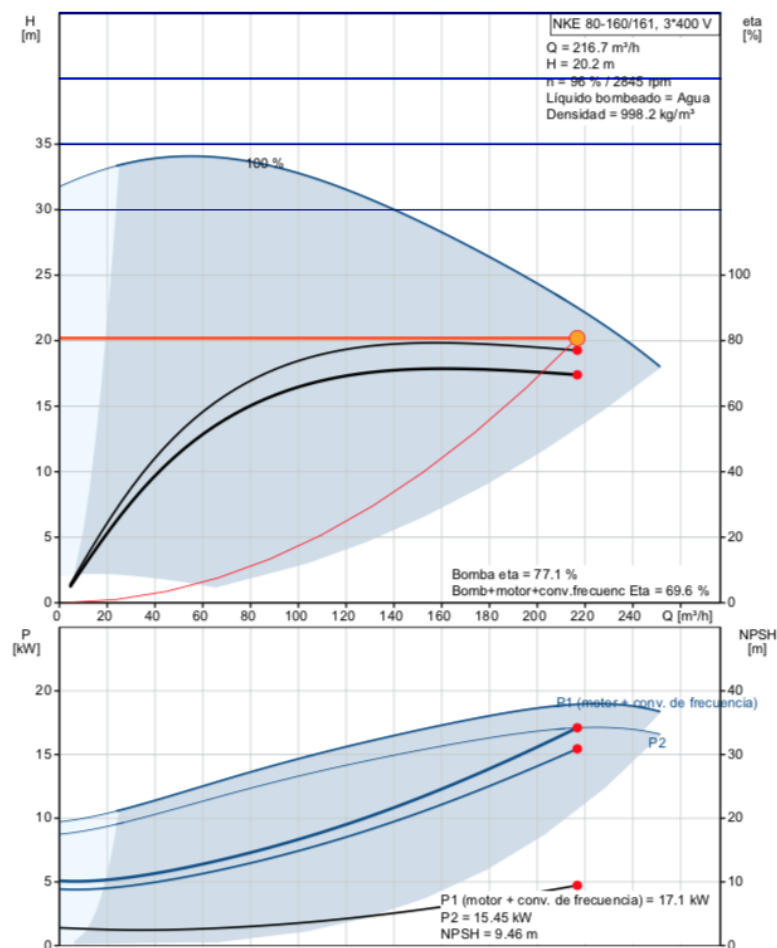


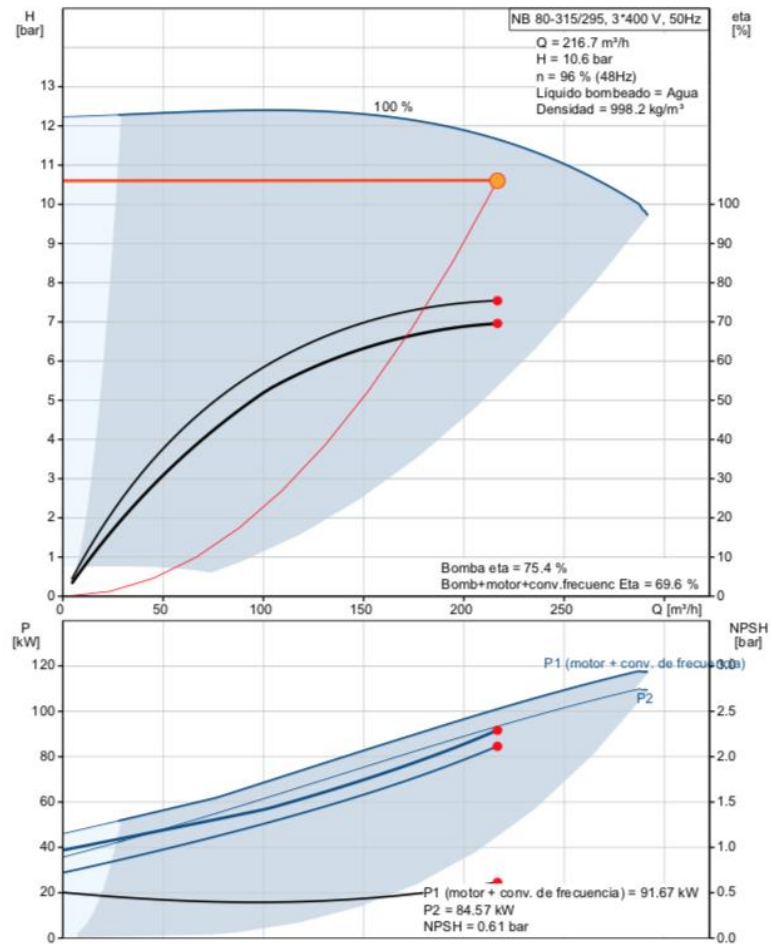
Gráfico 12: Curva característica y punto de funcionamiento bomba NKE 80-160/161 GRUNDFOS – pretratamiento.

<sup>4</sup> Altura de bombeo seleccionada teniendo en cuenta las presiones máximas de funcionamiento de las distintos procesos de pre-tratamiento.

### Ósmosis inversa

La bomba de presión que se va a emplear es el modelo NB 80-315/295, la cual bombeará un caudal de 216,7 m<sup>3</sup>/h de agua pretratada con una presión de 10,6 bar por el sistema de ósmosis inversa.

La curva característica de la bomba y su punto de funcionamiento es la siguiente:



**Gráfico 13:** Curva característica y punto de funcionamiento bomba NB 80-315/295 GRUNDFOS – ósmosis inversa.

### Postratamiento

Para el bombeo del agua desde el depósito de agua osmotizada hasta el depósito de agua potable por todo el sistema de postratamiento se empleará la bomba NKE 80-160/167 de la empresa GRUNDFOS, la cual bombeará un caudal de 162,5 m<sup>3</sup>/h a una presión de 3 bar, tal y como se muestra en su curva característica:

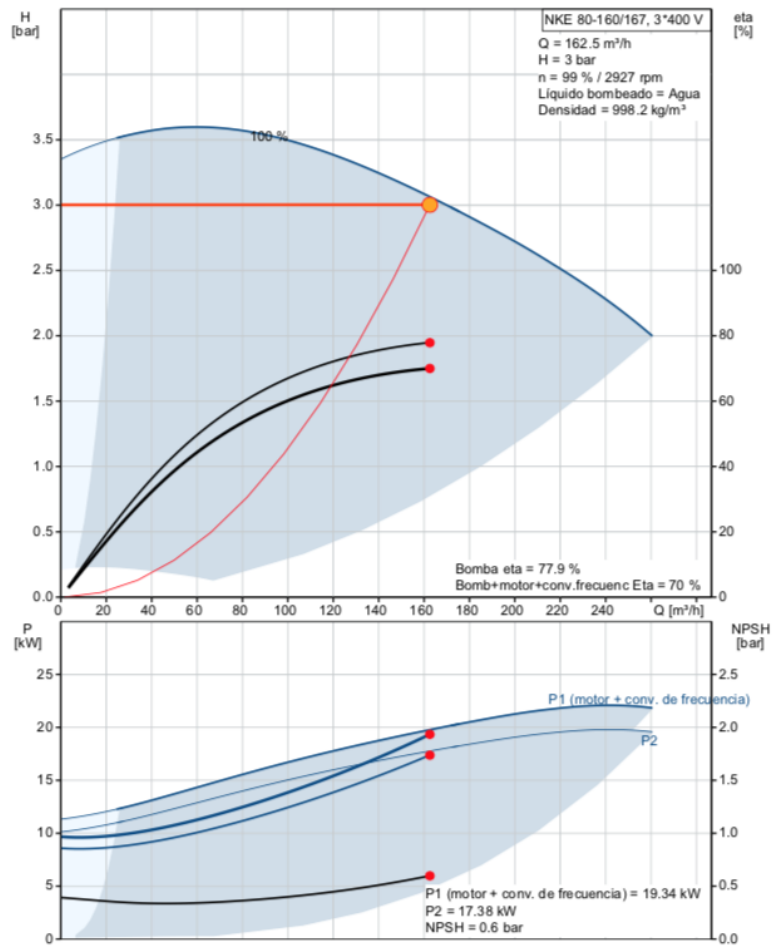


Gráfico 14: Curva característica y punto de funcionamiento bomba NKE 80-160/167 GRUNDFOS – postratamiento.



