



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

Evaluación Técnico-Económica de las distintas alternativas
para la eliminación de los nutrientes fósforo y nitrógeno
para la nueva EDAR de Almoradí (Alicante).

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

AUTOR/A: El Mekkoudi , Zayed

Tutor/a: Serralta Sevilla, Joaquín

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

Trabajo Fin de Máster

Dpto. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

EVALUACIÓN TÉCNICA – ECONÓMICA DE LAS DISTINTAS ALTERNATIVAS PARA LA ELIMINACIÓN DE LOS NUTRIENTES FÓSFORO Y NITRÓGENO PARA LA NUEVA EDAR DE ALMORADÍ (ALICANTE).

Intensificación: *HIDRÁULICA URBANA.*

Autor:

EL MEKKOUDI ZAYED

Director:

DR. JOAQUÍN SERRALTA SEVILLA

SEPTIEMBRE, 2022



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihmma

Resumen del Trabajo de Fin de Máster

Datos del proyecto

Título del TFM en español: EVALUACIÓN TÉCNICA – ECONÓMICA DE LAS DISTINTAS ALTERNATIVAS PARA ELIMINACIÓN DE LOS NUTRIENTES FÓSFORO Y NITRÓGENO PARA LA NUEVA EDAR ALMORADÍ (ALICANTE).

Título del TFM en inglés: TECHNICAL - ECONOMIC EVALUATION ALTERNATIVES FOR NUTRIENT REMOVAL PHOSPHORUS AND NITROGEN IN THE WASTEWATER TREATMENT PLANT OF ALMORADÍ (ALICANTE).

Título del TFM en Valenciano: AVALUACIÓ TÈCNICA – ECONÒMICA DE LES DIFERENTS ALTERNATIVES PER A ELIMINACIÓ DELS NUTRIENTS FÒSFOR I NITROGEN PER A la NOVA *EDAR ALMORADÍ (ALACANT).

Alumno: El Mekkoudi Zayed

Director: Dr. Joaquín Serralta Sevilla

Fecha de lectura: Septiembre, 2022

Resumen

La EDAR de Almoradí no tiene la capacidad suficiente para tratar las aguas residuales de la población teniendo en cuenta el incremento previsto. Debido a ello un estudio realizado por la Administración llega a la conclusión de plantear la construcción de una nueva EDAR que quedará localizada al Noreste del término municipal, limitando con el municipio de Dolores. En este proyecto se plantean cuatro alternativas para el diseño de la EDAR incluyendo la eliminación de los nutrientes fósforo y nitrógeno, ya que el vertido será en una zona sensible. Tras la simulación de las alternativas se escogerá la más adecuada mediante una evaluación técnica-económica. Las alternativas son las siguientes: La primera alternativa consiste en un sistema de depuración convencional con eliminación biológica de nitrógeno y precipitación química del fósforo. La estabilización de los fangos se realizará mediante digestión aerobia. La segunda alternativa se basa en un sistema de oxidación total con eliminación biológica de nitrógeno y precipitación química del fósforo (esquema Ludzack-Ettinger modificado). La tercera alternativa consiste en el proceso de oxidación total con eliminación biológica de nitrógeno y fósforo (esquema A2/O). La cuarta alternativa se basa

en la combinación de un biorreactor de membranas con un proceso de oxidación total para la eliminación biológica de nitrógeno y precipitación química del fósforo.

Los resultados de las alternativas se optimizarán mediante la simulación por el programa DESASS 7.1 después de evaluar los efectos y ajustar los distintos parámetros de operación y diseño como: tiempo de retención celular, tiempo de retención hidráulico, caudal de recirculación de nitratos, volumen de los reactores, concentración de oxígeno disuelto en los reactores y la dosis de cloruro férrico. Tras las simulaciones se estimarán los costes de construcción y operación de las distintas alternativas para elegir la más adecuada. Entre los costes de operación se incluirán los costes energéticos, costes de reactivos y costes de gestión de los fangos producidos.

Resume

La *EDAR d'Almoradí no té la capacitat suficient per a tractar les aigües residuals de la població tenint en compte l'increment previst. A causa d'això un estudi realitzat per l'Administració arriba a la conclusió de plantejar la construcció d'una nova *EDAR que quedarà localitzada al Nord-est del terme municipal, limitant amb el municipi de Dolores. En aquest projecte es plantegen quatre alternatives per al disseny de la *EDAR incloent l'eliminació dels nutrients fòsfor i nitrogen, ja que l'abocament serà en una zona sensible. Després de la simulació de les alternatives es triarà la més adequada mitjançant una avaluació tècnica-econòmica. Les alternatives són les següents: La primera alternativa consisteix en un sistema de depuració convencional amb eliminació biològica de nitrogen i precipitació química del fòsfor. L'estabilització dels fangs es realitzarà mitjançant digestió aeròbia. La segona alternativa es basa en un sistema d'oxidació total amb eliminació biològica de nitrogen i precipitació química del fòsfor (esquema *Ludzack-*Ettinger modificat). La tercera alternativa consisteix en el procés d'oxidació total amb eliminació biològica de nitrogen i fòsfor (esquema A2/O). La quarta alternativa es basa en la combinació d'un bioreactor de membranes amb un procés d'oxidació total per a l'eliminació biològica de nitrogen i precipitació química del fòsfor.

Els resultats de les alternatives s'optimitzaran mitjançant la simulació pel programa *DESASS 7.1 després d'avaluar els efectes i ajustar els diferents paràmetres d'operació i disseny com: temps de retenció cel·lular, temps de retenció hidràulic, cabal de recirculació de nitrats, volum dels reactors, concentració d'oxigen dissolt en els reactors i la dosi de clorur fèrric. Després de les simulacions s'estimaran els costos de construcció i operació de les diferents alternatives per a triar la més adequada. Entre els costos d'operació s'inclouran els costos energètics, costos de reactius i costos de gestió dels fangs produïts.

Summary

The Almoradí WWTP (Wastewater treatment plant) does not have sufficient capacity to treat the population's wastewater, taking into account the expected increase. Due to this, a study carried out by the Administration reaches the conclusion of proposing the construction of a new WWTP that will be located to the Northeast of the municipal area, bordering the municipality of Dolores.

In this project, four alternatives are proposed for the design of the WWTP, including the elimination of the nutrients phosphorus and nitrogen, since the discharge will be in a sensitive area. After simulating the alternatives, the most appropriate will be chosen through a technical-economic evaluation. The alternatives are as follows: The first alternative consists of a conventional purification system with biological elimination of nitrogen and chemical precipitation of phosphorus. Stabilization of the sludge will be carried out by aerobic digestion. The second alternative is based on a total oxidation system with biological elimination of nitrogen and chemical precipitation of phosphorus (modified Ludzack-Ettinger scheme). The third alternative consists of the total oxidation process with biological elimination of nitrogen and phosphorus (A2/O scheme). The fourth alternative is based on the combination of a membrane bioreactor with a total oxidation process for the biological removal of nitrogen and chemical precipitation of phosphorus.

The results of the alternatives will be optimized by means of the simulation by the DESASS 7.1 program after evaluating the effects and adjusting the different operation and design parameters such as: cell retention time, hydraulic retention time, nitrate recirculation flow, volume of the reactors, dissolved oxygen concentration in the reactors and the dose of ferric chloride. After the simulations, the construction and operation costs of the different alternatives will be estimated to choose the most appropriate one. The operating costs will include energy costs, reagent costs and management costs of the sludge produced.

Palabras clave: Eliminación de nutrientes, estación depuradora de aguas residuales, estudio de alternativas, estudio económico.

Paraules Claus: Eliminació de nutrients, estació depuradora d'aigües residuals, estudi d'alternatives, estudi econòmic.

Key words: Economic study, study of alternatives, nutrient removal, wastewater treatment plant.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a mis padres, mi hermano y mis hermanas por apoyarme en todo momento en cualquier decisi3n que tome.

Agradezco a mi novia por el apoyo incondicional, por estar siempre a mi lado y por los ánim3s que me brinda cada día.

Agradezco a mis amigos del máster por hacerme sentir que he tomado la decisi3n correcta en estudiar el máster en la Universidad Politècnica de Valencia.

Agradezco a todos los profesores del MIHMA, por ser los mejores profesores que un estudiante puede tener, en especial a Joaquín Serralta Sevilla por darme la enorme oportunidad de aprender y por regalarme su tiempo cuando lo necesitaba.

Finalmente agradezco a la Universidad Politècnica de Valencia por ser una de las mejores universidades del mundo y por formarme en todos los aspectos tanto personales como profesionales.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	12
1.1	Aguas residuales urbanas (ARU).....	12
1.2	Efectos de los nutrientes en el cuerpo receptor	14
1.3	Importancia de la depuración de aguas residuales.....	14
1.3.1	Línea de aguas.....	15
1.3.2	Línea de Fangos.....	18
1.4	Procesos biológicos de cultivos en suspensión	19
1.4.1	Proceso de fangos activados.....	19
1.4.2	Reactor anaerobio de membranas (AnMBR).....	21
1.5	Eliminación de Nutrientes	25
1.5.1	Eliminación biológica del nitrógeno.....	25
1.5.2	Eliminación de fósforo	35
1.5.3	Procesos de eliminación de nutrientes.....	39
1.6	Marco Legislativo	44
2	OBJETIVO	46
3	DESCRIPCIÓN DE LA NUEVA EDAR ALMORADÍ.....	47
3.1	Contexto y ubicación Geográfica.....	47
3.2	Nueva ubicación de la estación depuradora de Almoradí	49
3.3	Proyección de la nueva EDAR.....	50
3.3.1	Población para el año horizonte	50
3.3.2	Análisis de caudales y de cargas contaminantes.....	51
4	PLANTEAMIENTO DE LAS ALTERNATIVAS	57
4.1	Alternativa 1: Proceso convencional con eliminación biológica de nitrógeno y precipitación química de fósforo.	57
4.2	Alternativa 2: Proceso de oxidación total con eliminación biológica de nitrógeno y precipitación química del fósforo. Esquema Ludzack-Ettinger modificado	58
4.3	Alternativa 3: Proceso de oxidación total con eliminación biológica de nitrógeno y eliminación biológica de fósforo. Esquema A2/O	59
4.4	Alternativa 4: Combinación del proceso de oxidación total con reactor anaerobio de membranas (AnMBR) con eliminación biológica de nitrógeno y precipitación química de fósforo.	60
5	SIMULACIÓN Y RESULTADO DE LAS ALTERNATIVAS	61
5.1	Descripción del SOFTWARE DESASS	61
5.2	Caracterización del agua residual.....	61
5.3	Simulación de las alternativas propuestas	75
5.3.1	Resultados alternativa 1: Proceso convencional con eliminación biológica de nitrógeno y	

precipitación química de fósforo.	77
5.3.2 Resultados alternativa 2: Proceso de oxidación total con eliminación biológica de nitrógeno y precipitación química de fósforo. Esquema Ludzack-Ettinger modificado.....	81
5.3.3 Resultados alternativa 3: Proceso de oxidación total con eliminación biológica de nitrógeno y eliminación biológica de fósforo. Esquema A2/O.....	84
5.3.4 Resultados alternativa 4: Combinación del proceso de oxidación total con reactor anaerobio de membranas (AnMBR) con eliminación biológica de nitrógeno y precipitación química del fósforo.....	87
6 COMPARACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS SIMULADAS	92
6.1 Análisis técnico de las alternativas	92
6.2 Requerimiento de equipos y materiales	93
6.3 Valoración económica de las alternativas	95
6.3.1 Coste de Construcción	95
6.3.2 Coste de Explotación.....	98
6.4 Selección de la alternativa óptima	111
7 CONCLUSIONES	113
8 BIBLIOGRAFÍA	115

Índice de figuras

Figura 1. Esquema general de tratamiento en una EDAR	15
Figura 2. Evolución de los MBR en España. Capacidad y Nº de plantas	21
Figura 3. Esquema de funcionamiento de las bacterias acidogénicas y metanogénicas	22
Figura 4. Configuraciones de membranas.....	23
Figura 5. Transformación del nitrógeno.....	26
Figura 6. Metabolismo bacteriano autótrofo quimiosintético.....	27
Figura 7. Efecto de la temperatura en el TRC y la velocidad de crecimiento de las bacterias autótrofas	29
Figura 8. Evolución del crecimiento de bacterias autótrofas en función del OD y la temperatura	30
Figura 9. Factor de corrección en función del pH	31
Figura 10. Esquema del metabolismo de las bacterias acumuladoras de fósforo (PAO).....	36
Figura 11. Evolución de componentes en el metabolismo interno y externo de las bacterias PAO.....	37
Figura 12. Posibles puntos de alimentación de reactivos para la eliminación química de fosforo. (a) Previo a la decantación primaria. (b) Previo o posterior al tratamiento secundario. (c) Posterior al decantador secundario.....	38
Figura 13. Esquemas de eliminación biológica de nitrógeno con zona anóxica separada.....	40
Figura 14. Esquema de eliminación biológica de fósforo A/O	41
Figura 15. Esquemas de eliminación conjunta de nutrientes N y P	42
Figura 16. Propuesta de alternativas para la nueva ubicación de la EDAR Almoradí	48
Figura 17. Ubicación nueva de la EDAR Almoradí.....	49
Figura 18. Datos censo población Almoradí.....	51
Figura 19. Caudales de entrada a EDAR de casco urbano de días 28 y 30 de septiembre.....	54
Figura 20. Caudales de entrada a EDAR de casco urbano de día 2 de octubre.....	55
Figura 21. Caudales de entrada a EDAR de casco urbano de días 3 y 4 octubre	55
Figura 22. Relación de los cálculos intermedios y los parámetros de DESASS.....	73
Figura 23. Resultados de valores a introducir en el DESASS	75
Figura 24. Esquema de simulación en DESASS de la alternativa 1.....	77
Figura 25. Esquema de simulación en DESASS de la alternativa 2.....	81
Figura 26. Esquema de simulación en DESASS de la alternativa 3.....	84
Figura 27. Esquema de simulación en DESASS de la alternativa 4.....	87
Figura 28. Comparativo de los costes de construcción y explotación de cada alternativa (€/año).....	112
Figura 29. Comparativo de los costes totales (€/año).....	113

Índice de tablas

Tabla 1. Contaminantes frecuentes en el Agua Residual Urbana y las alternativas para su eliminación	13
Tabla 2. Tratamientos en la línea de aguas.....	15
Tabla 3. Tratamientos en la línea de fangos.....	18
Tabla 4. Valores medios de los parámetros de operación en los procesos convencional y oxidación total	20
Tabla 5. Temperatura requerida para la nitrificación	30
Tabla 6. Constantes de productos de solubilidad para la precipitación de fosfatos.....	38
Tabla 7. Requisitos para los vertidos procedentes de instalaciones de Depuración de Aguas Residuales Urbanas mediante tratamiento secundario (Directiva 91/271/CEE).....	45
Tabla 8. Requisitos de calidad de vertidos de N y P total (Directiva 91/271/CEE)	45
Tabla 9. Pesos y valoración de las alternativas propuestas	48
Tabla 10. Datos de consumos de agua potable de Almoradí.....	52
Tabla 11. Número de viviendas según planeamiento de Almoradí	52
Tabla 12. Previsión de superficie de suelo industrial a desarrollar en Almoradí	53
Tabla 13. Previsión de superficie de suelo terciario a desarrollar en Almoradí.....	53
Tabla 14. Concentración de contaminantes de diseño de la nueva EDAR Almoradí	56
Tabla 15. Temperaturas mensuales en Almoradí	62
Tabla 16. Temperatura en grados del agua en Almoradí.....	62
Tabla 17. Datos para el diseño de la nueva EDAR Almoradí	63
Tabla 18. Valores medios de los parámetros convencionales analizadas en 22 depuradoras	64
Tabla 19. Relación de DQOsol/DQO.....	65
Tabla 20. Relación de NH ₄ /NT	66
Tabla 21. Relación SSV/SST	67
Tabla 22. Relación de PO ₄ /PT.....	68
Tabla 23. Resultados de los cálculos intermedios.....	69
Tabla 24. Valores de los coeficientes estequiométricos	74
Tabla 25. Condiciones de funcionamiento del decantador primario de la alternativa 1	77
Tabla 26. Condiciones de funcionamiento de los reactores de la alternativa 1	78
Tabla 27. Condiciones de funcionamiento del decantador secundario de la alternativa 1.....	78
Tabla 28. Condiciones de funcionamiento del digestor aerobio de la alternativa 1.....	79
Tabla 29. Condiciones de funcionamiento del espesador de la alternativa 1.....	79
Tabla 30. Condiciones de funcionamiento del deshidratador mecánico de la alternativa 1	79
Tabla 31. Calidad del efluente de la alternativa 1.....	80
Tabla 32. Condiciones de funcionamiento de los reactores de la alternativa 2	82
Tabla 33. Condiciones de funcionamiento del decantador secundario de la alternativa 2.....	82
Tabla 34. Condiciones de funcionamiento del espesador de la alternativa 2.....	83
Tabla 35. Condiciones de funcionamiento del deshidratador mecánico de la alternativa 2.....	83
Tabla 36. Calidad del efluente de la alternativa 2.....	83
Tabla 37. Condiciones de funcionamiento de los reactores de la alternativa 3	85
Tabla 38. Condiciones de funcionamiento del decantador secundario de la alternativa 3.....	85
Tabla 39. Condiciones de funcionamiento del espesador de la alternativa 3	86
Tabla 40. Condiciones de funcionamiento del deshidratador mecánico de la alternativa 3.....	86
Tabla 41. Calidad del efluente de la alternativa 3.....	86
Tabla 42. Condiciones de funcionamiento de los reactores de la alternativa 4	88
Tabla 43. Condiciones de funcionamiento del decantador secundario de la alternativa 4.....	88
Tabla 44. Condiciones de funcionamiento del espesador de la alternativa 4.....	89
Tabla 45. Condiciones de funcionamiento del deshidratador mecánico de la alternativa 4.....	89
Tabla 46. Reactor anaerobio de membranas (AnMBR) de la alternativa 4.....	89
Tabla 47. Reactor anaerobio de la alternativa 4	90
Tabla 48. Calidad del agua para riego de la alternativa 4	90
Tabla 49. Calidad del efluente (con riego) de la alternativa 4	90

Tabla 50. Calidad del efluente (sin riego) de la alternativa 4.....	91
Tabla 51. Resumen de los resultados de las cuatro alternativas	92
Tabla 52. Dimensiones de los módulos de membranas.....	94
Tabla 53. Número de módulos según el modelo a utilizar.....	94
Tabla 54. Coste de encofrado (€/año).....	96
Tabla 55. Costes de hormigonado armado (€/año)	97
Tabla 56. Coste de las membranas (€/año)	98
Tabla 57. Consumo de energía y coste energético anual de los agitadores (€/año).....	99
Tabla 58. Consumo de energía y coste energético anual de los agitadores (€/año).....	100
Tabla 59. Coste de bombeo de recirculación de nitratos (€/año).....	101
Tabla 60. Coste de bombeo de recirculación de fangos (€/año)	101
Tabla 61. Coste de bombeo del digestor aerobio al espesador (€/año)	102
Tabla 62. Coste de bombeo de decantador secundario-espesador (€/año).....	103
Tabla 63. Coste de bombeo de espesador-deshidratador (€/año)	103
Tabla 64. Coste de bombeo de reactor anaerobio-AnMBR (€/año)	104
Tabla 65. Coste de bombeo de permeado (€/año)	104
Tabla 66. Coste de aireación (€/año)	105
Tabla 67. Coste de recirculación de biogás (€/año)	106
Tabla 68. Producción diaria de fangos (Kg/día) y el coste anual de su gestión (€/año)	108
Tabla 69. Consumo diario de cloruro férrico (ton/día) y su coste anual (€/año)	109
Tabla 70. Coste anual de reactivos para limpieza química de membranas (€/año).....	109
Tabla 71. Ahorro en €/año debido a la generación de metano.....	110
Tabla 72. Costes totales (€/año)	111

1 INTRODUCCIÓN.

La contaminación de las aguas supone un peligro para el ecosistema y para nuestra sociedad. Gran parte de esta contaminación es causada por el vertido de aguas residuales directamente al medio receptor (lagos, ríos, acuíferos). De ello la importancia de recuperar y conservar los recursos hídricos y el tratamiento de todo tipo de aguas residuales antes de ser vertidas.

Las aguas residuales urbanas (A.R.U) requieren un tratamiento adecuado en las EDARs (Estación Depuradora de Aguas Residuales) donde se reduce la concentración de los contaminantes de manera que no supongan un efecto negativo sobre el medio receptor.

Durante los primeros años los tratamientos de aguas residuales tenían como función la reducción de la DQO y DBO (demanda química y biológica de oxígeno), no obstante, al ver que estos tratamientos seguían dando problemas medioambientales como por ejemplo la eutrofización (proliferación de las cianobacterias) por el vertido de nutrientes (nitrógeno y fósforo), ha llevado a modificar los requisitos de vertido asegurando una mejor calidad del efluente.

1.1 Aguas residuales urbanas (ARU).

Cuando escuchamos aguas residuales, nos referimos a aguas contaminadas, luego, en primer lugar, debemos de ser capaces de caracterizar las aguas residuales urbanas, es decir, conocer que contaminantes la componen. En la **Tabla 1** podemos ver cuáles son los contaminantes de las aguas residuales urbanas, siendo los más frecuentes: Materia orgánica, Patógenos, Sólidos Suspendidos y **Nutrientes** (Nitrógeno y Fósforo). Así mismo, a la derecha, se detallan los métodos para la eliminación correspondiente a cada contaminante.

Tabla 1. Contaminantes frecuentes en el Agua Residual Urbana y las alternativas para su eliminación (Martí, 2014).

Contaminante del agua	Operación de tratamiento
Sólidos en suspensión	<ul style="list-style-type: none"> - Sedimentación - Desbaste y aireación - Variaciones de filtración - Flotación - Adición de polímeros o reactivos químicos - Coagulación y sedimentación - Sistemas por evacuación al terreno
Materia orgánica biodegradable	<ul style="list-style-type: none"> - Variaciones de fangos activados - Película fija: filtros percoladores - Película fija: discos biológicos - Variaciones del lagunaje - Filtración intermitente en arena - Sistemas de tratamiento por evacuación al terreno - Sistemas físico-químicos
Patógenos	<ul style="list-style-type: none"> - Cloración - Hipocloración - Ozonización - Sistemas de tratamiento por evacuación al terreno
Nutrientes: Nitrógeno	<ul style="list-style-type: none"> - Variaciones de sistema de cultivo-suspendido con nitrificación y desnitrificación - Variaciones del sistema d película fija con nitrificación y desnitrificación - Arrastre de amoníaco (stripping) - Intercambio de iones - Cloración en el punto crítico - Sistemas de tratamiento por evacuación al terreno
Fósforo	<ul style="list-style-type: none"> - Adición de sales metálicas - Coagulación y sedimentación con cal - Eliminación biológica y/o química del fósforo - Sistemas de tratamiento por evacuación al terreno
Materia orgánica refractaria	<ul style="list-style-type: none"> - Adsorción en carbón - Ozonización terciaria - Sistemas de tratamiento por evacuación al terreno
Metales pesados	<ul style="list-style-type: none"> - Precipitación química - Intercambio de iones - Sistemas de tratamiento por evacuación al terreno
Sólidos inorgánicos disueltos	<ul style="list-style-type: none"> - Intercambio de iones - Ósmosis inversa - Electrodialisis

1.2 Efectos de los nutrientes en el cuerpo receptor.

El nitrógeno está presente en su forma orgánica como: urea, proteínas, azúcares aminados y en su forma inorgánica como: amoniaco, nitritos y nitratos. El fósforo es frecuente encontrarlo en forma de polifosfatos, ortofosfatos y fósforo orgánico.

Pero, por qué es tan nocivo el vertido de estos nutrientes al medio receptor. La respuesta es muy simple. El vertido de estos nutrientes y un exceso de ellos favorecen el proceso de eutrofización. La eutrofización es la proliferación de algas y otras especies vegetales (ej: cianobacterias). Como consecuencia se produce una disminución del oxígeno disuelto en el agua, además, la lisis (muerte) de las cianobacterias es materia orgánica para las bacterias aerobias, que consumen oxígeno para su degradación. Las condiciones resultantes dejan de ser aptas para la vida de seres acuáticos.

1.3 Importancia de la depuración de aguas residuales.

La función principal de la estación depuradora de aguas residuales (EDAR) es la de conseguir reducir los niveles de concentración de los contaminantes en el agua residual antes de su vertido al medio receptor. A continuación, veremos cómo podemos lograr esta reducción mediante unos procesos que se pueden clasificar en:

- **Procesos físicos:** En los procesos físicos se aplican fuerzas para modificar las características de las aguas. Los procesos más comunes son: Medición de caudales, desbaste, sedimentación primaria y secundaria, floculación y filtración.
- **Procesos químicos:** En los procesos químicos se logran la eliminación total o parcial de contaminantes mediante reacciones. Por ejemplo, la adición de reactivos coagulantes con el fin de precipitar el fósforo o la adición de cloro para eliminar patógenos.
- **Procesos biológicos:** Los procesos biológicos son asociados al desarrollo de bacterias para la oxidación de contaminantes como la materia orgánica biodegradable o nutrientes (nitrógeno y fósforo).

La estación depuradora también ha de tratar los fangos generados en el tratamiento de las aguas residuales. Se generan en el decantador primario y en el secundario. Por lo tanto, toda depuradora se divide en una línea de tratamiento de aguas (línea de aguas) y una línea de tratamiento de fangos (línea de fangos).

La representación del esquema general del tratamiento de agua residual en una estación

depuradora puede verse en la **Figura 1**.

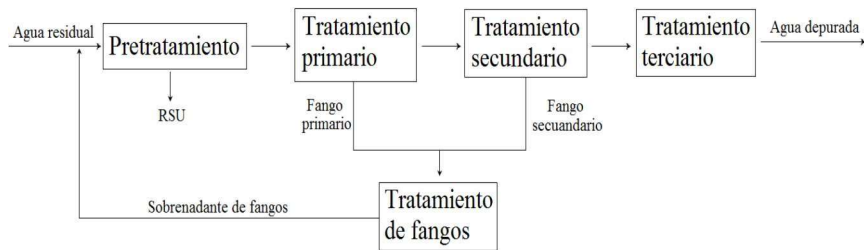


Figura 1. Esquema general de tratamiento en una EDAR (Martí, 2014)

1.3.1 Línea de aguas.

Dentro de la línea de aguas podemos encontrar los siguientes procesos o etapas: empezando por el pretratamiento, para luego, seguir con el tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario en caso de querer potabilizar el agua. En la **Tabla 2** se pueden encontrar varios métodos de tratamiento para cada una de las etapas mencionadas anteriormente.

Tabla 2. Tratamientos en la línea de aguas (Martí, 2014)

Pretratamiento	<ul style="list-style-type: none"> - Desbaste - Desarenado-desengrasado - Homogeneización y regulación de caudales - Preaireación 		
Tratamientos primarios	<ul style="list-style-type: none"> - Decantación primaria - Flotación - Tratamiento Físico químico - Fosas sépticas y decantadores-digestores 		
Tratamientos secundarios	- Aerobios	Fangos activados	<ul style="list-style-type: none"> - Alta carga - Media carga (el convencional) - Aireación prolongada - Contacto- Estabilización - Doble etapa - Sistemas secuenciales - Bioreactores con membranas
		Procesos de película fija	<ul style="list-style-type: none"> - Lechos bacterianos - Biodiscos - Biofiltros aireados - Lechos aireados sumergidos - Sistemas de biomasa fija sobre lecho móvil
	- Procesos no convencionales	Lagunaje	<ul style="list-style-type: none"> - Lagunas anaerobias - Lagunas aerobias - Lagunas facultativas - Lagunas aireadas
		Infiltración-percalación Lechos de Turba Humedales artificiales Filtros verdes	
	- Procesos anaerobios		
Tratamientos secundarios con eliminación de nutrientes	<ul style="list-style-type: none"> - Tratamientos con eliminación de nitrógeno - Tratamientos con eliminación de fósforo - Tratamientos con eliminación de nitrógeno y fósforo 		

Tratamientos terciarios	- Reducción de DBO5	Tratamiento físico-químico Filtración Micro filtración Ultrafiltración
	- Desinfección	Cloro gas Hipoclorito sódico Dióxido de cloro Ozono Rayos ultravioleta
	- Reducción de sales	Ósmosis inversa Electrodialisis reversible Intercambio iónico

- **Pretratamiento.**

El pretratamiento es un tratamiento de protección cuyo principal objetivo es la reducción o eliminación de elementos que puedan dificultar las operaciones y el mantenimiento de los equipos. Para la eliminación de elementos voluminosos se utilizan las rejas y tamices. Para la eliminación de arenas y gravas se usa el desarenador.

- **Tratamiento Primario.**

En el tratamiento primario eliminamos gran parte de los sólidos suspendidos, predominando la sedimentación floculada, donde las partículas sedimentan formando flóculos. Antes del decantador primario se puede aplicar el tratamiento químico de coagulación-floculación para aumentar la eliminación de sólidos suspendidos. Con la coagulación evitamos la doble capa eléctrica de las coloides y con la floculación generamos la colisión y adherencia de partículas coaguladas.

- **Tratamiento Secundario.**

El tratamiento secundario es un tratamiento biológico para la eliminación de materia orgánica gracias a las bacterias que desarrollan dos procesos conocidos como: Catabolismo, proceso de obtención de energía y anabolismo, proceso de síntesis de tejido celular.

Los organismos se pueden clasificar según:

- **Fuente de carbono:** Las bacterias heterótrofas obtienen el carbono a partir de la materia orgánica, mientras que las bacterias autótrofas a partir del CO₂. Las bacterias heterótrofas usan la materia orgánica también como dador de electrones y las autótrofas otro compuesto inorgánico.
- **Fuente de energía:** Dentro de las reacciones de transferencia de electrones podemos distinguir entre dador de electrones y aceptor de electrones. Las bacterias aerobias

usan como aceptor de electrones el O_2 , las facultativas pueden usar el O_2 y si no hay son capaces de usar otros compuestos como el nitrato (NO_3) y las anaerobias usan otros compuestos como aceptor de electrones distintos del oxígeno.

En función de la disposición de la biomasa podemos diferenciar dos tipos procesos como **procesos de cultivo en suspensión** (Procesos en medio líquido) y **procesos de cultivo fijo o también llamados de soporte sólido** (Procesos de película fija, donde los microorganismos están adheridos a soportes sólidos),

En este proyecto nos centraremos en los procesos de cultivos en suspensión, donde, los más comunes en los cultivos en suspensión son: el proceso de fangos activados y los biorreactores de membranas.