Gestión del rechazo y del agua de limpieza

En esta etapa el agua de rechazo y de limpieza se bombea al depósito de dilución de la EDAR de Moncófar. Para ello, se empleará la bomba NBE 50-160/167 de la empresa GRUNDFOS que bombeará un caudal de 60 m<sup>3</sup>/h a una presión de 40 mca<sup>5</sup>.



Figura 36: Bomba hidráulica NBE de GRUNDFOS.

La curva característica de la bomba y su punto de funcionamiento se presenta a continuación:

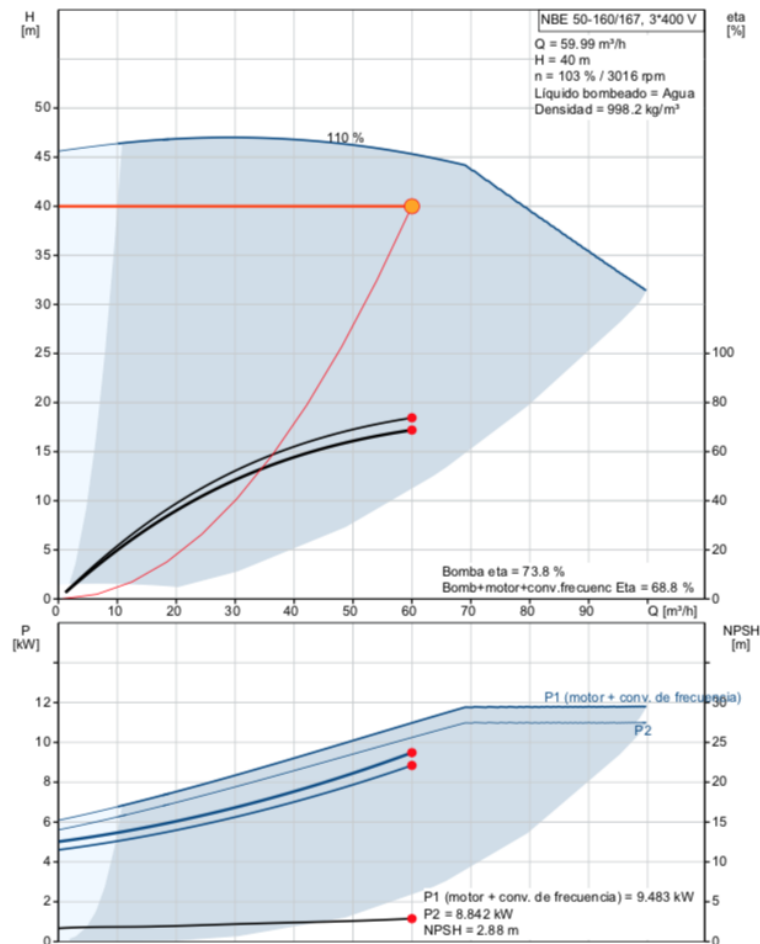


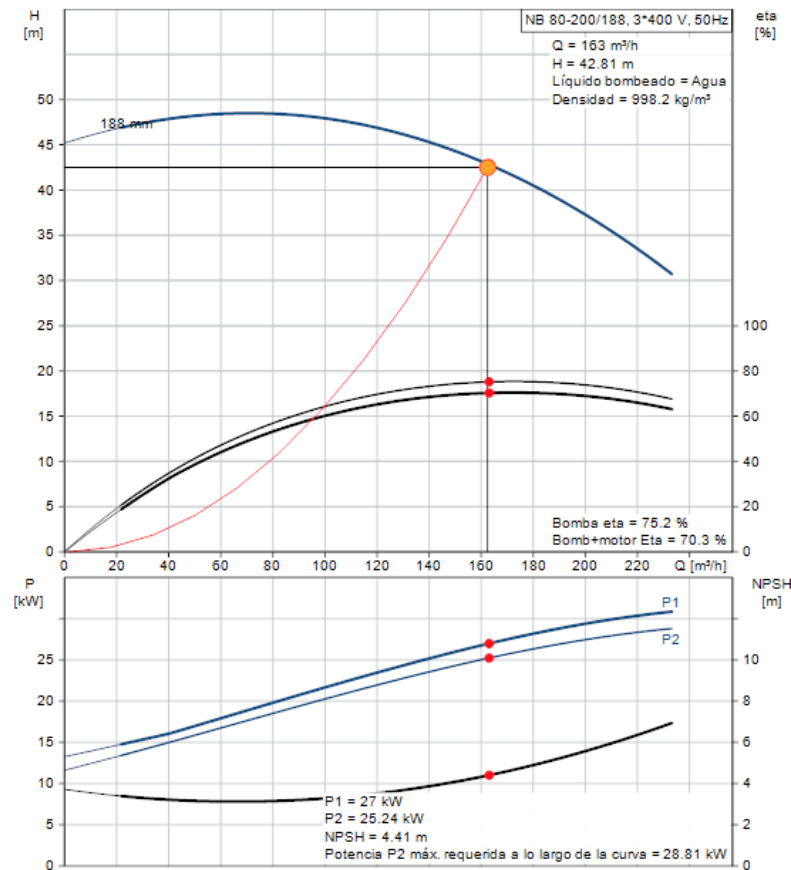
Gráfico 15: Curva característica y punto de funcionamiento bomba NBE 50-160/167 GRUNDFOS – gestión de rechazo y agua de limpieza.

<sup>5</sup> Se considera una altura de impulsión tipo de 40 mca puesto que se desconocen las pérdidas de carga y la variación de la altura en el itinerario de la línea de conducción entre la planta potabilizadora y el depósito de dilución de la EDAR de Moncófar.

### Limpieza de los filtros de arena

En el caso de la limpieza de los filtros de arena será necesario emplear una bomba hidráulica para el bombeo de agua filtrada y el empleo de un soplante que inyecte aire en los filtros.

Para el bombeo de agua filtrada se empleará la bomba NB 80-200/188 de la empresa GRUNDFOS que funcionará a un caudal de 165 m<sup>3</sup>/h y una altura de 42,56 mca:



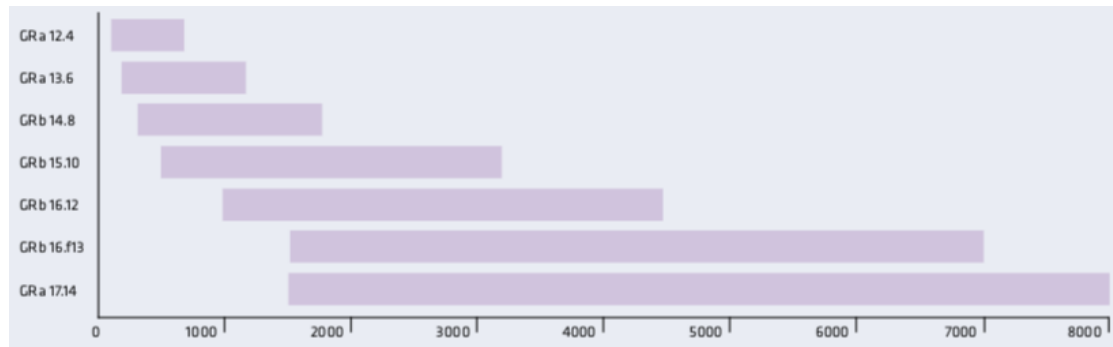
**Gráfico 16:** Curva característica y punto de funcionamiento bomba NB 80-200/188 GRUNDFOS – limpieza de los filtros de arena.

Adicionalmente a la bomba hidráulica, para la limpieza de los filtros de arena se ha seleccionado el soplante GRa 13.6 de la empresa AERZEN que soplará un caudal de aire de 530 m<sup>3</sup>/h con una presión de 1 bar.