- **Tratamiento Terciario.**

El tratamiento terciario es la última fase de la depuración de aguas residuales, cuyo objetivo es la eliminación de nitrógeno, fósforo, metales pesados, compuestos orgánicos biodegradables, bacterias, virus y patógenos. Los tipos de tratamiento terciario más frecuentes que nos podemos encontrar se indican a continuación:

- **Procesos físico-químicos:** Eliminación de materia orgánica suspendida mediante los procesos de Coagulación y floculación.
- **Filtración:** El agua fluye a través de un medio poroso en donde se retienen los contaminantes.
- **Membranas de filtración:** Los contaminantes cuyo tamaño es superior al tamaño del poro de la membrana quedan retenidos. Estos tipos de filtración pueden ser: Microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración.
- **Desinfección:** Destrucción de los microorganismos que causan enfermedades mediante la cloración, ozonización y radiación ultravioleta.

Otros procesos que se usan y cada vez más, son la ósmosis inversa y la electrodiálisis.

1.3.2 Línea de Fangos.

La línea de fangos consiste en el tratamiento de la purga de fangos del decantador primario y del decantador secundario. Estos lodos se caracterizan por un elevado contenido de agua. Debido a lo anterior, se aplican una serie de tratamientos con el fin de conseguir unas condiciones finales para su posible uso.

Las alternativas de tratamientos en la línea de fangos que podemos optar aparecen en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Tratamientos en la línea de fangos (Martí, 2014)

Espeamiento de fangos	<ul style="list-style-type: none"> - Espesamiento por gravedad - Flotación - Tambores rotativos - Mesas espesadoras - Centrífugas 	
Estabilización de fangos	- Digestión anaerobia	Mesófila Termófila
	- Estabilización aerobia	Mesófila Termófila
	- Estabilización química (cal)	
Acondicionamiento del fango	<ul style="list-style-type: none"> - Química - Térmica - Ultrasonidos 	
Deshidratación de fangos	<ul style="list-style-type: none"> - Centrífugas - Filtros banda - Filtros prensa - Eras de secado - Secado solar 	
Secado	- Secado térmico	
Tratamientos termoquímicos	<ul style="list-style-type: none"> - Incineración (combustión completa) - Gasificación - Oxidación húmeda - Hidrólisis térmica 	
Disposición final del fango	<ul style="list-style-type: none"> - Vertedero - Uso agrícola directo - Compostaje - Vertido al mar - Utilización en el sector de la construcción 	

1.4 Procesos biológicos de cultivos en suspensión.

Dentro de los procesos biológicos de cultivo en suspensión nos enfocaremos en los procesos de fangos activados y en los biorreactores de membranas.

1.4.1 Proceso de fangos activados.

Tratamiento o proceso caracterizado por disponer de aporte de oxígeno por medios mecánicos y por la recirculación de una fracción de los fangos del decantador secundario al reactor biológico.

Pueden clasificarse en función de la carga másica en tres tipos de procesos como son: Alta Carga (no permite obtener la calidad de vertido deseada, por lo que no se usa en estos casos), Convencional y Oxidación Total.

El proceso convencional funciona con decantadores primarios para la eliminación de sólidos suspendidos predominando la sedimentación floculada. El decantador secundario para la sedimentación de los fangos biológicos y para recircular una fracción al reactor biológico. Para lograr la estabilización de los fangos obtenidos en la purga se requiere de una digestión, espesamiento y deshidratación.

Los tiempos de retención celular son relativamente bajos, un intervalo de 5 a 15 días. En los reactores la concentración de sólidos suspendidos debe estar en un intervalo de 2.500 – 4.500 mg SST/l. La producción de sólidos suspendidos totales es mayor que en procesos de oxidación total, no obstante, el consumo de oxígeno en este tipo de sistema resulta ser menor.

El proceso de Oxidación Total es muy similar al proceso convencional excepto en algunos detalles. Los tiempos de retención celular están en un intervalo de 20 a 30 días.

Además, en estos sistemas no se usa el decantador primario, por lo que, su uso es limitado a plantas pequeñas. Una de las ventajas que podemos encontrarnos es en la menor producción de fangos, además, de obtener un fango estabilizado, luego, no hará falta de requerir digestores en la línea de fangos, solamente será necesario disponer de espesadores y deshidratadores para quitar el exceso de agua.

Los valores medios de los parámetros de operación en los procesos: convencional de mezcla completa y oxidación total son mencionados en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Valores medios de los parámetros de operación en los procesos convencional y oxidación total (Seco & Ferrer, 2012).

Proceso	TRC (días)	Cm (Kg DBO ₅ /kg SSLM.d.)	X _{SST} (g/l)	TRH (horas)	rfangos
Convencional	5.0-15.0	0,15-0,40	2,5-4,5	3.0-9.0	0,25-1,0
Oxidación Total	20-30	≤ 0,07	3.0-6.0	18-36	0,75-1,5

Donde:

- **TRC:** Tiempo de retención celular o edad del fango: Representa el tiempo que los microorganismos permanecen en el sistema.
- **Cm:** Carga másica: Representa la cantidad de sustrato añadido al sistema (DBO₅ o DQO) y consumida diariamente por la biomasa presente en el reactor, es decir, el alimento que necesitan los microorganismos.
- **TRH:** Tiempo de retención hidráulico: Representa el tiempo que el influente permanece en el sistema.
- **X_{SST}:** Representa la concentración de los sólidos suspendidos totales.
- **rfangos:** Representa la recirculación de los fangos.

1.4.2 Reactor anaerobio de membranas (AnMBR).

En España cada vez aumenta el uso de los MBR (Reactor Biológico de Membranas) tal y como se muestra en la **Figura 2**. Esta tecnología es muy extendida para tratamientos aerobios, no obstante, los procesos anaerobios han recibido cierta atención debido sus ventajas. En este apartado comentaremos sobre los reactores anaerobios de membranas ya que una de las alternativas se basará en este concepto.

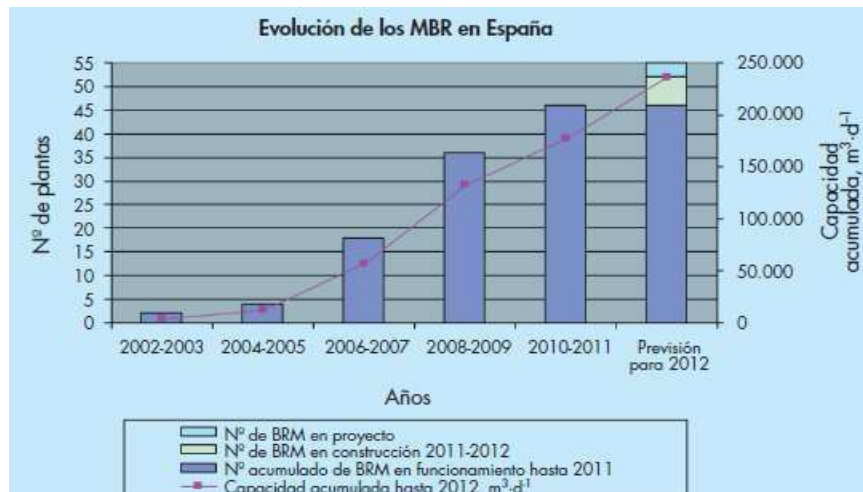


Figura 2. Evolución de los MBR en España. Capacidad y Nº de plantas (CEDEX, 2016)

El principal uso del reactor anaerobio de membranas en esta alternativa es para reutilizar el agua para riego, así mismo, para la generación de biogás. Se aprovechará la producción de metano para la generación de energía.

Limpieza de las membranas: Las membranas suelen presentar problemas de ensuciamiento debido a la formación de tortas de microorganismos que se adhieren a las mismas, para evitar el constante ensuciamiento se recircula biogás con el fin de generar un efecto de contralavado. No obstante, no se consigue una limpieza profunda, por ello se ha de limpiar una o dos veces al año usando hipoclorito de sodio y ácido cítrico.

Producción de biogás: Dentro del reactor anaerobio la materia orgánica se transforma en ácidos volátiles gracias a las bacterias acidogénicas y estos ácidos volátiles se transforman en biogás debido a reacciones producidas por las bacterias metanogénicas. En la **figura 3** se presenta el esquema de funcionamiento, donde:

MOFB: Materia orgánica fácilmente biodegradable.

MOLB: Materia orgánica lentamente biodegradable.

Debris: Materia inerte.

N y P: Nitrógeno y fósforo.

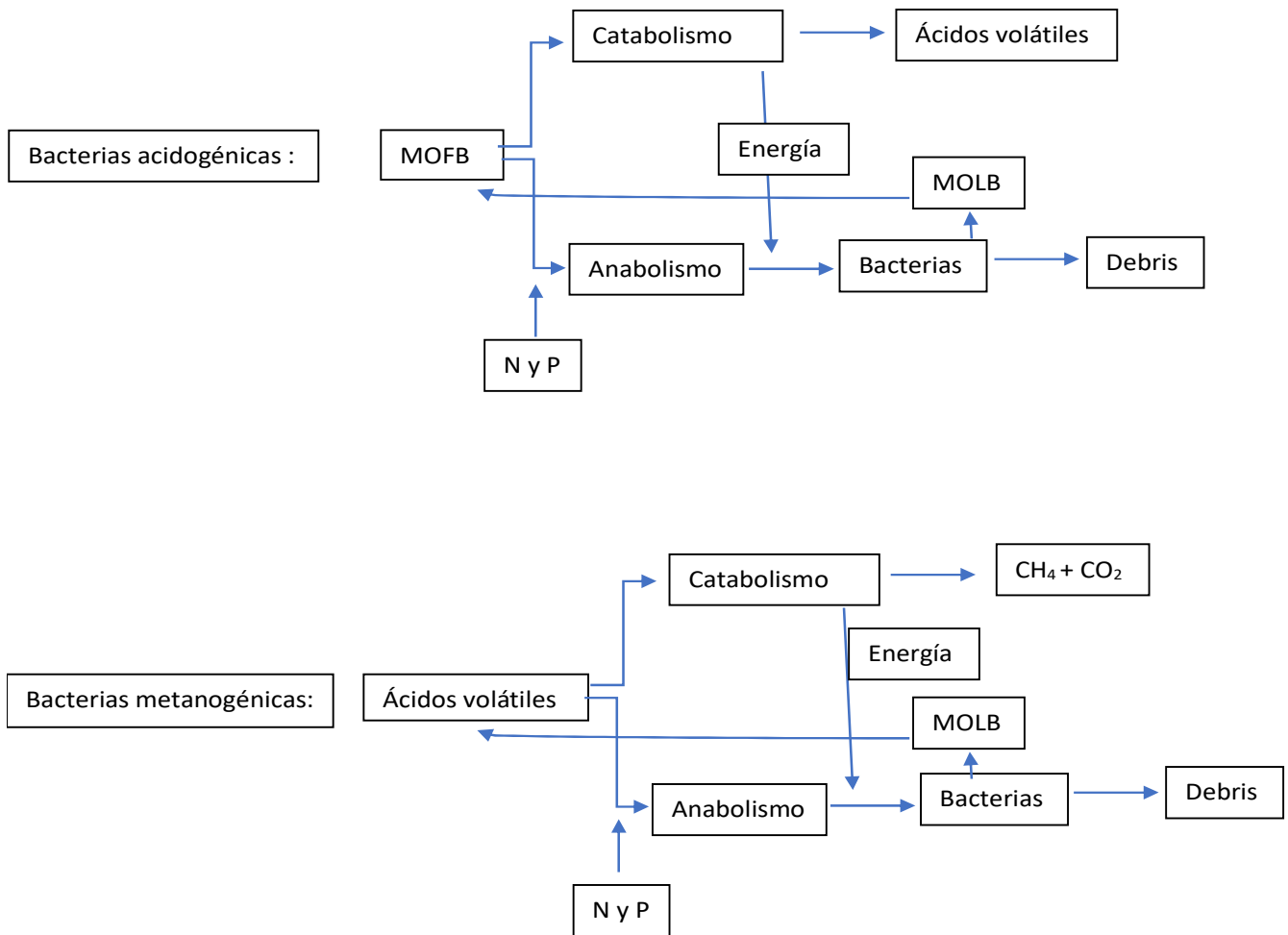


Figura 3. Esquema de funcionamiento de las bacterias acidogénicas y metanogénicas. (Fuente: Elaboración propia)

Los más utilizados en estos sistemas son las membranas de tipo tubular, placas planas y fibra hueca, representados en la **Figura 4**.



Figura 4. Configuraciones de membranas. (CEDEX, 2016)

Los módulos con un conjunto de membranas cuyo objetivo es de cumplir los siguientes requisitos:

- ✓ Que sean **compactos**.
- ✓ Que sean **estancos**.
- ✓ Que sean **modulares**.
- ✓ Que tengan un buen **contacto**.

Los **módulos planos** las membranas tienen que ser grandes, hay mucha pérdida de carga ya que el flujo tiene que realizar giros así mismo las membranas tienen poca eficiencia y la colmatación es rápida. Las **membranas tubulares** aguantan poco grandes presiones, pero tienen mayor superficie de contacto que las membranas planas. Las **membranas capilares** los módulos son muy densos, estructuralmente aguantan más, pero requieren de elevadas presiones.

Las tipologías de filtración de membranas son:

- **Filtración frontal:** La membrana es perpendicular a la dirección del flujo.
- **Filtración tangencial:** Membrana tangencial a la dirección del flujo, este efecto favorece al lavado de la torta.

Uno de los parámetros de diseño de los MBR que usaremos es el flujo de permeado.

Flujo de permeado: El caudal que atraviesa 1 m² de la superficie de la membrana porosa.

$$F \left(\frac{l}{h \times m^2} \right) = \frac{Q \left(\frac{l}{h} \right)}{S \left(m^2 \right)}$$

Donde:

Q: Caudal de permeado en litros/hora.

S: Área de la membrana en m².

Veamos a ver las ventajas e inconvenientes del uso de los procesos de AnMBR:

➤ Ventajas:

- Reutilizar agua para riego.
- Obtención de biogás para la producción de energía.
- La producción de energía Reduce del coste de explotación.

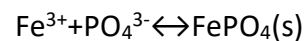
➤ Inconvenientes:

- Tener en cuenta las épocas donde no se reutilizará agua para riego, luego, esto supone un sobredimensionamiento de los equipos elevando el coste de construcción.
- El coste de las membranas eleva el coste de construcción.
- El rendimiento de los equipos que producen energía a partir del biogás suele ser del 30%.
- La reducción del coste de explotación debido a la producción de energía se ve muy afectada por el precio del Kwh.

1.5 Eliminación de Nutrientes.

En este trabajo propondremos dos alternativas para la eliminación de los nutrientes, una de las alternativas será por vía química y la otra por vía biológica. No obstante, la experiencia ha podido demostrar que los procesos biológicos constituyen un medio fiable y efectivo de eliminar el nitrógeno y fósforo (Metcalf & Eddy, 1995).

La eliminación química de los ortofosfatos se consigue añadiendo sales de hierro como el cloruro férrico, de esta forma se logra la precipitación del compuesto FePO_4 mediante la siguiente reacción:



La eliminación biológica se consigue gracias a un grupo de bacterias heterótrofas conocidas como organismos acumuladores de polifosfatos (PAOs).