**Figura 37:** Soplante serie GR de AERZEN.

La capacidad del soplante GRa 13.6 (en m<sup>3</sup>/h) se muestra en el siguiente gráfico:



**Gráfico 17:** Capacidad de los soplantes serie GR de AERZEN.

#### Limpieza de las membranas de ósmosis inversa

Tal y como se indica en el apartado 8.2.8.2. *Limpieza membranas de ósmosis inversa*, para realizar dicha limpieza es necesario bombear un caudal de agua de limpieza entre los 151 l/min y los 201 l/min por tubo de presión a una presión que no supere los 4 bar. Teniendo en cuenta que la planta potabilizadora diseñada dispondrá de 15 tubos de presión, los caudales que la bomba hidráulica deberá ofrecer son:

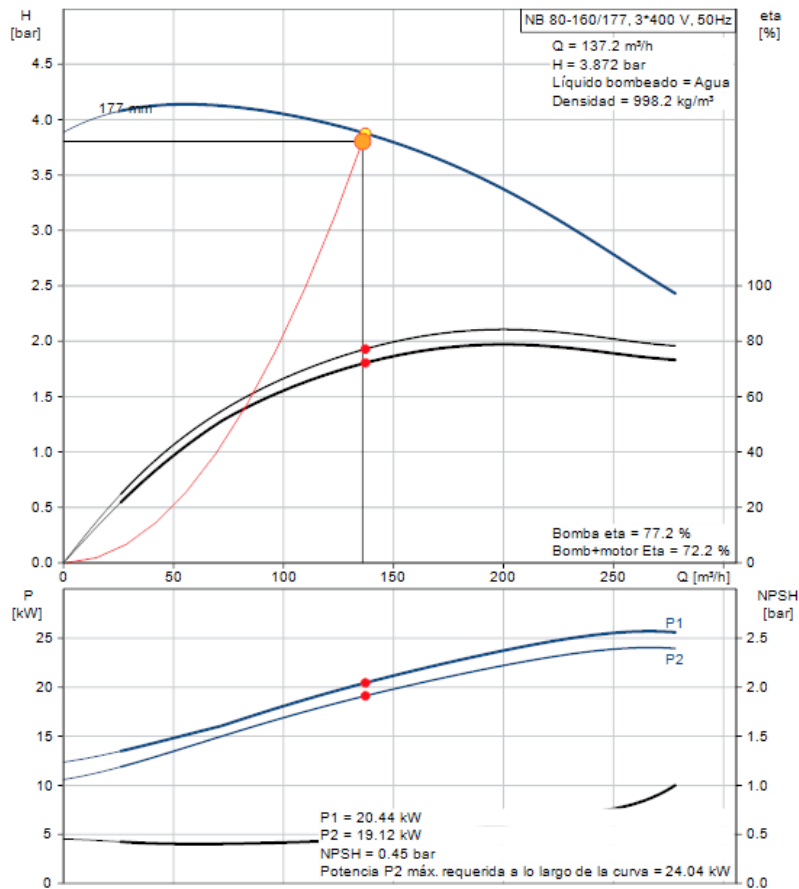
- $Q_{\min}$ : 135,9 m<sup>3</sup>/h
- $Q_{\max}$ : 180,9 m<sup>3</sup>/h

Por tanto, para la selección de la bomba hidráulica se considera el punto de funcionamiento de 136 m<sup>3</sup>/h y una presión de 3,8 bar<sup>6</sup> puesto que la presión ofrecida por la bomba disminuye con el aumento de caudal bombeado.

---

<sup>6</sup> Se considera una presión 0,2 bar por debajo del máximo como criterio de seguridad para no dañar las membranas de ósmosis inversa.

Finalmente se escoge la bomba hidráulica NB 80-160/177 de la empresa GRUNDFOS, cuya curva característica se presenta en el siguiente gráfico:



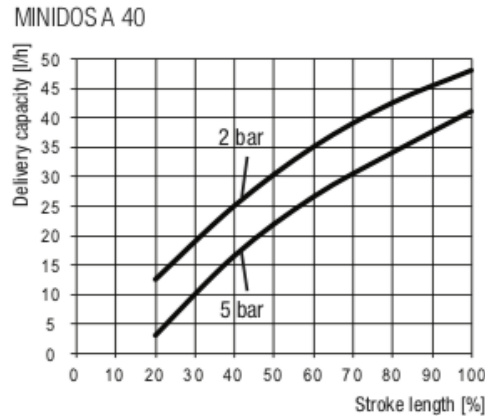
Como se puede observar en el Gráfico 18, la bomba NB 80-160/177 es capaz de ofrecer un caudal entre los 135,9 m³/h y 180,9 m³/h a una presión inferior a los 4 bar.

#### 8.2.9.2. Selección bombas hidráulicas de dosificación

Las bombas hidráulicas de dosificación se emplearán en las etapas de pretratamiento, postratamiento y gestión del rechazo:

##### Pretratamiento

En la etapa de pretratamiento únicamente se emplearán bombas dosificación para la dosificación de antiincrustante al agua de alimento para la ósmosis inversa. Para su selección se tiene en consideración que, dependiendo de la variación en la composición del agua alimento empleando un variador de frecuencia, el caudal de antiincrustante a dosificar podrá variar entre los 6,6 l/h y los 13,1 l/h. Debido a ello, se emplearán dos bombas de dosificación MINIDOS A 40 de la empresa LUTZ-JESCO en disposición 1 + 1R cuya capacidad varía entre los 4 l/h y los 39 l/h:



**Gráfico 19:** Curva característica bomba de dosificación MINIDOS A 40 de la empresa LUTZ-JESCO.

La bomba MINIDOS A 40 se muestra en la siguiente figura:



**Figura 38:** Bomba de dosificación MINIDOS A 40 de la empresa LUTZ-JESCO.

### Postratamiento

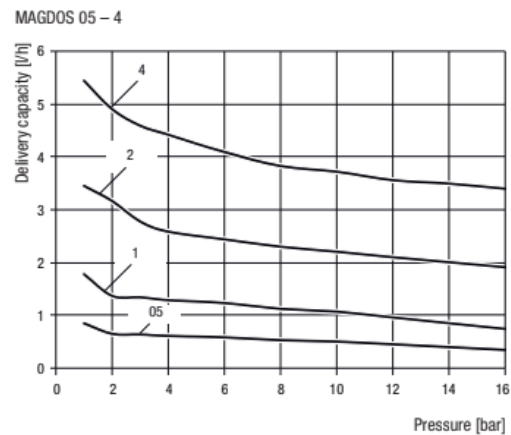
En el caso de la etapa de postratamiento, se van a emplear bombas dosificadoras de diafragma por solenoide debido a que los caudales de disoluciones a dosificar son pequeños y este tipo de bomba permite conseguir un buen control cuando se bombean dichos caudales.

A continuación se indican las bombas escogidas para la dosificación de NaOH y de NaClO:

- Dosificación NaOH

En la etapa de mineralización será necesario dosificar un caudal de 0,6 l/h de una solución de NaOH al 30%, por lo que se decide emplear la bomba dosificadora de diafragma por solenoide MAGDOS LP 05 de la empresa LUTZ-JESCO en disposición 1 + 1R cuya capacidad mínima a máxima presión se encuentre en los 0,36 l/h.

La curva característica de la bomba y una imagen de la misma se muestra a continuación:



**Gráfico 20:** Curva característica bomba de dosificación MAGDOS LP 05 de la empresa LUTZ-JESCO.



**Figura 39:** Bomba de dosificación MAGDOS LP de la empresa LUTZ-JESCO.

- Dosificación de NaClO

Para la dosificación de 2,3 l/h de NaClO al 30% se emplearán dos bombas de dosificación MAGDOS LP 2 de la empresa LUTZ-JESCO en disposición 1 + 1R cuya curva característica se muestra en el Gráfico 20.

## CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES

Una vez concluido el diseño de la planta potabilizadora objeto del proyecto se formulan las siguientes conclusiones:

- Se han identificado tres grandes problemas en el agua subterránea de la Comunidad Valenciana y, en concreto, de la masa de agua de la Plana de Castellón, los cuales son: elevada salinidad, elevada concentraciones de nitratos y presencia de herbicidas (pesticidas).
- La elevada salinidad, elevada concentración de nitratos y la presencia de herbicidas y otros pesticidas hace que el agua subterránea no cumpla con los requisitos establecidos en el RD 140/2003 para el agua considerada como apta para el consumo humano.
- Se ha realizado el diseño de una planta potabilizadora de tratamiento para un municipio concreto, aunque esta solución se podría extrapolar a otras plantas de tratamiento con una problemática similar.
- Se escoge el agua del Pozo de Cañars (08.127CA001) situado en el término municipal de Moncófar (Castellón) puesto que se trata de un agua con presencia de contaminantes en concreto con una elevada salinidad, elevada concentración de nitratos y de pesticidas.
- La planta de potabilización de agua diseñada se construirá en la parcela ubicada en la calle Riu Millars 19 en Moncófar (Castellón) con una superficie de 2.330 m<sup>2</sup>.
- La capacidad de producción de la planta diseñada para abastecer una población de 20.000 habitantes es de 3.900 m<sup>3</sup>/día.
- Una vez analizadas las tecnologías de ósmosis inversa y de electrodiálisis para la potabilización del agua subterránea objetivo, se escoge la ósmosis inversa puesto que permite eliminar salinidad, nitratos, sulfatos, pesticidas y microorganismos además de poseer un consumo energético específico menor para un agua con una conductividad de 3.287  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y el coste del agua producida (3.900 m<sup>3</sup>/día) es menor en comparación a la electrodiálisis.
- La planta potabilizadora diseñada consta de las siguientes etapas:
  - Captación a partir de 9 pozos (8+1R) con una profundidad de 40 m y un diámetro de tubería de PVC de 200 mm, sendas bombas hidráulicas modelo SP 30-5 y un depósito de alimentación a la planta potabilizadora de 220 m<sup>3</sup> útiles.
  - Línea de conducción del agua de pozo a la planta potabilizadora constituida por tuberías de acero inoxidable DN-200, 2 bombas hidráulicas (1+1R) modelo

NB 100-250/200 y un depósito al final de la línea con un volumen útil de 5.250 m<sup>3</sup>.

- Etapa de pretratamiento del agua constituida por:
  - 4 filtros de arena dual a presión modelo DIN Series GRP con diámetro interior de 2600 mm en configuración 2+2R.
  - 5 filtros de cartucho (4+1R) modelo ECOCART 2240-E en el que cada uno alberga 22 cartuchos modelo LOFTOP 40''.
  - Dosificación de 9,2 l/h de HYPERSPERSE MD704 al 4% en peso para evitar las incrustaciones de sulfato cálcico empleando 2 bombas MINIDOS A 40 (1+1R).
  - El agua a pretratar es bombeada por dos bombas NKE 80-160/161 (1+1R).
  - El agua pretratada se almacena en un depósito con un volumen útil de 450 m<sup>3</sup>.
- Etapa de ósmosis inversa compuesta por:
  - 2 bastidores de ósmosis inversa.
  - Cada bastidor incluye una primera etapa de filtración con 10 tubos de presión y una segunda etapa de 5 tubos de presión.
  - Cada tubo de presión incluye 6 elementos de la membrana modelo ESPA2-LD.
  - 3 bombas de alta presión (2+1R) modelo NB 80-315/295.
  - El agua osmotizada se almacena en un depósito de 350 m<sup>3</sup> de volumen útil.
  - El agua de rechazo se almacena en un depósito de 110 m<sup>3</sup> de capacidad útil.
- Etapa de postratamiento compuesta por:
  - Remineralización a partir de la dosificación de 136,6 l/h de Ca(OH) al 4% obtenida por el sistema de preparación y dilución de lechadas de cal de INDOSTRA, S.A.
  - Aumento del pH mediante la dosificación de 0,6 l/h de una disolución de NaOH a una concentración del 30% empleando la bomba MAGDOS LP 05.
  - Cloración mediante la dosificación de 2,3 l/h de una disolución de NaClO al 10% en peso.
- Almacenamiento del agua potable obtenida en un depósito con un volumen útil de 4.000 m<sup>3</sup>.
- Sistema de gestión del rechazo y de las aguas de limpieza compuesto por:



- El depósito decantador modelo DCR-800.
  - 2 bombas NBE 50-160/167 (1+1R) para el bombeo del agua de rechazo clarificada a la planta EDAR de Moncófar para su dilución.
  - 1 escurridor compactador sinfín modelo ECSF-200 para la deshidratación de los fangos recogidos en el depósito decantador.
  - 1 tornillo sinfín modelo TRSF-150 que transporta los fangos deshidratados a una cuba de recogida.
- Se han diseñado los sistemas de limpieza de los filtros de arena y del sistema de ósmosis inversa para asegurar su máxima vida útil posible.
  - El agua producto obtenida cumple con las exigencias marcadas por el RD 140/2003, siendo ésta apta para el consumo humano.



## CAPÍTULO 10. BIBLIOGRAFÍA

ALEX E&C (2019). *GRP Pressure Filters Catalogue 2019* [Catálogo]. Recuperado de: [http://www.afilter.rs/A\\_Filter\\_2019\\_Web.pdf](http://www.afilter.rs/A_Filter_2019_Web.pdf) Fecha de consulta: 10 de marzo de 2019.

AL-KARAGHOULI, A., KAZMERSKI, L.L. (2012). "Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes" en *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 24, p. 343-356.

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION AND AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. (2012). *Water Treatment Plant Design, Fifth Edition* (5 ed.). United States of America: McGraw-Hill, Inc.

BHATTAACHARYA, A., RAY, P., BRAHMBHATT, H., VYAS, K. N., Joshi, S. V., Devmurari, C. V., Trivedi, J. J. (2006). "Pesticides Removal Performance by Low-Pressure Reverse Osmosis Membranes" en *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 102, issue 4, p. 3575-3579.

CAMARGO, J., ALONSO, Á. (2006). "Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: A global assessment" en *Environment International*, vol. 32, issue 6, p. 831-849.

CAÑEDO-ARGÜELLES, M., HAWKINS, C. P., KEFFORD, B. J., SCHÄFER, R. B., DYACK, B. J., BRUCET, S., BUCHWALTER, D., DUNLOP, J., FRÖR, O., LAZORCHAK, J., CORING, E., FERNÁNDEZ, H. R., GOODFELLOW, W., GONZÁLEZ ACHEM, A. L., HATFIELD-DODDS, S., KARIMOV, B. K., MENSAH, P., OLSON, J. R., PISCART, C., PRAT, N., PONSÁ, S., SCHULZ, C. J., TIMPANO, A. J. (2016). "Saving freshwater from salts" en *Science*, vol. 351, issue 6276, p. 914-916.

CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR. (2015). Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar. Ciclo de planificación hidrológica 2015-2021. Recuperado de: <https://www.chj.es/es-es/medioambiente/planificacionhidrologica/Paginas/PHC-2015-2021-Plan-Hidrologico-cuenca.aspx>. Fecha de consulta: 2 de enero de 2018.

CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR. (2018). Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar. Revisión de tercer ciclo (2021-2027). Recuperado de: <https://www.chj.es/es-es/medioambiente/planificacionhidrologica/Paginas/PHC-2021-2027-Documentos-iniciales.aspx>. Fecha de consulta: 20 de enero de 2018.

CRITTENDEN, J., TRUSSELL, R., HAND, D., HOWE, K., TCHOBANOGLIOUS, G. (2012). *MWH's Water Treatment: Principles and Design*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

DE MIGUEL FERNÁNDEZ, C., VÁZQUEZ TASET, Y. (2006). "Origen de los nitratos (NO<sub>3</sub>) y nitritos (NO<sub>2</sub>) y su influencia en la potabilidad de las aguas subterráneas" en *Minería y Geología*, vol. 22, issue 3, p. 1-9.

DE PAZ, J.M., RUBIO, J.L. (2006). "Application of a GIS-AF/RF model to assess the risk of herbicide leaching in a citrus-growing area of the Valencia Community, Spain" en *Science of the Total Environment*, vol. 371, p. 44-54.

EATON FILTRATION GMBH (s.f.). *Filter Cartridges. Cartridges Filter Housings* [Catálogo]. Recuperado de: [http://www.eaton.com/ecm/idcplg%3FIdcService%3DGET\\_FILE%26dID%3D132105](http://www.eaton.com/ecm/idcplg%3FIdcService%3DGET_FILE%26dID%3D132105) Fecha de consulta: 18 de marzo de 2019.

España. Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. *BOE*, 21 de febrero de 2003, núm. 45, p. 7228-7245.

FERNÁNDEZ RUIZ, L. (2007). "Los nitratos y las aguas subterráneas en España" en *Enseñanzas de las Ciencias de la Tierra*, vol. 15.3, p. 257-265.

GARCÍA-MÉNDEZ, O., MORELL, I., BALLESTEROS, B.J., RENAU-PRUÑONOSA, A. ESTELLER, M.V. (2016). "Spatial characterization of the seawater upcoming process in a coastal Mediterranean aquifer (Plana de Castellón, Spain): evolution and controls" en *Environmental Earth Sciences*, vol. 75:728.

HERNÁNDEZ-SUÁREZ, M. (2010) *Guía para la remineralización de las aguas desaladas*. Santa Cruz de Tenerife, España: Fundación Centro Canario del Agua.

HYDRANAUTICS. (s.f.) *ESPA2-LD* [Ficha Técnica]. Recuperado de: <https://membranes.com/wp-content/uploads/Documents/Element-Specification-Sheets/RO/ESPA/ESPA2-LD.pdf> Fecha de consulta: 22 de mayo de 2019.

HYDRANAUTICS. (2020) *Foulants and Cleaning Procedures for composite polyamide RO/NF Membrane Elements* [Dosier Técnico]. Recuperado de: <https://membranes.com/wp-content/uploads/Documents/TSB/TSB107.pdf> Fecha de consulta: 8 de febrero de 2020.

INDOSTRA, S.A. (s.f.) *Ingeniería, fabricación y proyectos "Llave en mano"* [Catálogo]. Recuperado de: <http://indostra.com/docs/catalogo-general-INDOSTRA.pdf> Fecha de consulta: 23 de noviembre de 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA. (2016) *Encuesta sobre el suministro y saneamiento del agua año 2014*. Notas de Prensa.

JENSEN, V., DARBY, J., SEIDEL, C., GORMAN, C. (2012). *Drinking water treatment for nitrate. Addressing nitrate in california's drinking water with a focus on Tolure Lake Basin and Salinas Valley Groundwater*. Davis: University of California.

KARIMI, L., ABKAR, L., AGHAJANI, M., GHASSEMI, A. (2015) "Technical feasibility comparison of off-grid PV-EDR and PV-RO desalination systems via their energy consumption" en *Separation and Purification Technology*, vol. 151, p. 82-94.

KERLE, E.A., JENKINS, J.J., VOGUE, P.A. (1996). *Understanding pesticide persistence and mobility for groundwater and Surface protection*. Corvallis: Oregon State University.

LORA, J. (s.f.). *Desalación de aguas. Análisis de costes del agua*. Universidad Politécnica de Valencia: Departamento de Ingeniería Química y Nuclear.

- MADRID VICENTE, A. (2012). *Manual del agua: ciencia, tecnología y legislación*. Madrid: AMV Ediciones.
- MENCHEN, A., DE LAS HERAS, J., GÓMEZ ALDAY J. J., (2017). "Pesticide contamination in groundwater bodies in the Júcar River European Union Pilot Basin (SE Spain)" en *Environ. Monit. Assess*, vol. 189, issue 146, p. 1-18.
- ORMAD, M., MIGUEL, N., CLAVER, A., MATESANZ, J., OVELLEIRO, J. (2008). "Pesticides removal in the process of drinking water production" en *Chemosphere*, vol. 71, p. 91-106.
- PÉREZ-MARTÍN, M. A., ESTRELA, T., DEL-AMO, P. (2016) "Measures required to reach the nitrate objectives in groundwater base don a long-term nitrate model for large river basins (Júcar, Spain)" en *Science of the Total Environment*, vol. 566-567, p. 122-133.
- PIDWIRNY, M., JONES, S. (2006). *Fundamentals of Physical Geography, 2nd Edition*. Kelowna: University of British Columbia Okanagan. Recuperado de: <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/9s.html>. Fecha de consulta: 11 de noviembre de 2017.
- SADHWANI ALONSO, J. J., MELIÁN-MARTEL, N. (2018). "Environmental Regulations – Inland and Coastal Desalination Case Studies". En V. Gnaneswar Gude (Ed.). *Sustainable Desalination Handbook* (p. 403-435). Oxford: Elsevier Inc.
- SUEZ S.A. (s.f.). *SUEZ's degremont® water handbook*. Recuperado de <https://www.suezwaterhandbook.com> Fecha de consulta: 28 de diciembre de 2019.
- THUNDIYIL, J., STOBBERM J., BESBELLI, N., PRONCZUK, J. (2008). "Acute pesticide poisoning: a proposed classification tool" en *Bulletin of the World Health Organization*, vol. 86, issue 3, p. 205-209.
- TOWNSEND, A. R., HOWARTH, R. W., BAZZAZ, F. A., BOOTH, M. S., CLEVELAND, C. C., COLLINGE, S. K., DOBSON, A. P., EPSTEIN, P. R., HOLLAND, E. A., KEENEY, D. R., MALLIN, M. A., ROGERS, C. A., WAYNE, P., WOLFE, A. H. (2003). "Human health effects of a changing global nitrogen cycle" en *Frontiers in Ecology and Environment*, vol. 1, issue 5, p. 240-246.
- VOUTCHKOV, N. (2013). *Desalination Engineering Planning and Design*, New York: Mc Graw Hill
- VOUTCHKOV, N. (2017). *Pretreatment for Reverse Osmosis Desalination*, Cambridge: Elsevier Inc.





UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

Curso Académico:





**ÍNDICE DEL PRESUPUESTO**

1. Introducción .....	117
2. Costes de capital o inversión total .....	117
3. Costes anuales de operación y mantenimiento .....	119
4. Coste de agua potabilizada .....	121
5. Resumen presupuesto .....	121



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 42: Costes de inversión en la unidad de ósmosis inversa. ....	117
Tabla 43: Costes de capital directos (construcción).....	118
Tabla 44: Costes de capital indirectos (construcción) – costes de ingeniería del proyecto. ....	118
Tabla 45: Costes de capital indirectos (construcción) – desarrollo del proyecto. ....	118
Tabla 46: Costes de capital indirectos (construcción) – costes financieros del proyecto.....	119
Tabla 47: Presupuesto de inversión. ....	119
Tabla 48: Coste anual de consumo energético. ....	119
Tabla 49: Coste reemplazo de membranas de ósmosis inversa y filtros de cartucho. ....	120
Tabla 50: Costes anuales de operación y mantenimiento – costes variables.....	120
Tabla 51: Costes anuales de operación y mantenimiento – costes fijos. ....	120
Tabla 52: Coste anual de operación y mantenimiento. ....	121
Tabla 53: Total coste de producción anual. ....	121
Tabla 54: Total coste del agua potabilizada. ....	121
Tabla 55: Resumen presupuesto.....	121



## PRESUPUESTO

### 1. INTRODUCCIÓN

El presupuesto del presente TFM, donde se incluye el precio de los trabajos de diseño de la planta potabilizadora y de su construcción, se ha realizado en base a la distribución de los costes de inversión (construcción) indicados en el apartado 8.2.4.4. del Documento 1. Memoria.

Adicionalmente al coste de los trabajos de diseño y construcción, se han calculado también los costes anuales de operación y mantenimiento para, junto a éstos, calcular el coste real del agua potable producida por la planta potabilizadora objeto del proyecto.