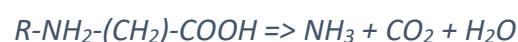
La eliminación del nitrógeno se obtiene por la transferencia del nitrógeno soluble en fase líquida a la fase gaseosa por la desnitrificación heterótrofa (Henze, Van Loosdrecht, Ekama, & Brdjanovic, 2011).

1.5.1 Eliminación biológica del nitrógeno.

La urea es una sustancia química de fórmula $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, esta se caracteriza por ser incolora. La urea se encuentra en mayor porcentaje en la orina, sudor y en la materia fecal.

Debido a que es un compuesto orgánico con nitrógeno, es fácilmente hidrolizado por la enzima ureasa a amoníaco y anhídrido carbónico, por lo tanto, la liberación del amoníaco se produce muchas veces antes de llegar las aguas residuales a la EDAR (Catalán, 1997).

Cuando un organismo muere se transforma el nitrógeno orgánico de los aminoácidos en amoníaco mediante el proceso de amonificación (Avendaño, 2011).



La eliminación biológica del nitrógeno la podemos conseguir mediante la acción de las bacterias autótrofas nitrificantes y heterótrofas desnitrificantes que se desarrollan en el agua residual, si se dan las condiciones óptimas requeridas del pH, temperatura y tiempo de retención celular. La eliminación del nitrógeno se consigue forzando la nitrificación, es decir, la transformación del nitrógeno orgánico en nitrógeno amoniacal mediante la hidrólisis, para

luego a nitrato. Luego, mediante la desnitrificaci3n el nitr3geno se elimina en forma de nitr3geno gas. En la **Figura 5** se representa el proceso de transformaci3n del nitr3geno.

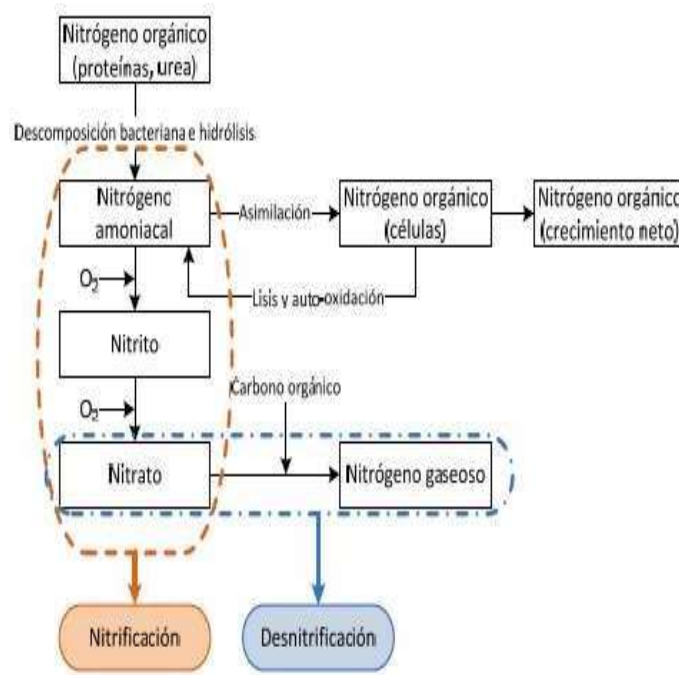


Figura 5. Transformaci3n del nitr3geno (Jiménez, 2010)

- **Nitrificación biológica.**

Tal y como hemos mencionado anteriormente, el nitrógeno amoniacal se oxida a nitrito (NO_2) y luego a nitrato (NO_3), siendo llevado a cabo este proceso por las bacterias denominadas bacterias autótrofas amonioxidantes (AMM) y nitritooxidantes (NIT).

a. Bacterias AMM y NIT

En la mayoría de las EDARs, el amonio es oxidado a nitrito por las bacterias AMM del género Nitrosomonas y el nitrito es oxidado a nitratos por las bacterias NIT del género Nitrospira o Nitrobacter (Avendaño, 2011).

Estas bacterias prosperan en aguas con altas concentraciones de oxígeno y de nitritos, sucediendo lo contrario en el caso de las Nitrospira, que se adaptan mejor a bajas concentraciones de nitritos y de oxígeno disuelto (Avendaño, 2011). En la **Figura 6** se representa el metabolismo de las bacterias autótrofas.

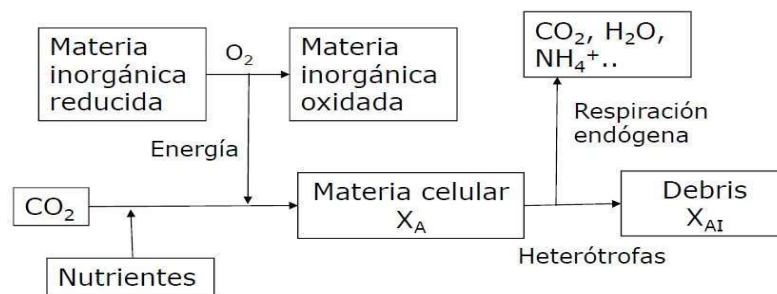
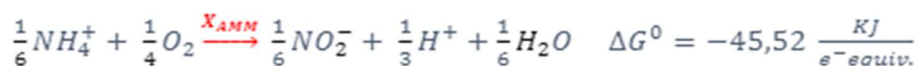
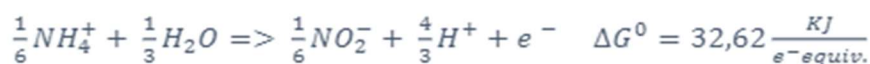


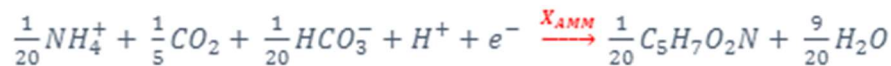
Figura 6. Metabolismo bacteriano autótrofo quimiosintético (Puga,2016)

Las reacciones del metabolismo bacteriano autótrofo que se desarrollan en un reactor aerobio, suponiendo que la composición química de los microorganismos es $\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N}$, son detalladas a continuación (Henze, Van Loosdrecht, Ekama, & Brdjanovic, 2011):

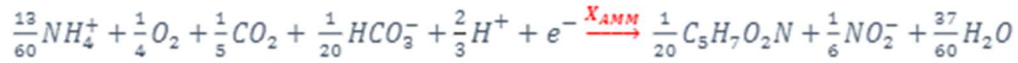
- **Reacción de oxidación autótrofa - catabolismo (Bacterias AMM)**



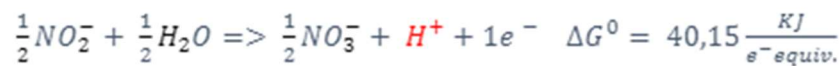
- **Reacción de síntesis celular - anabolismo (Bacterias AMM)**



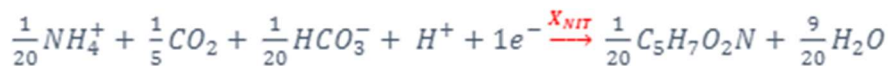
- **Reacción global del metabolismo de las bacterias AMM (Catabolismo + Anabolismo)**



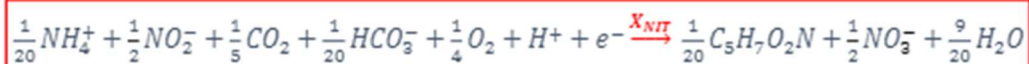
- **Reacción de oxidación autótrofa - catabolismo (Bacterias NIT)**



- **Reacción de síntesis celular - anabolismo (Bacterias NIT)**



- **Reacción global del metabolismo de las bacterias NIT (Catabolismo + Anabolismo)**



En la **figura 7** se puede observar que con temperaturas entre 15 - 22°C la velocidad de crecimiento de las bacterias nitratooxidantes es significativamente mayor que la de las bacterias amoniooxidantes

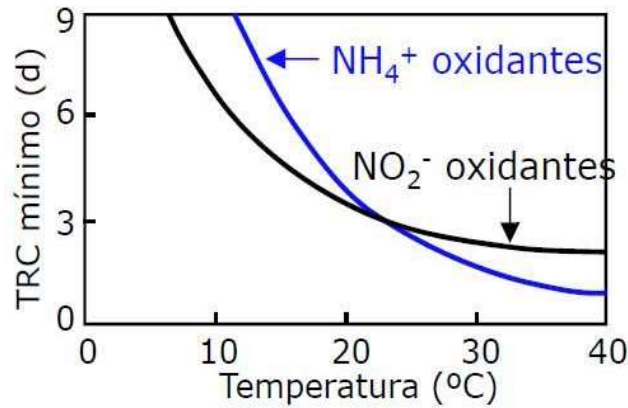


Figura 7. Efecto de la temperatura en el TRC y la velocidad de crecimiento de las bacterias autótrofas (Puga, 2016)

b. Factores que influyen en la nitrificación

Las bacterias autótrofas son muy sensibles a las condiciones en la que se encuentra el sistema, por lo que su tasa de crecimiento puede verse afectada. A continuación, los principales factores de los que depende la nitrificación (Avendaño, 2011).

- ✓ Temperatura
 - ✓ Oxígeno disuelto
 - ✓ pH y alcalinidad
- **Temperatura:**
La velocidad de crecimiento aumenta al incrementar la temperatura. En la **tabla 5** podemos fijarnos que en el rango de temperaturas entre 28-32 °C, la velocidad es óptima. A continuación, en la **tabla 5** se detalla el efecto de la temperatura sobre la nitrificación. El efecto de la reducción de temperatura en el sistema puede ser minimizado con el incremento del tiempo de retención celular (TRC).

Tabla 5. Temperatura requerida para la Nitrificación (Gerardi, 2002)

Temperatura	Efecto sobre la nitrificación
> 45 °C	La nitrificación se detiene
28 – 32 °C	Rango de temperatura óptimo
16 °C	Aproximadamente el 50% de la velocidad óptima
10 °C	Reducción significativa de la velocidad de nitrificación.
	20% de la velocidad óptima
< 5 °C	La nitrificación se detiene

• **Oxígeno disuelto:**

Los factores responsables de la limitada cantidad de OD para la nitrificación son la falta de difusión de oxígeno a través de los flóculos y la competencia por el oxígeno por parte de otros organismos aerobios (Gerardi, 2002).

De acuerdo con la **Figura 8**, se puede observar que la concentración de oxígeno disuelto no influye tanto como la temperatura en la velocidad de crecimiento de las bacterias autótrofas.

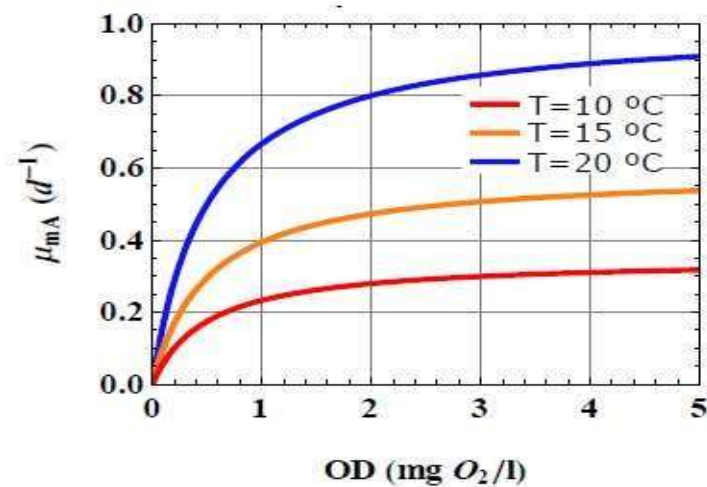


Figura 8. Evolución del crecimiento de bacterias autótrofas en función del OD y la Temperatura (Asensi, 2015)

- **pH y alcalinidad:**

Como ya hemos visto, en el proceso de nitrificación da lugar a iones nitrato y liberación de iones de hidrógeno, provocando una acidificación en el reactor de fangos activados. El consumo del dióxido de carbono como fuente de carbono inorgánico generará una reducción en la alcalinidad del sistema, por lo que es necesario mantener una cantidad suficiente de alcalinidad en el sistema para contrarrestar la reducción del pH y garantizar la disponibilidad de carbono para las bacterias autótrofas (Puga, 2016).

Por 1 mg de $N-NH_4^+$ /l oxidado a nitratos se consume 7,14 mg $CaCO_3$ /l, además según la **Figura 9**, para poder mantener la velocidad de crecimiento de las bacterias autótrofas se debe mantener el pH entre 7,2 y 8,5 (Puga, 2016)

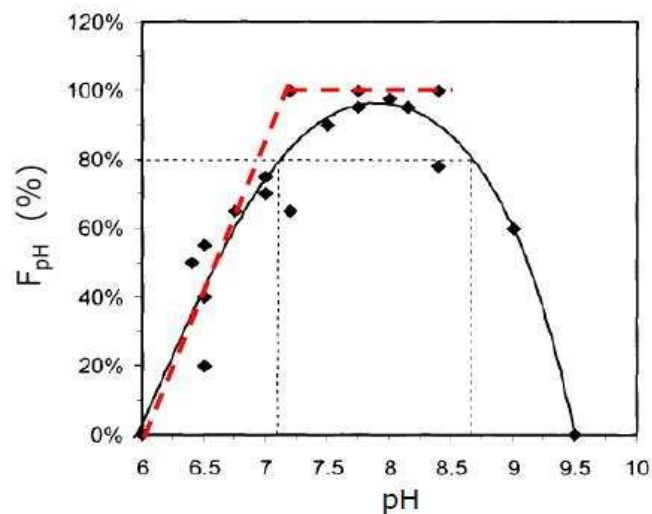


Figura 9. Factor de corrección en función del pH (Asensi, 2015)

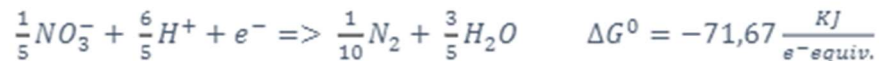
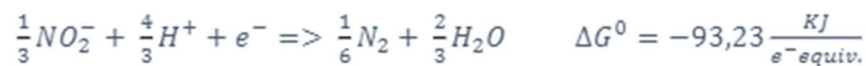
En el gráfico anterior, se muestra el factor de corrección para la velocidad de crecimiento en función del pH.

- **Desnitrificación biológica.**

La desnitrificación es el proceso de transformación del nitrato al nitrógeno molecular. La mayoría de las bacterias desnitrificantes son heterótrofas facultativas, es decir, usan como dador de electrones la materia orgánica y como aceptor de electrones, nitrito o nitrato en caso de ausencia de oxígeno, es decir, en condiciones anóxicas.

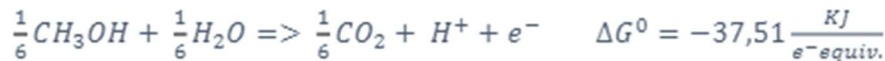
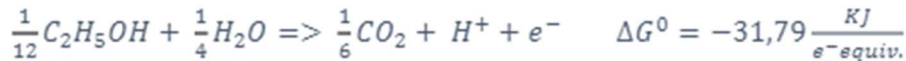
La energía obtenida en el catabolismo y requerida para la síntesis celular, se obtiene de las semirreacciones de reducción (Henze, Van Loosdrecht, Ekama, & Brdjanovic, 2011).

Semirreacciones de reducción:



Las fuentes de carbono orgánico utilizadas como sustrato para el proceso de desnitrificación de aguas residuales incluyen compuestos orgánicos presentes en las aguas residuales urbanas e industriales, o compuestos adicionados durante la etapa anóxica como metanol (CH₃OH), etanol (C₂H₅OH) y ácido acético (CH₃-COOH), entre otros (Lloret, 2014).