### 2. COSTES DE CAPITAL O INVERSIÓN TOTAL

El total de los costes de inversión brutos se ha calculado en base al coste de inversión en la unidad de ósmosis inversa de la planta potabilizadora diseñada, el cual es:

**Tabla 43:** Costes de inversión en la unidad de ósmosis inversa.

Nº	Ud	Descripción	Cantidad	Precio	Subtotal	Total
<b>COSTES DE INVERSIÓN EN LA UNIDAD DE ÓSMOSIS INVERSA</b>						
	Ud	Membrana de ósmosis inversa Hydranautics ESPA2 LD.	180	781,74 €	140.712,54 €	
	Ud	Tubo de presión Pentair CodeLine 80S30-6 8" x 240"	30	905,06 €	27.151,71 €	
	Ud	Bomba hidráulica GRUNDFOS NB 80-315/295 AF2ABQQE con motor SIEMENS 110 kW y 50 Hz.	3	35.351,39 €	106.054,18 €	
01.01.	Factor	Factor instalación, incluye el montaje de equipos (0,3), las tuberías (0,8), la instrumentación y control (0,3), la electricidad (0,1), la obra civil (0,1), las estructuras y edificios (0,2) y el aislamiento y pintura (0,1).	1	3,00	3,00	
					<b>821.755,30 €</b>	

Teniendo en cuenta que el coste de la unidad de ósmosis inversa es de 821.755,30 € y que éste representa el 38% de los costes total de inversión (construcción), se obtiene que el coste total de inversión (construcción) bruto es de **2.162.513,94 €**.

Diseño de una Potabilizadora para el Tratamiento de Agua con Alto Contenido Salino, Nitratos y Herbicidas para una Población de 20.000 Habitantes

A partir del coste total bruto de inversión, se calculan los costes de construcción, de ingeniería, de desarrollo y financieros del proyecto, y el coste total neto de inversión:

**Tabla 44:** Costes de capital directos (construcción).

Nº	Ud	Descripción	Cantidad	Precio	Subtotal	Total
<b>COSTES DE CAPITAL DIRECTOS (CONSTRUCCIÓN)</b>						
	Ud	Preparación del terreno, accesos, parking, etc.	0,015	2.162.513,94 €	32.437,71 €	
	Ud	Captación de agua	0,055	2.162.513,94 €	118.938,27 €	
	Ud	Pretratamiento	0,09	2.162.513,94 €	194.626,25 €	
	Ud	Equipos para el sistema de ósmosis inversa	0,38	2.162.513,94 €	821.755,30 €	
	Ud	Post-tratamiento	0,02	2.162.513,94 €	43.250,28 €	
01.02.	Ud	Gestión de concentrados	0,035	2.162.513,94 €	75.687,99 €	
	Ud	Gestión de residuos	0,03	2.162.513,94 €	64.875,42 €	
	Ud	Sistemas eléctricos e instrumentación	0,03	2.162.513,94 €	64.875,42 €	
	Ud	Instalaciones y equipos auxiliares	0,025	2.162.513,94 €	54.062,85 €	
	Ud	Edificios	0,05	2.162.513,94 €	108.125,70 €	
	Ud	Puesta en marcha y pruebas de aceptación	0,025	2.162.513,94 €	54.062,85 €	
					<b>1.632.698,02 €</b>	

**Tabla 45:** Costes de capital indirectos (construcción) – costes de ingeniería del proyecto.

Nº	Ud	Descripción	Cantidad	Precio	Subtotal	Total
<b>COSTES DE CAPITAL INDIRECTOS (CONSTRUCCIÓN)</b>						
<b>Costes de Ingeniería del Proyecto</b>						
	Ud	Ingeniería preliminar	0,01	2.162.513,94 €	21.625,14 €	
	Ud	Ensayos piloto	0,005	2.162.513,94 €	10.812,57 €	
01.03.	Ud	Diseño de detalle	0,04	2.162.513,94 €	86.500,56 €	
	Ud	Gestión y supervisión de la construcción	0,015	2.162.513,94 €	32.437,71 €	
					<b>151.375,98 €</b>	

**Tabla 46:** Costes de capital indirectos (construcción) – desarrollo del proyecto.

<b>COSTES DE CAPITAL INDIRECTOS (CONSTRUCCIÓN)</b>						
<b>Desarrollo del Proyecto</b>						
	Ud	Administración, contratación y gestión	0,015	2.162.513,94 €	32.437,71 €	
01.04.	Ud	Permisos ambientales	0,03	2.162.513,94 €	64.875,42 €	
	Ud	Servicios legales	0,01	2.162.513,94 €	21.625,14 €	
					<b>118.938,27 €</b>	

Diseño de una Potabilizadora para el Tratamiento de Agua con Alto Contenido Salino, Nitratos y Herbicidas para una Población de 20.000 Habitantes

**Tabla 47:** Costes de capital indirectos (construcción) – costes financieros del proyecto.

Nº	Ud	Descripción	Cantidad	Precio	Subtotal	Total
<b>COSTES DE CAPITAL INDIRECTOS (CONSTRUCCIÓN)</b>						
<b>Costes Financieros del Proyecto</b>						
	Ud	Intereses durante la construcción	0,015	2.162.513,94 €	32.437,71 €	
	Ud	Fondo de reserva para el servicio de la deuda	0,025	2.162.513,94 €	54.062,85 €	
02.04.	Ud	Contingencias	0,065	2.162.513,94 €	140.563,41 €	
	Ud	Otros costes financieros	0,015	2.162.513,94 €	32.437,71 €	
						<b>259.501,67 €</b>

**Tabla 48:** Presupuesto de inversión.

Coste total de inversión (construcción) bruto	2.162.513,94 €
Beneficio industrial (10%)	216.251,39 €
<b>Presupuesto de ejecución por contrata</b>	<b>2.378.765,33 €</b>
IVA (21%)	499.540,72 €
<b>PRESUPUESTO BASE DE LICITACIÓN</b>	<b>2.878.306,05 €</b>

El presupuesto base de licitación asciende a la cantidad expresada de **DOS MILLONES OCHOCIENTOS SETENTA Y OCHO MIL TRESCIENTOS SEIS EUROS CON CINCO CÉNTIMOS.**

### 3. COSTES ANUALES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Los costes anuales de operación y mantenimiento se han calculado en base al coste del consumo de energía anual de la planta potabilizadora y en base al coste anual de reemplazar las membranas de ósmosis inversa y de filtros de cartucho.

#### Coste anual de consumo energético

El coste anual de consumo energético se calcula multiplicando la producción anual de agua potabilizada (considerando una disponibilidad de la planta de 8.640 h/año), el consumo específico de energía total y el coste de la energía:

**Tabla 49:** Coste anual de consumo energético.

Producción anual de agua	1.404.000 m <sup>3</sup> /año
Consumo específico	0,653 kWh/m <sup>3</sup>
Precio energía eléctrica	0,094 €/kWh
<b>COSTE ENERGÍA</b>	<b>86.224,32 €</b>

Diseño de una Potabilizadora para el Tratamiento de Agua con Alto Contenido Salino, Nitratos y Herbicidas para una Población de 20.000 Habitantes

---

Coste reemplazo membranas ósmosis inversa y filtros de cartucho

El coste del reemplazo de las membranas de ósmosis inversa y de los filtros de cartucho se ha realizado teniendo en cuenta una tasa de reemplazo anual de membranas del 20% y que el coste del reemplazo de los filtros de cartucho constituye el 15% del coste de reemplazo de las membranas:

**Tabla 50:** Coste reemplazo de membranas de ósmosis inversa y filtros de cartucho.

Nº	Ud	Descripción	Cantidad	Precio	Subtotal	Total
<b>REEMPLAZO MEMBRANAS Y FILTROS DE CARTUCHO</b>						
	Ud/año	Coste anual de reemplazo de membranas.	0,2	140.712,54 €	28.142,51 €	
02.01.	Ud/año	Coste anual de reemplazo filtros de cartucho (15% de membranas).	0,15	28.142,51 €	4.221,38 €	
						<b>32.363,88 €</b>

Coste anual de operación y mantenimiento

En este caso, debido a que el coste energético representa el 50% y el coste de reemplazo de las membranas de ósmosis inversa y de los filtros de cartucho supone el 7% del coste total de operación y mantenimiento, se obtiene que dicho coste asciende a **208.049,48 €**.

A continuación, se muestra el desglose de los costes anuales de operación y mantenimiento:

**Tabla 51:** Costes anuales de operación y mantenimiento – costes variables.

Nº	Ud	Descripción	Cantidad	Precio	Subtotal	Total
<b>COSTES ANUALES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO</b>						
<b>Costes Variables</b>						
	Ud	Energía	0,5	208.049,48 €	104.024,74 €	
	Ud	Productos químicos	0,06	208.049,48 €	12.482,97 €	
02.02.	Ud	Reemplazamiento de membranas y filtros de cartucho	0,07	208.049,48 €	14.563,46 €	
	Ud	Gestión de las corrientes residuales	0,04	208.049,48 €	8.321,98 €	
						<b>139.393,15 €</b>

**Tabla 52:** Costes anuales de operación y mantenimiento – costes fijos.

Nº	Ud	Descripción	Cantidad	Precio	Subtotal	Total
<b>COSTES ANUALES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO</b>						
<b>Costes Fijos</b>						
	Ud	Término de potencia	0,05	208.049,48 €	10.402,47 €	
	Ud	Personal	0,08	208.049,48 €	16.643,96 €	
02.03.	Ud	Mantenimiento	0,07	208.049,48 €	14.563,46 €	
	Ud	Vigilancia ambiental	0,02	208.049,48 €	4.160,99 €	
	Ud	Costes indirectos	0,11	208.049,48 €	22.885,44 €	
						<b>68.656,33 €</b>



**Tabla 53:** Coste anual de operación y mantenimiento.

Costes variables	139.393,15 €
Costes fijos	68.656,33 €
<b>COSTE ANUAL DE O&amp;M</b>	<b>208.049,48 €.</b>

El coste anual de operación y mantenimiento de la planta potabilizadora asciende a la cantidad expresada de **DOSCIENTOS OCHO MIL CUARENTA Y NUEVO EUROS CON CUARENTA Y OCHO CÉNTIMOS.**

#### 4. COSTE DEL AGUA POTABILIZADA

El coste de agua potabilizada se calcula en base a los costes totales de producción:

**Tabla 54:** Total coste de producción anual.

	Euros	Euros/m <sup>3</sup>
Amortización de la inversión <sup>7</sup>	188.537,82 €	0,134 €/m <sup>3</sup>
Total costes O&M	208.049,48 €	0,148 €/m <sup>3</sup>
<b>TOTAL COSTES DE PRODUCCIÓN</b>	<b>396.587,30 €</b>	<b>0,282 €/m<sup>3</sup></b>

**Tabla 55:** Total coste del agua potabilizada.

	Euros/m <sup>3</sup>
Total costes de producción	0,282 €/m <sup>3</sup>
Beneficio industrial (10%)	0,028 €/m <sup>3</sup>
Impuestos (10%)	0,028 €/m <sup>3</sup>
<b>TOTAL COSTE DEL AGUA POTABILIZADA</b>	<b>0,339 €/m<sup>3</sup></b>

El coste de producción de agua potable asciende a la cantidad expresada de **TRESCIENTOS TRENTA Y NUEVE CÉNTIMOS POR MÉTRO CÚBICO DE AGUA.**

#### 5. RESUMEN PRESUPUESTO

**Tabla 56:** Resumen presupuesto

<b>COSTE DE CAPITAL O INVERSIÓN TOTAL</b>	2.878.306,05 €
<b>COSTES ANUALES DE O&amp;M</b>	208.049,48 €
<b>COSTE DEL AGUA POTABILIZADA</b>	0,339 €/m <sup>3</sup>

<sup>7</sup> La amortización de la inversión se ha realizado teniendo en cuenta un interés anual del 6% y una vida útil de la instalación de 20 años.





UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

Curso Académico:



## **ÍNDICE DE LOS PLANOS**

Plano 1. Parcela de ubicación.

Plano 2. Diagrama de bloques.

Plano 3. Diagrama de flujo de la instalación.

## CONSULTA DESCRIPTIVA Y GRÁFICA DE DATOS CATASTRALES DE BIEN INMUEBLE

**REFERENCIA CATASTRAL DEL INMUEBLE**  
**3901101YK4130S0001OD**

### DATOS DESCRIPTIVOS DEL INMUEBLE

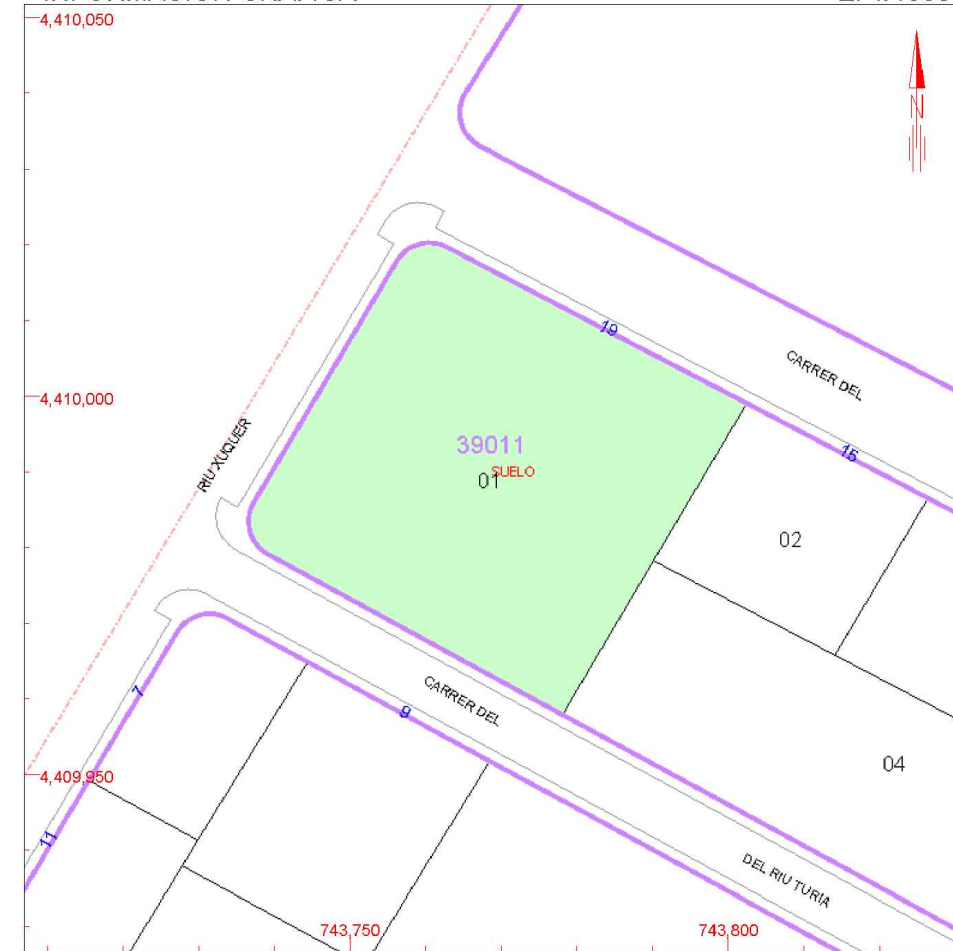
LOCALIZACIÓN	
CL DEL RIU MILLARS 19 Suelo	
12593 MONCOFA [CASTELLÓN]	
USO PRINCIPAL	AÑO CONSTRUCCIÓN
Suelo sin edif.	
COEFICIENTE DE PARTICIPACIÓN	SUPERFICIE CONSTRUIDA [m <sup>2</sup> ]
100,000000	--

### PARCELA CATASTRAL

SITUACIÓN		
CL DEL RIU MILLARS 19		
MONCOFA [CASTELLÓN]		
SUPERFICIE CONSTRUIDA [m <sup>2</sup> ]	SUPERFICIE GRÁFICA PARCELA [m <sup>2</sup> ]	TIPO DE FINCA
0	2.330	Suelo sin edificar