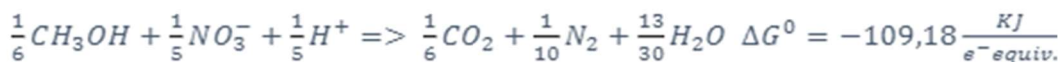
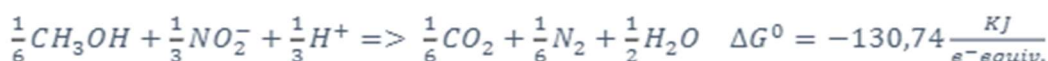
Las semirreacciones de oxidación de materia orgánica más utilizadas son:

Metanol:

Etanol:

Ácido Acético:


La selección de la fuente de carbono orgánico dependerá principalmente de la disponibilidad local y el coste económico (Lloret, 2014).

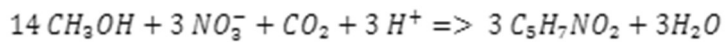
En el proceso de desnitrificación se usa como fuente de carbono la materia orgánica, no obstante, en ausencia se usará metanol por su bajo coste, elevado contenido de carbono y mayor generación de energía.

Si tenemos el metanol como fuente de materia orgánica (dador de electrones) y los nitritos y nitratos como aceptores de electrones, obtenemos las reacciones de catabolismo (Henze, Van Loosdrecht, Ekama, & Brdjanovic, 2011). Las reacciones que se obtienen se muestran a continuación:

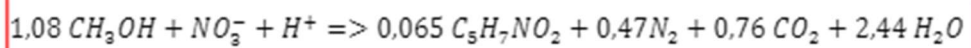
Reacciones de oxidación (Catabolismo):


Las siguientes ecuaciones en color negrita, son la reacción de síntesis empírica, para describir la reacción global de eliminación propuesta por Mc Carty es (Seco & Ferrer, 2012):

Reacción de síntesis (Anabolismo):



Reacción Global (Catabolismo + Anabolismo):



1.5.2 Eliminación de fósforo.

El fósforo usualmente se elimina mediante la adición de sales de hierro o de aluminio como cloruro férrico, no obstante, la eliminación biológica puede llegar a ser más efectiva reduciendo el coste de los aditivos.

- **Eliminación biológica de fósforo (EBP).**

El almacenamiento de fósforo intracelular en forma de gránulos de polifosfatos se da en las bacterias acumuladoras de polifosfatos (PAO).

Se necesita alternar las condiciones de trabajo del fango entre condiciones anaerobias y aerobias o anóxicas, además, necesitamos tener en el agua residual la presencia de ácidos grasos volátiles.

Avances en investigación han observado que dentro de la bacteria PAO existe un elemento que es el glucógeno que se usa como aporte energético y poder reductor. Así mismo, el polifosfato no está solo formado por fósforo sino que también por magnesio y potasio cuya función es para mantener la electroneutralidad del polifosfato. La ecuación del polifosfato es la siguiente: $(Mg_{0.33}K_{0.33}PO_3)_n$. A continuación, se explica el metabolismo avanzado de las bacterias PAO.

En condiciones anaerobias, el ácido acético se introduce dentro de la bacteria y posteriormente se sintetiza a acetil coenzima A (acetil-Co-A), este proceso requiere de energía que se obtiene de la polifosfato, como resultado se produce una suelta al medio el ion fosfato, potasio y magnesio (PO_4^{3-} , K^+ , Mg^{2+}). Posteriormente el acetil coenzima A es reducido a polihidroxialcanoato (PHA), este proceso necesita electrones que se obtienen a partir del glucógeno ($C_6H_{10}O_5$).

En condiciones aerobias o anóxicas, el PHA se oxida con oxígeno o nitrito o nitrato principalmente para crecer, parte del PHA se oxida para generar la energía necesaria para coger los iones de fosfato, potasio y magnesio introducirlos dentro de la bacteria y generar más polifosfato. Parte del PHA se usa también para regenerar las reservas del glucógeno de la bacteria.

La muerte celular la materia orgánica de la célula se transforma en materia orgánica lentamente biodegradable (MOLB) y en materia orgánica no biodegradable (Debris). El polifosfato se libera en iones fosfato, potasio y magnesio, el glucógeno se libera en forma de ácido acético de igual forma el PHA se libera en ácido acético.

En las condiciones anaerobias es fundamental evitar la presencia de nitratos y oxígeno (aceptores de electrones) debido a que las bacterias heterótrofas no acumuladoras de polifosfatos tomarían del medio los ácidos grasos volátiles disponibles para las bacterias PAO con lo cual afectaría su desarrollo.

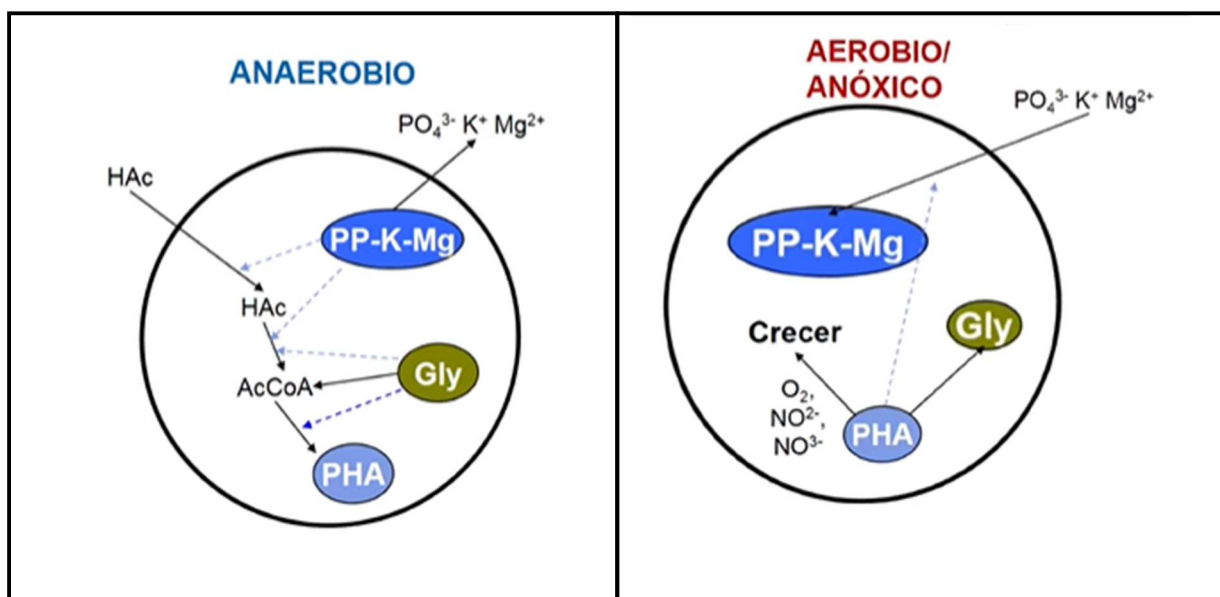


Figura 10. Esquema del metabolismo de las bacterias acumuladoras de fósforo (PAO) (UPV)

En la **Figura 11** se observa mediante un gráfico lo comentado anteriormente en las dos condiciones de trabajo, tanto anaerobia como aerobia.

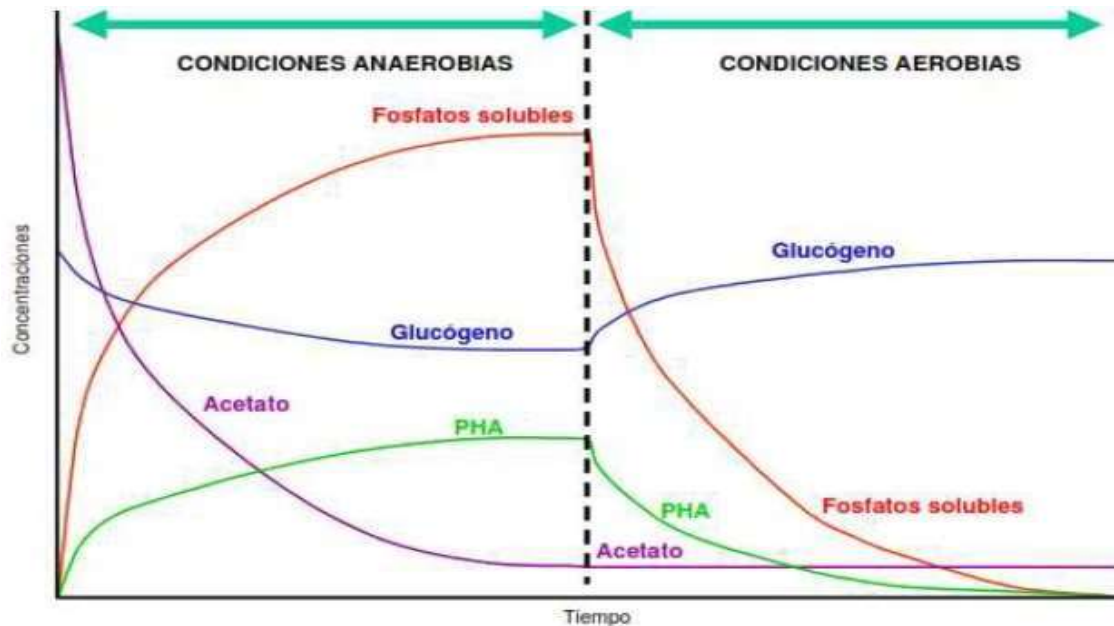


Figura 11. Evolución de componentes en el metabolismo interno y externo de las bacterias PAO (Martí, 2014)

- **Precipitación química del fósforo.**

El fósforo se puede eliminar mediante su precipitación química, esto se logra con la adición de reactivos como son el Policloruro de Aluminio, Sulfato Férrico, Cloruro Férrico y Sulfato de Aluminio. En las aguas residuales el fósforo está en forma de ortofosfatos, al reaccionar con el ion hierro (Fe^{3+}) da lugar a un precipitado de baja solubilidad en agua.

Si añadimos el reactivo antes del decantador primario hay que tener cuidado de no pasarse ya que podemos perjudicar el proceso biológico, al crecimiento de las bacterias, no obstante, mejora el rendimiento del decantador primario. Si decidimos añadirlo antes del decantador secundario las bacterias tienden a flocular, luego, no necesito floculador-coagulador en un tanque, pero, como desventaja se necesita un reactor biológico más grande. Si añadimos en el tratamiento terciario como ventaja no afectaremos al tratamiento biológico, pero, como inconveniente necesitaremos incluir un tanque de floculación y decantación posterior, ver **Figura 12**. La precipitación genera mayor cantidad de fangos, sin embargo, es fácil de aplicar y se consigue un elevado rendimiento de forma estable.

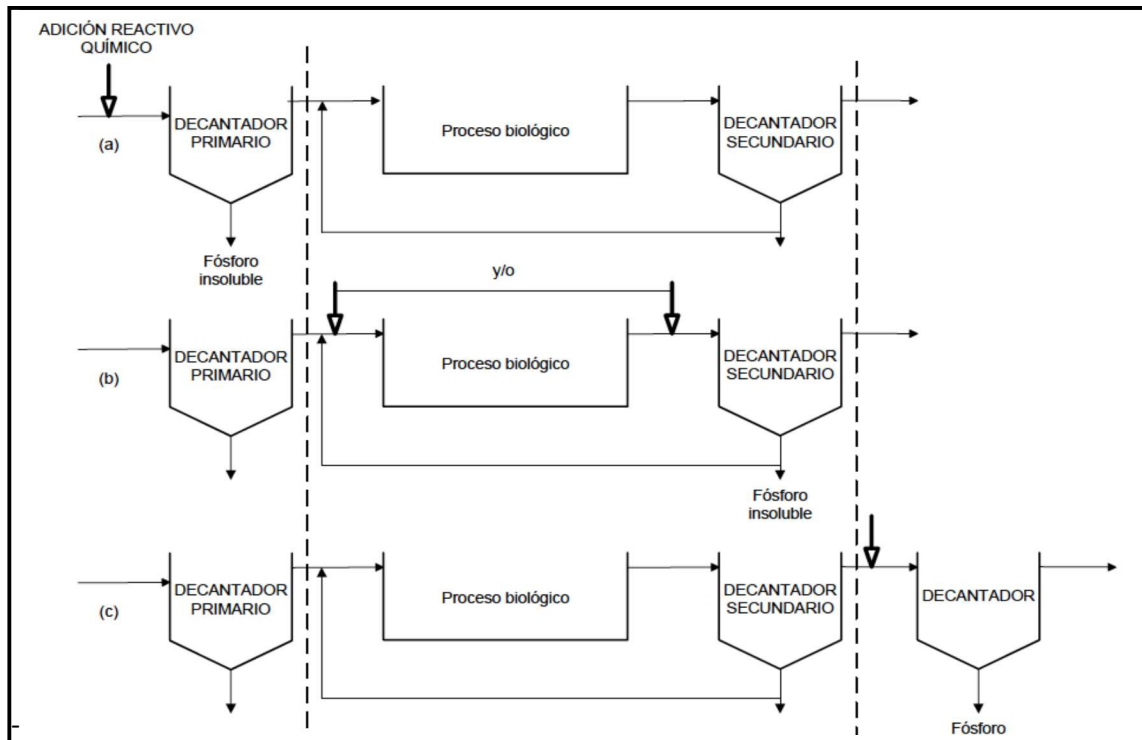


Figura 12. Posibles puntos de alimentación de reactivos para la eliminación química de fósforo. (a) Previo a la decantación primaria. (b) Previo o posterior al tratamiento secundario. (c) Posterior al decantador secundario (Metcalf & Eddy, 1995).

Cuanto más bajo el coeficiente de solubilidad (K_{ps}), significa que la sustancia es la más insoluble. El producto de solubilidad de los precipitados de fósforo se enumera en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Constantes de productos de solubilidad para precipitación de fosfatos (P. Sincero & A. Sincero, 2003)

Precipitation Product	Solubility Product, K_{sp} at 25°C
$Ca_5(PO_3)_3(OH)_{(s)}$	$(10^{-55.9})$
$Ca_3(PO_4)_2$	(10^{-25})
$AlPO_4_{(s)}$	(10^{-21})
$FePO_4$	$(10^{-21.9})$

Las sales de hierro como el cloruro férrico reaccionan con los ortofosfatos y con la alcalinidad del agua (bicarbonatos), tal como se detalla en las siguientes reacciones:



1.5.3 Procesos de eliminación de nutrientes.

Para la eliminación de nitrógeno es necesario combinar al menos dos etapas, siguiendo el orden: anóxica – aerobia. Para la eliminación del fósforo es necesario combinar al menos dos etapas, siguiendo el orden: anaerobia–aerobia. En procesos de eliminación conjunta de ambos se requiere al menos tres etapas, siguiendo el orden: anaerobia – anóxica – aerobia.

- **Procesos de eliminación de nitrógeno.**

Para la eliminación del nitrógeno podemos tener una idea de empezar con un reactor aerobio donde se dé lugar la nitrificación para posteriormente proceder a un reactor anóxico provocando la desnitrificación (Esquema Wurhmann, ver **figura 13**), no obstante, en este procedimiento necesitaremos aportar materia orgánica en el reactor anóxico, ya que las bacterias desnitrificantes son las bacterias heterótrofas facultativas y la materia orgánica se consumiría en el reactor anóxico. Lo más frecuente es empezar con un reactor anóxico y recircular los nitratos del reactor aerobio, así logramos desnitrificar y eliminar materia orgánica del agua residual.