### INFORMACIÓN GRÁFICA

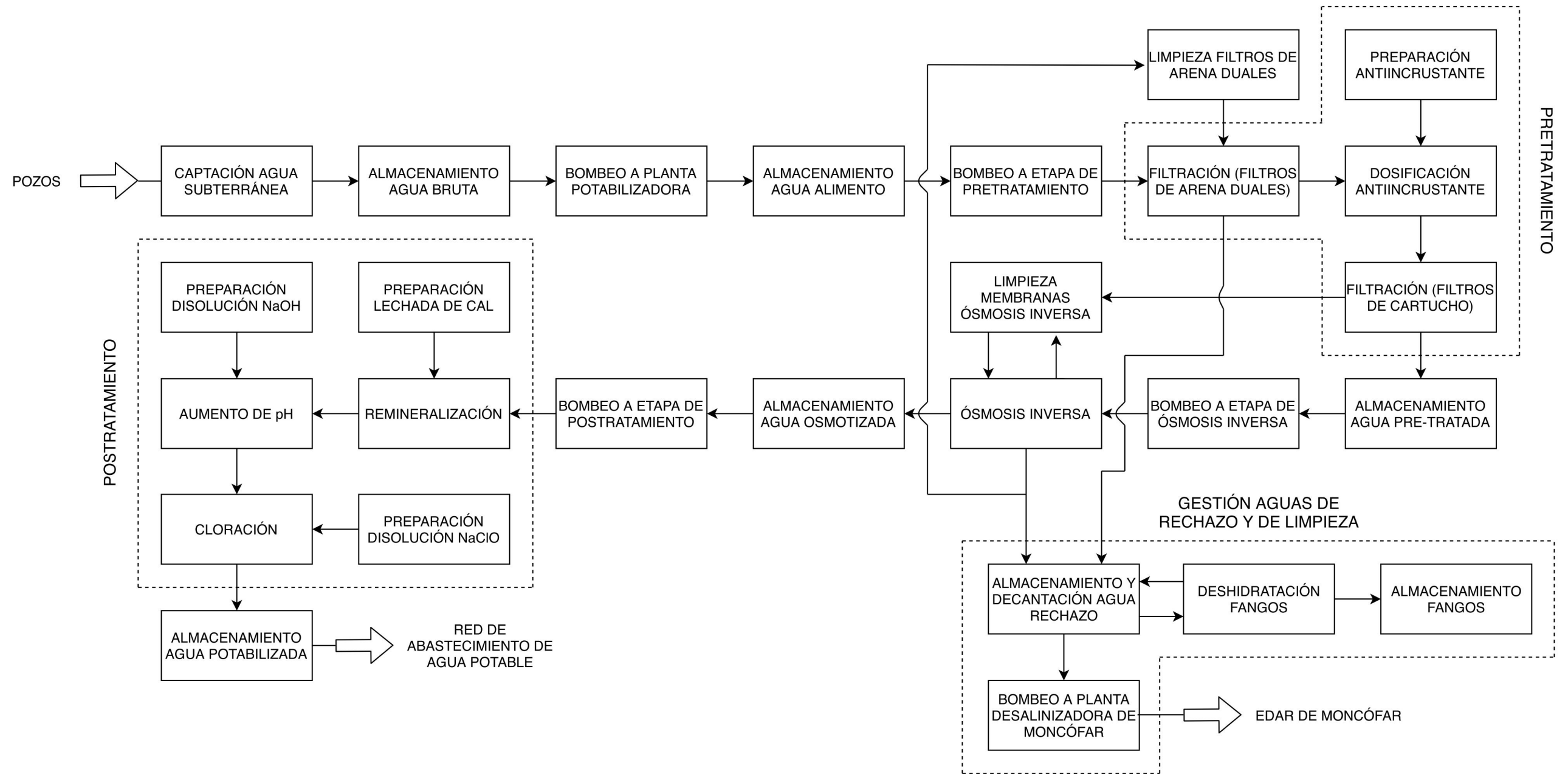
E: 1/1000

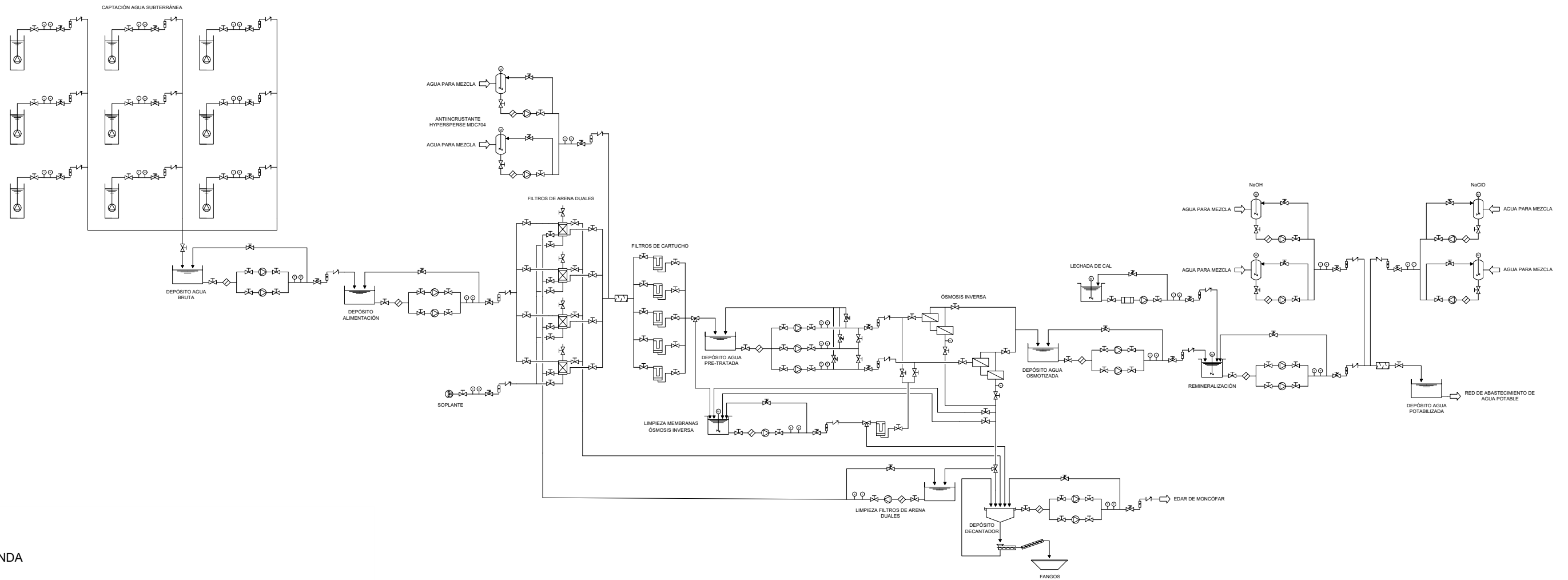


Este documento no es una certificación catastral, pero sus datos pueden ser verificados a través del 'Acceso a datos catastrales no protegidos' de la SEC.

- 743,800 Coordenadas U.T.M. Huso 30 ETRS89
- Límite de Manzana
- Límite de Parcela
- Límite de Construcciones
- Mobiliario y aceras
- Límite zona verde
- Hidrografía

Domingo , 5 de Abril de 2020





LEYENDA

	DEPÓSITO		MEZCLADOR ESTÁTICO		VÁLVULA DE SEGURIDAD
	DEPÓSITO AGITADO		MÓDULO DE MEMBRANAS		VÁLVULA DE 3 VÍAS
	DEPÓSITO DECANTADOR		ESCURRIDOR COMPACTADOR SINFIN		VÁLVULA ANTIRRETORNO
	CUBA DE RECOGIDA		TORNILLO SINFIN		CAUDALÍMETRO
	TANQUE AGITADO		BOMBA HIDRÁULICA		TERMÓMETRO
	FILTRO DE LECHO FLUJO		SOPLANTE		MANÓMETRO
	FILTRO DE CARTUJO		VÁLVULA DE PASO		
	FILTRO DE PROCESO		VÁLVULA DE REGULACIÓN		

TRABAJO FIN DE MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL



Proyecto: DISEÑO DE UNA POTABILIZADORA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA CON ALTO CONTENIDO SALINO, NITRATOS Y HERBICIDAS PARA UNA POBLACIÓN DE 20.000 HABITANTES

Plano: Diagrama de flujo de la instalación

Autor: Carlos Vázquez Díez

Fecha: Abril 2020

Escala: S/E

Nº Plano:

3