Los procesos de tratamiento que podemos encontrarnos son: Con zona anóxica separada como se muestra, ver **Figura 13** y Sin zona anóxica separada mostrado, no obstante, nos centraremos solo en la zona anóxica separada.

Esquemas con Zona Anóxica Separada

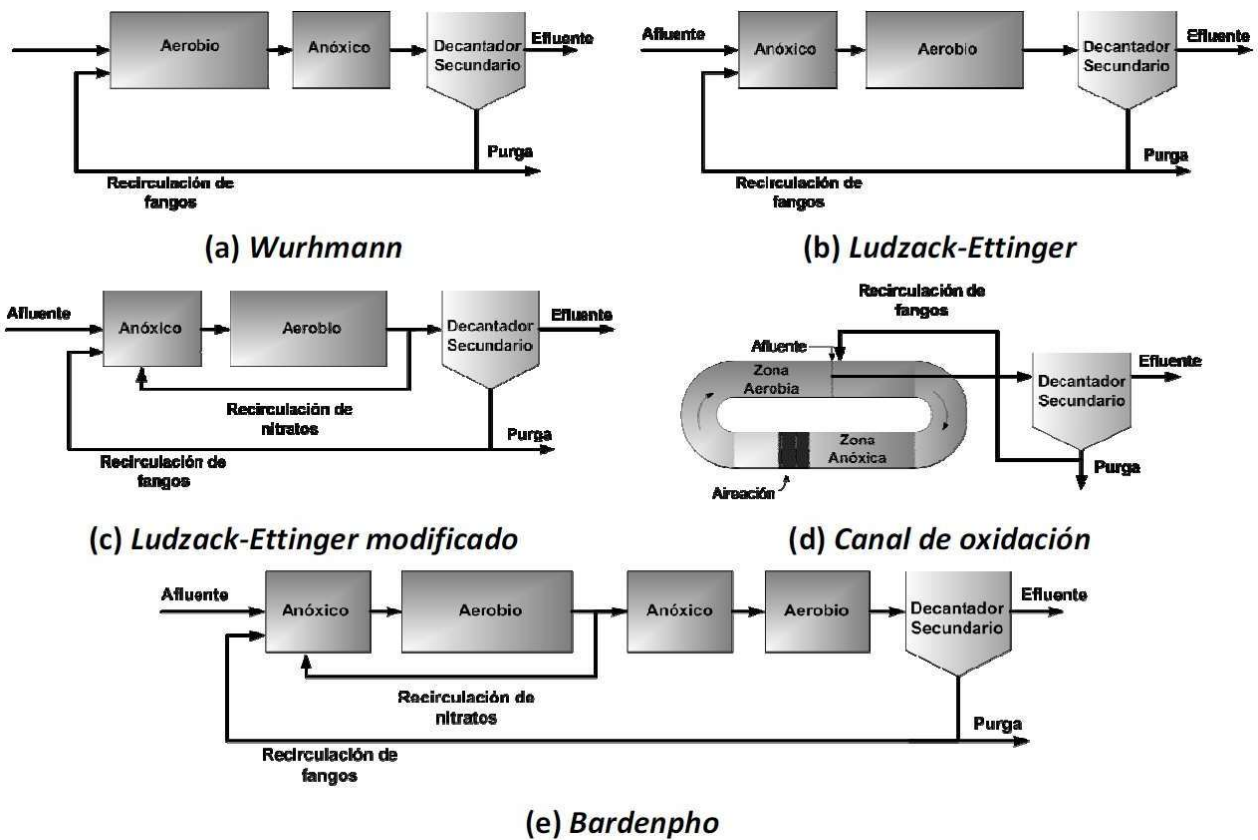


Figura 13. Esquemas de eliminación biológica de nitrógeno con zona anóxica separada (Jiménez, 2010)

- **Esquema Wurhmann (a).**

En este procedimiento existe un gran inconveniente y es que necesitaremos aportar materia orgánica en el reactor anóxico, ya que las bacterias desnitrificantes son las bacterias heterótrofas facultativas, luego, no es muy recomendable usar este método.

- **Esquema Ludzack-Ettinger (b) y Ludzack-Ettinger modificado (c).**

El esquema de Ludzack-Ettinger modificado es uno de los procesos que usaremos en este proyecto para eliminar el nitrógeno, se diferencia del primero en la recirculación de nitratos del reactor aerobio al reactor anóxico, de esta manera se logra una mayor desnitrificación.

- **Canal de oxidación (d).**

Los canales de oxidación más frecuentes suelen ser de un reactor único o con varios canales que tienen una forma ovalada. Generalmente son sistemas de mezcla completa. En este proceso el agua circula atravesando dos fases o zonas, una zona aerobia donde se produce la nitrificación y la zona anóxica donde se da lugar la desnitrificación.

- **Esquema Bardenpho (e).**

Esquema muy parecido al de Ludzack-Ettinger modificado, pero, adicionando un reactor anóxico después del aerobio para desnitrificar, no obstante, en este caso la materia orgánica proviene de la respiración endógena y un reactor aerobio después del anóxico para eliminar el nitrógeno molecular generado por el proceso de desnitrificación.

- **Esquema de eliminación de fósforo.**

En la **figura 14** se muestra el esquema A/O utilizado en la eliminación biológica de fósforo (EBP), se requiere de una alternancia de condiciones anaerobia y aerobia. Tal y como hemos explicado, en la etapa anaerobia habrá una liberación al medio de fósforo y en la etapa aerobia una captura de fósforo por las bacterias PAO. Hay que tener cuidado ya que la recirculación de fangos con presencia de nitratos, generados en el reactor aerobio, provocan una reducción en la eliminación de fósforo por presencia de bacterias heterótrofas facultativas en el reactor anaerobio que consumirían el ácido acético usando como aceptor de electrones el nitrato.



Figura 14. Esquema de Eliminación Biológica de Fósforo A/O (Puga, 2016)

• **Esquemas de eliminación conjunta de nitrógeno y fósforo.**

En este apartado comentaremos los esquemas desarrollados para conseguir una alta eficacia en la eliminación de ambos nutrientes (N y P). En la **figura 15** se muestran los esquemas más utilizados son: A²/O, UCT, Johannesbourg (JHB) y Phoredox.

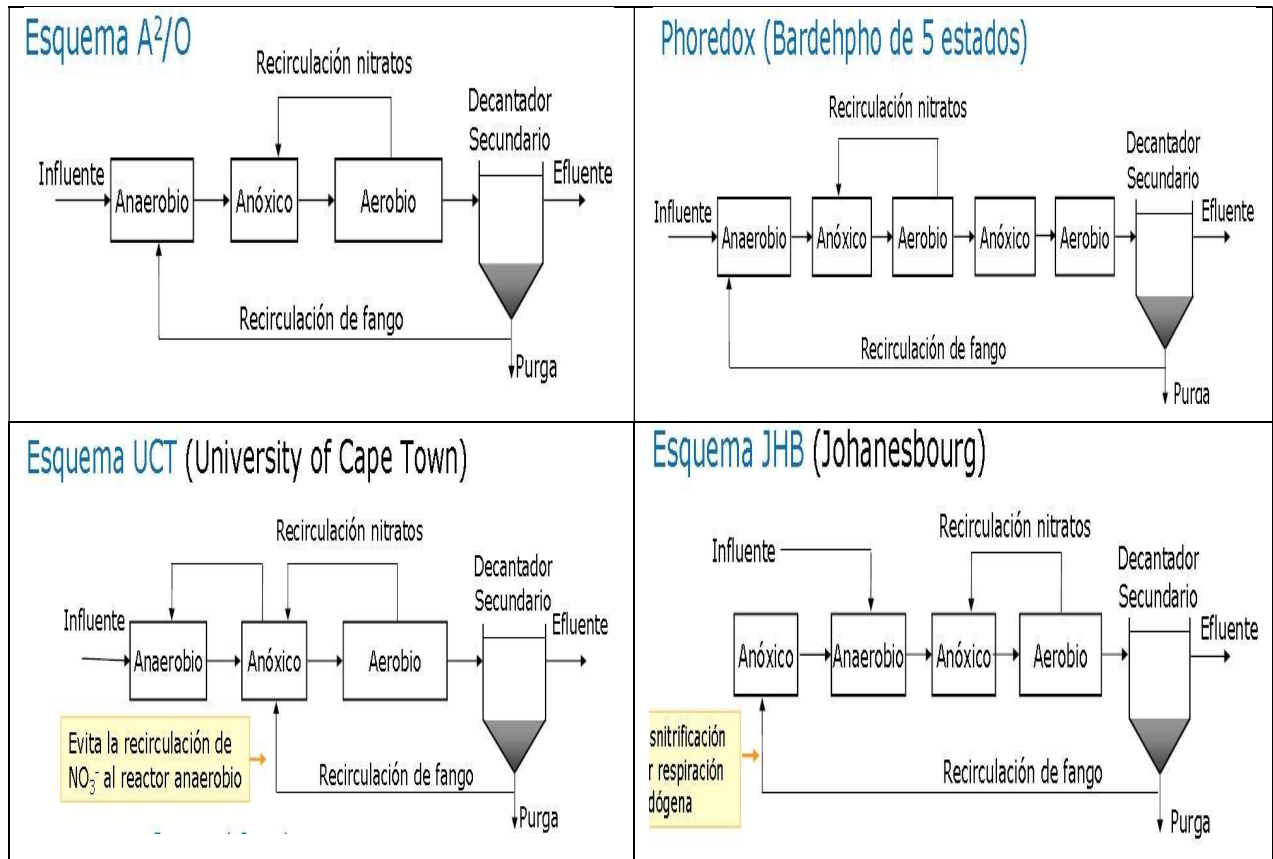


Figura 15. Esquemas de eliminación conjunta de nutrientes N y P (Puga, 2016)

• **Esquema A²/O.**

El esquema A²/O es uno de los procesos que usaremos en este proyecto para eliminar biológicamente el fósforo.

El proceso consiste en lo siguiente: Una etapa anaerobia seguida de una etapa anóxica y luego una etapa aerobia. Las bacterias PAO se desarrollan en la etapa anaerobia y en la etapa aerobia capturan el ion fosfato. El fósforo es eliminado del sistema con la purga de microorganismos que lo contienen. Como ya sabemos en la etapa anóxica se produce la desnitrificación debido a la recirculación interna de nitrato desde el reactor aerobio. La recirculación de fangos desde el decantador secundario ingresa a la etapa anaerobia teniendo en cuenta que lleva una menor concentración de nitratos.

- **Esquema UCT.**

El esquema UCT (University of Cape Town) tiene el mismo principio de una etapa anaerobia seguida de una etapa anóxica y una etapa aerobia, pero en este caso el reactor anóxico recibe corrientes de la recirculación de fangos y de la recirculación interna de nitratos que provienen del reactor aerobio. Esta propuesta se desarrolló con la finalidad de evitar la presencia de nitratos en la recirculación de fangos al reactor anaerobio. La desventaja de este esquema se aprecia en el coste de energía requerida para el bombeo de la recirculación interna del licor mezcla desde la salida del reactor anóxico (exento de nitratos) hasta el reactor anaerobio (Puga, 2016).

- **Esquema Johannesbourg (JHB).**

El esquema JHB es una modificación del esquema A²/O, con la diferencia que en este esquema se adiciona un reactor anóxico que recibe la corriente de fangos recirculados para lograr desnitrificación por respiración endógena. Esta corriente desnitrificada exenta de nitratos ingresa finalmente al reactor anaerobio que se mezcla con el influente (Puga, 2016).

- **Esquema Phoredox.**

El esquema Phoredox es una modificación del esquema A²/O donde se incluye un reactor anóxico adicional a la salida del reactor aerobio para desnitrificar los nitratos presentes en el licor mezcla y es seguido de un reactor aerobio para eliminar las burbujas de gas nitrógeno y evitar problemas de flotación de fangos en el decantador secundario (Puga, 2016).

1.6 Marco Legislativo.

El incremento de la demanda hídrica y la escasez del recurso han obligado a ver la manera de mejorar la calidad del cuerpo receptor para su reutilización y optimizar el consumo de agua.

La Unión Europea aprobó la Directiva 91/271/CEE, del Consejo del 21 de mayo, donde establece las medidas necesarias que los Estados miembros han de adoptar para garantizar que las aguas residuales urbanas reciban un tratamiento adecuado antes de su vertido.

En España, el Real Decreto-Ley 11/1995, del 28 de diciembre, establece las Normas Aplicables al Tratamiento de las Aguas Residuales Urbanas donde incorpora al ordenamiento jurídico interno los preceptos de la Directiva 91/271/CEE, con el fin de proteger la calidad de las aguas continentales y marítimas de los efectos negativos de los vertidos de las aguas residuales urbanas (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, s.f.).

El Real Decreto 509/1996, complementa las normas sobre recogida, depuración y vertido de dichas aguas, y la aplicación de distintos tratamientos antes de su vertido a las aguas continentales o marítimas. En la determinación de estos tratamientos se tiene en cuenta las características del emplazamiento donde se producen. De acuerdo con esto, los tratamientos serán más o menos rigurosos según se efectúen en zonas calificadas como “sensibles”, “menos sensibles” o “normales” y corresponde a las Comunidades Autónomas establecer tal calificación (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, s.f.).

La Directiva 98/15/CE de la Comisión del 27 de febrero de 1998, modifica la Directiva 91/271/CEE en relación con ciertos requisitos que fueron establecidos para los vertidos procedentes de instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas realizados en zonas sensibles propensas a eutrofización (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, s.f.).

Los requisitos que deben cumplir los vertidos procedentes de las estaciones depuradoras de aguas residuales que posean tratamiento secundario o equivalente, deben cumplir los requisitos de vertido detallados en la siguiente tabla, cumpliéndose el valor de la concentración o el porcentaje de reducción. (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, s.f.)

Tabla 7. Requisitos para los vertidos procedentes de instalaciones de Depuración de Aguas Residuales Urbanas mediante tratamiento secundario (Directiva 91/271/CEE).

Parámetros	Concentración	% Mínimo de reducción
Sólidos Suspendidos	35 mg/l	90%
DBO₅	25 mg/l	70-90%
DQO	125 mg/l	75%

Para el caso de vertidos de instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas realizados en zonas sensibles cuyas aguas sean eutróficas o propensas a eutrofización en un futuro próximo, deberán cumplir los siguientes requisitos (Ministerio de Hacienda y Administraciones Públicas, s.f.).

Tabla 8. Requisitos de calidad de vertidos de N y P total (Directiva 91/271/CEE).

Parámetros	Concentración		% Mínimo de reducción
	10.000 – 100.000 h.e.	> 100.000 h.e.	
Fósforo Total	2 mg/l P	1 mg/l P	80%
Nitrógeno Total	15 mg/l N	10 mg/l N	70 – 80%

Nitrógeno Total equivale a la suma de nitrógeno Kjeldahl total (Nitrógeno orgánico y amoniacal), nitrógeno en forma de nitrato y en forma de nitrito.

2 OBJETIVO.

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Máster consiste en analizar las distintas alternativas para conseguir la eliminación de nitrógeno y fósforo en la nueva EDAR de Almoradí seleccionando la alternativa más adecuada.

Este planteamiento se logrará con el desarrollo de los siguientes objetivos específicos:

- ✓ Estudio de caudales y cargas contaminantes que condicionarán la nueva estación depuradora
- ✓ Desarrollo de las alternativas (Eliminación biológica de nitrógeno y fosforo y/o precipitación química) con ayuda de la herramienta de simulación DESASS.
- ✓ Realizar una valoración económica de las alternativas considerando los costes de construcción y operación.
- ✓ Comparar las alternativas y seleccionar la más adecuada.

3 DESCRIPCIÓN DE LA NUEVA EDAR ALMORADÍ.

3.1 Contexto y ubicación Geográfica.

La antigua estación depuradora de agua residual urbana – Almoradí se encuentra ubicada en la provincia de Alicante, municipio Almoradí, junto a la autopista del Mediterráneo (AP-7). La depuradora no tiene la capacidad para tratar las aguas residuales debido al incremento de la población, luego, se han de plantear posibles soluciones para solventar el problema.

Se proponen alternativas consistentes en la ampliación de las depuradoras actualmente existentes, en concreto, de la EDAR Almoradí y la EDAR El Saladar, no obstante, se descarta por la proximidad de dichas instalaciones a suelo urbano residencial y situarse ambas a barlovento de los vientos, por lo que, las afecciones ambientales serán considerables. La segunda propuesta agrupa cinco alternativas que contemplan la construcción de una nueva EDAR o la ampliación de la EDAR Algorfa-Benejúzar existente. Se proponen indicadores para valorar cada una de las cinco alternativas y seleccionar la más adecuada en base a los siguientes criterios: Criterios ambientales, criterios funcionales, criterios sociológicos, criterios de disponibilidad, criterios de financiación y económicos. Las propuestas de alternativas se pueden ver en la **figura 16**. No obstante, se puede observar que en la **figura 16** falta la alternativa 2, esto se debe a que esta es la alternativa seleccionada que ahora se comentará en el apartado siguiente.

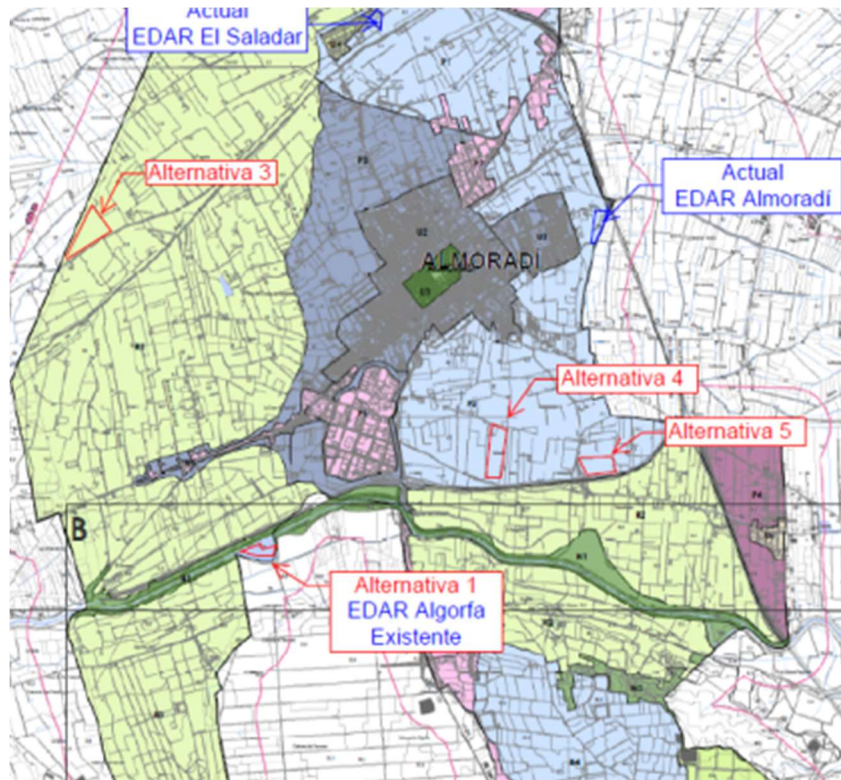


Figura 16. Propuesta de Alternativas para la nueva ubicación de la EDAR Almoradí. (Diari oficial de la Generalitat Valenciana)

Tabla 9. Pesos y valoración de las alternativas propuestas (Diari oficial de la Generalitat Valenciana)

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Peso relativo sobre total
Aspectos ambientales	15	26	23	29	26	30
Aspectos funcionales	7,6	25	13,9	13,5	14,1	25
Aspectos sociológicos	15	12	13	3	3	15
Otros factores	7	12	5	8	8	12
Total	44,6	75	54,9	53,5	51,1	82

Se puede observar que, tras los pesos y las valoraciones en función de los criterios previamente mencionados para cada alternativa, se obtiene, que la alternativa más adecuada es la alternativa 2, consistente en la construcción de una nueva EDAR de Almoradí.

A continuación, en el siguiente apartado comentamos más detalladamente sobre esta alternativa.

3.2 Nueva Ubicación de la Estación Depuradora de Almoradí.

Tras valorar las posibles alternativas el DIE concluye que la opción más adecuada es la alternativa 2. La ubicación propuesta para la nueva EDAR queda localizada al Noreste del término municipal, limitando con el de Dolores, aproximadamente en el punto kilométrico 737 del margen izquierdo de la autopista AP-7 en el extremo Noreste del término municipal, junto a la AP-7. El Estudio de Inundabilidad aporta, en junio de 2017, que, una vez delimitado el ámbito territorial de análisis hidrológico e hidráulico, y considerando los condicionantes y afecciones sectoriales, concreta que la nueva EDAR se encontrará en la parcela 78-a del polígono 1 del catastro de rústica de Almoradí. No obstante, el municipio de Dolores no está a favor de la nueva ubicación de la EDAR.



Figura 17. Ubicación nueva de la EDAR Almoradí (Diari oficial de la Generalitat Valenciana)

3.3 Proyección de la nueva EDAR.

Para la implantación de una nueva y futura estación depuradora se requiere de una proyección de esta. En esta proyección se analizará tres aspectos importantes que son los siguientes: La población para el año horizonte, los caudales y las cargas contaminantes.

3.3.1 Población para el año horizonte.

El año horizonte se fija en 20 años, esto, de acuerdo con el “Pliego de Bases” que rige la redacción del proyecto. Gracias al INE (Instituto Nacional de Estadística) se puede obtener la población entre los años 1995 y 2015, observando que en el año 2015 la población es de unos 19.955 habitantes (**figura 18**). El municipio de Almoradí no presenta estacionalidad, luego, apenas existen variaciones a lo largo del año. Emplearemos la metodología del MOPU (actual Ministerio de Fomento) para la obtención de la población para el año horizonte. En primer lugar, se debe obtener la tasa de crecimiento anual acumulativo, mediante las siguientes expresiones:

$$P_a = P_{a-10} \times (1 + \beta)^{10}$$

Obtendríamos “ β ”, tasa anual de crecimiento acumulativo para 10 años.

$$P_a = P_{a-20} \times (1 + \gamma)^{20}$$

Obtendríamos “ γ ”, tasa anual de crecimiento acumulativo para 20 años.

Donde:

- P_a : Población del año cero (2015).
- P_{a-10} : Población del año 2005.
- P_{a-20} : Población del año 1995.

Mediante la aplicación de la siguiente fórmula se obtiene la población futura:

$$P = P_a \times (1 + \alpha)^t$$

Donde:

- P : Población futura.
- P_a : Población del año cero (2015).

- $\alpha = \frac{(2x\beta+\gamma)}{3}$: Tasa de anual de crecimiento para el año t.

El resultado de $\alpha=0,0202$, luego:

$$P = P_{\alpha} x (1 + \alpha)^t = 19.955 x (1 + 0,0202)^{20} = 29.845$$

Se estima para el año 2035 una población de **29.845 habitantes**.

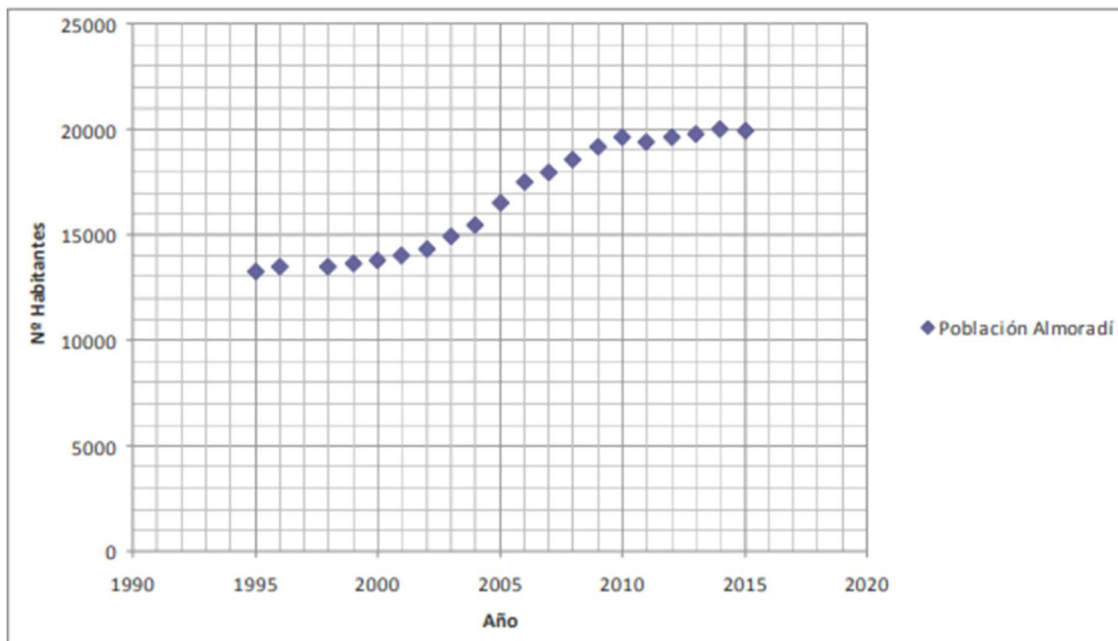


Figura 18. Datos censo población Almoradí (Fuente: INE)

3.3.2 Análisis de caudales y de cargas contaminantes.

Según los datos facilitados por la EPSAR, para la población del año 2015 que es de 19.955 habitantes se obtiene que el caudal de aguas residuales es de **159 l/hab.día**. Si usamos este dato (159 l/hab.día) se estima que para el año 2035 (29.845 habitantes) el caudal medio de aguas residuales será de **4.745 m³/día**.

Tendremos que estimar los caudales esperados en base a la previsión de crecimiento del municipio de Almoradí, en función a la planificación urbanística. Entonces, determinaremos el número de viviendas en suelo urbano y urbanizable, así como la superficie de suelo industrial y terciario a desarrollar.

1. Consumos de suelo Urbano:

En la siguiente tabla se puede observar los datos de consumos de agua potable de Almoradí. Se puede observar como la tendencia es que bajen los consumos con un

incremento ligero de la población.

Tabla 10. Datos de consumos de agua potable de Almoradí (Proyecto de construcción de las obras de la nueva EDAR Almoradí)

Año	2007	2008		2013	2014	2015
Consumo (m ³)	992.085	968.914				
Número habitantes	17.945	18.536		19.788	19.992	19.995
Litros/hab.día	151,47	143,21				

Con los datos obtenidos se establece una dotación media de agua potable de **145 l/hab.día**. En el año 2015, en suelo urbano residencial, existe un total de 9.364 de viviendas, asumiendo un techo máximo para 2030 de 12.573 viviendas.

Respecto al suelo urbanizable residencial, existen tan sólo 20 viviendas, no obstante, pudiendo incrementarse a 2.736 viviendas.

Respecto al suelo urbanizable terciario, se cuenta con 15 viviendas, siendo la máxima previsión de 242 viviendas.

Lo anterior se ve reflejado en la siguiente tabla:

Tabla 11. Número de viviendas según planeamiento de Almoradí (Proyecto de construcción de las obras de la nueva EDAR Almoradí)

Tipo Suelo	Nº Viviendas	
	Año 2.015	Año 2.030 (Techo PGOU)
Suelo Urbano	9.364	12.573
Suelo Urbanizable residencial	20	2.736
Suelo Urbanizable terciario	15	242
Total	9.399	15.551

La capacidad máxima de población según el PGOU (Plan General de Ordenación Urbana) de Almoradí se obtiene multiplicando el número de habitantes por vivienda, que es de 2,09 (Plan director de Infraestructuras de Almoradí), dando un total de 32.497 habitantes. Este valor es superior al obtenido de la estimación hecha anteriormente, luego, podemos tomarlo como el número máximo de habitantes para el año horizonte de diseño de la EDAR. Además, usando un factor de retorno del 80% (de 145 l/hab.día) se obtendría una dotación de aguas residuales de **116 l/hab.día**.

2. Consumos de suelo industrial:

El plan General considera una dotación de **1,4 l/m².día** para las zonas industriales. Según el PGOU ha estimado en 1% el crecimiento del suelo industrial para los próximos 20 años. En la tabla siguiente se presentan los valores previstos para el año horizonte.

Tabla 12. Previsión de superficie de suelo industrial a desarrollar en Almoradí (el punto es separador decimal)(Proyecto de construcción de las obras de la nueva EDAR Almoradí)

NOMBRE LOTUP	SECTOR	SUPERFICIE TOTAL (m ²)	% CONS. ACTUAL	PREVISIÓN 2035 SUPERFICIE (m ²)	% CONS.
ZUR-IN	SUI-LAS MAROMAS	458,001.25	71.11%	417,284.94	91.11%
ZND-IN	SUZ-I1	169,283.57	0.00%	33,856.71	20.00%
ZRC-RS-IN	SUZ-I1	160,053.10	0.00%	32,010.62	20.00%
	TOTAL	787,337.92		483,152.27	

3. Consumos de suelo terciario:

De igual forma se tiene en cuenta un crecimiento del 1% y dotación de 1,4 l/m².día. Lo siguiente se representa en la siguiente tabla:

Tabla 13. Previsión de superficie de suelo terciario a desarrollar en Almoradí (el punto es el separador decimal) (Proyecto de construcción de las obras de la nueva EDAR Almoradí)

NOMBRE LOTUP	SECTOR	SUPERFICIE TOTAL (m ²)	% CONS. ACTUAL	PREVISIÓN 2035	% CONS.
ZUR-TR	URBANO TERCIARIO	623,755.69	73.65%	584,147.20	93.65%
ZND-TR	URBANIZABLE TERCIARIO	853,015.88	0.18%	172,138.60	20.18%
ZND-TR-1	SUZTRBE-1 SUZPT-1	447,274.04			
ZND-TR-2	SUZT-1 (SIN ZONA INUNDABLE)	205,993.31			
ZND-TR-3	SUZT-SAUT-1	138,727.79			
ZND-TR-4	SUZT-SAUT-2	61,020.74			
	TOTAL	1,476,771.57		756,285.81	

La estimación total de agua residual media para el año horizonte será de:

Consumo de suelo urbano: 145 l/hab.día x 0,8 x 29.845 3462 m³/día

Consumo de suelo industrial: 1,4 l/m².día x 0,8 x 483.152,27... 541,1 m³/día

Consumo de suelo terciario: 1,4 l/m².día x 0,8 x 756.285,81847 m³/día

4850,1 m³/día

Consideraremos oportuno redondear dicho valor para el año horizonte a **5000 m³/día**.

$$Q_m = 5000 \text{ m}^3/\text{día}$$

Ahora toca analizar el caudal máximo:

Para obtener el caudal máximo se aplica al caudal medio un coeficiente punta (FP):

$$Q_{\text{máx}} = CP \times Q_m$$

Como se dispone de lecturas horarias de los caudales de entrada a la EDAR del casco urbano, se ha decidido obtener el coeficiente punta a través de datos reales. La campaña de tomas de analíticas del casco urbano se realizó los días 29 de septiembre, 2 y 3 de octubre del año 2016.

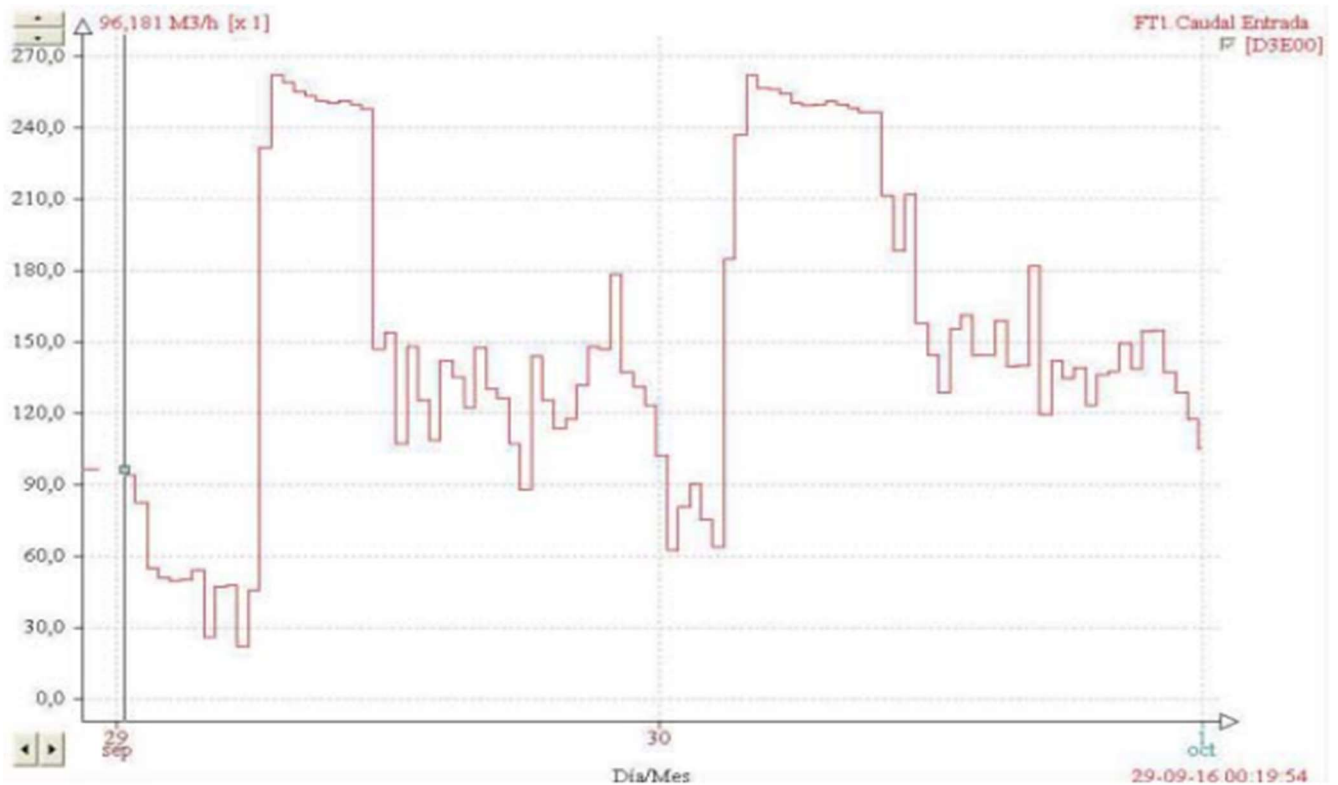


Figura 19. Caudales de entrada a EDAR de casco urbano de días 29 y 30 de septiembre (Proyecto de construcción de las obras de la nueva EDAR Almoradí)



Figura 20. Caudales de entrada a EDAR de casco urbano de día 2 de octubre (Proyecto de construcción de las obras de la nueva EDAR Almoradí)

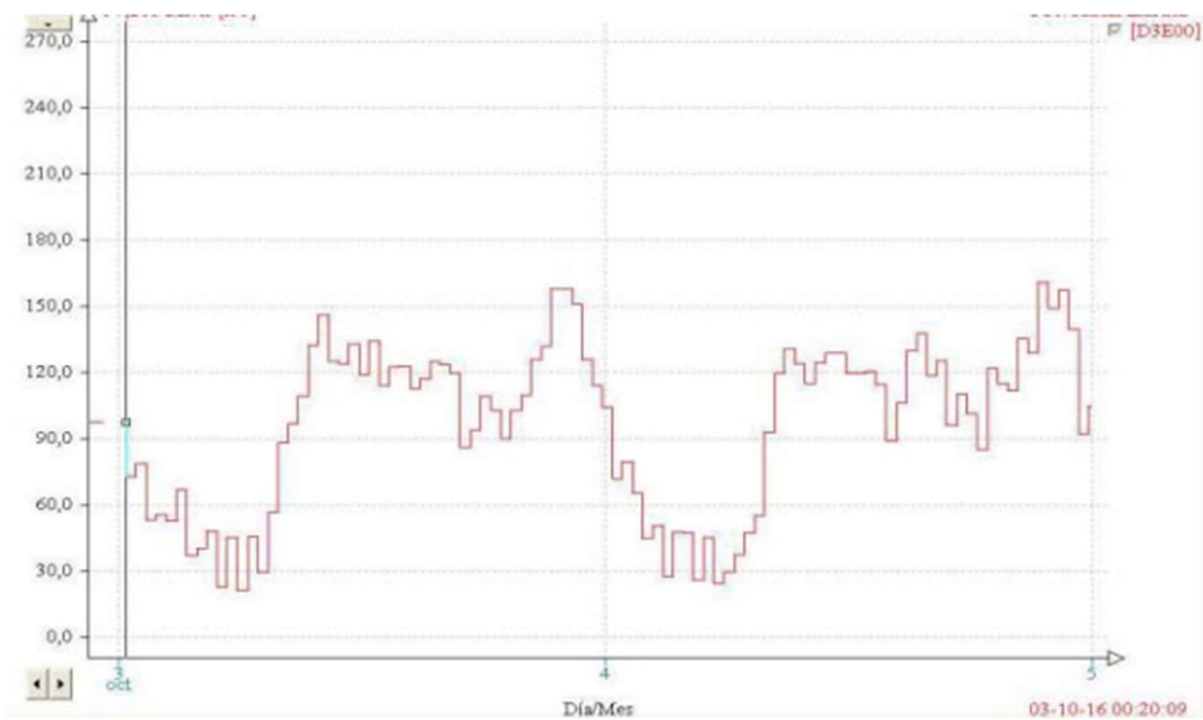


Figura 21. Caudales de entrada a EDAR de casco urbano de días 3 y 4 de octubre (Proyecto de construcción de las obras de la nueva EDAR Almoradí)

Se puede observar que el día 29 de septiembre se obtuvieron valores altos de caudal con poca carga contaminante, no obstante, se ha comprobado que el mismo día se registraron 19,2 l/m² de precipitación diaria, luego, podría darse el caso de una filtración en la red de colectores de agua “limpia”. Entonces, si se desestima el día 29 de septiembre, podríamos adoptar como coeficiente punta (CP) el valor de 1,62.

$$CP=1,62$$

Para determinar las concentraciones de contaminantes para el diseño de la nueva EDAR, se ha contado con los datos de las analíticas por la EPSAR (Entidad Pública de Saneamiento de Aguas Residuales) del influente de la EDAR de Almoradí tomadas a lo largo del año de 2016. Así mismo, se ha realizado un ajuste a una función de distribución normal calculando la probabilidad de no excedencia del 90% obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 14. Concentración de contaminantes de diseño de la nueva EDAR Almoradí (Proyecto de construcción de las obras de la nueva EDAR Almoradí)

SS (mg/l)	460
DBO5 (mg/l)	595
DQO (mg/l)	970
NT (mg/l)	87
PT (mg/l)	11

4 PLANTEAMIENTO DE LAS ALTERNATIVAS.

En este capítulo describiremos las 4 alternativas planteadas. Procedemos a comentar brevemente cada una de las alternativas.

La alternativa 1 está basada en un proceso de fangos activados convencional más digestión aerobia con eliminación biológica de nitrógeno y precipitación química de fósforo. **La alternativa 2** está basada en un proceso de oxidación total con eliminación biológica de nitrógeno y precipitación química de fósforo. **La alternativa 3** está basada en un proceso de oxidación total con eliminación biológica de nitrógeno y fósforo. **La alternativa 4** consiste en una combinación del proceso de oxidación total con un reactor anaerobio de membranas (AnMBR) con eliminación biológica de nitrógeno y precipitación química de fósforo.

El planteamiento de cada una de las propuestas se resume a continuación:

4.1 Alternativa 1: Proceso convencional con eliminación biológica de nitrógeno y precipitación química de fósforo.

La primera alternativa consiste en un proceso de fangos activados convencional más digestión aerobia con eliminación biológica de nitrógeno y precipitación química del fósforo. La línea de aguas estará compuesta por los elementos siguiendo el orden: 1 decantador primario, 1 reactor anóxico, 4 reactor biológico aerobio y 1 decantador secundario. La línea de fangos estará compuesta por 1 digestor aerobio, 1 espesador y 1 deshidratador.

Se recircula una parte de los fangos del decantador secundario al primer tramo de los reactores, es decir, al reactor anóxico, así mismo, se recirculan nitratos del último tramo de los reactores aerobios al reactor anóxico. Mediante un tanque de almacenamiento y unas bombas dosificadoras, en el último tramo de los reactores se dosifica una solución de cloruro férrico para conseguir la precipitación del fósforo.

Las purgas de fango primario y secundario serán enviadas mediante una arqueta de mezcla a los digestores aerobios que posteriormente será enviado al espesador y luego al deshidratador para su estabilización.

El agua de salida del espesador y del deshidratador se vuelve a recircular al principio a través de una arqueta de mezcla.

4.2 Alternativa 2: Proceso de oxidación total con eliminación biológica de nitrógeno y precipitación química de fósforo. Esquema Ludzack-Ettinger modificado.

La alternativa 2 consiste en un proceso de oxidación total en el sistema de fangos activados con eliminación biológica de nitrógeno y precipitación química del fósforo. La línea de aguas estará compuesta por los elementos siguiendo el orden: 1 reactor anóxico, 4 reactores aerobios y 1 decantadores secundario. La línea de fangos estará compuesta de los siguientes elementos: 1 espesador y 1 deshidratador.

Se recircula una parte de los fangos del decantador secundario al primer tramo de los reactores, es decir, al reactor anóxico, así mismo, se recirculan nitratos del último tramo de los reactores aerobios al reactor anóxico. Mediante un tanque de almacenamiento y unas bombas dosificadoras, en el último tramo de los reactores se dosifica una solución de cloruro férrico para conseguir la precipitación del fósforo.

Las purgas de los fangos del secundario serán enviados al espesador y luego al deshidratador para su estabilización.

El agua de salida del espesador y del deshidratador se vuelve a recircular al principio a través de una arqueta de mezcla.

4.3 Alternativa 3: Proceso de oxidación total con eliminación biológica de nitrógeno y eliminación biológica de fósforo. Esquema A²/O.

Esta alternativa consiste en un proceso de oxidación total con eliminación biológica de nitrógeno y fósforo. La línea de aguas estará compuesta los elementos siguiendo el orden: 1 reactor anaerobio, 1 reactor anóxico, 3 reactores aerobios y 1 decantador secundario. La línea de fangos estará compuesta por: 1 espesador y 1 deshidratador.

La finalidad de esta propuesta es prescindir del uso del cloruro férrico aprovechando las ventajas del metabolismo de las bacterias PAOs, ya que estas bacterias se desarrollan en condiciones anaerobias. Al igual que en las alternativas anteriores se recircula una parte de los fangos del decantador secundario al primer tramo de los reactores, es decir, al reactor anaerobio, así mismo, se recirculan nitratos del último tramo de los reactores aerobios al reactor anóxico.

Las purgas de los fangos del secundario serán enviados al espesador y luego al deshidratador para su estabilización.

El agua de salida del espesador y del deshidratador se vuelve a recircular al principio a través de una arqueta de mezcla.

4.4 Alternativa 4: Combinación del proceso de oxidación total con reactor anaerobio de Membranas (AnMBR) y con eliminación biológica de nitrógeno y precipitación química de fósforo.

Esta alternativa consiste en una combinación del proceso de oxidación total con un reactor anaerobio de membranas (AnMBR). La línea de aguas estará dividida en dos partes. Una parte del caudal se tratará mediante un reactor AnMBR y la otra con un proceso de oxidación total con eliminación de nitrógeno y precipitación química de fósforo.

Tal y como se comentó en el apartado de introducción el reactor AnMBR permite obtener un efluente con una muy buena calidad (ideal para reutilización agrícola) y producir biogás a partir del cual se puede obtener energía. El principal inconveniente de este reactor es que no permite la eliminación de nutrientes. Cuando el agua se reutiliza para riego esta característica es una ventaja porque permite reutilizar los nutrientes para riego reduciendo el aporte de fertilizantes. Sin embargo, en aquellas épocas del año en las que no se necesite el agua para riego el efluente del AnMBR se introducirá en el proceso de oxidación total para conseguir la eliminación de nutrientes. Esta posibilidad se considerará en el diseño de la línea de oxidación total.

La purga de ambos procesos (AnMBR y oxidación total) serán conducidas al espesador y posteriormente a la deshidratación de fangos.

5 SIMULACIÓN Y RESULTADO DE LAS ALTERNATIVAS.

En este capítulo realizaremos una breve descripción del software DESASS 7.1, utilizado para simular el comportamiento y funcionamiento de las alternativas planteadas como posibles soluciones a la EDAR de Almoradí.

5.1 Descripción del SOFTWARE DESASS.

El grupo de investigación CALAGUA ha desarrollado el programa Design and Simulation of Activated Sludge Systems (**DESASS**), implementando el modelo Biological Nutrient Removal Model Nº 2 (**BNMR2**) para su uso como herramienta de diseño, simulación y optimización de plantas de tratamiento de aguas (Durán y otros, 2011).

El programa puede calcular el funcionamiento en estado estacionario o simular la evolución del sistema ante una entrada constante o ante variaciones en el caudal o calidad en el agua de entrada. También es posible establecer en condiciones de simulación variaciones temporales de los caudales de recirculación y de purga del fango en los decantadores y espesadores (Ferrer, y otros, 2011).

5.2 Caracterización del agua residual.

Para empezar la simulación usando el software DESASS 7.1 debemos introducir en el programa el caudal medio diario, el caudal punta ($CP \times Q_m$), la temperatura y las concentraciones de los componentes solubles y suspendidos del modelo.

✓ Caudales

El caudal medio diario es conocido, cuyo valor es de $Q_m=5000 \text{ m}^3/\text{día}$. El caudal punta también es conocido, el valor del caudal punta se obtiene multiplicando el coeficiente punta, previamente calculado ($CP=1,62$) por el caudal medio diario.

✓ Temperatura:

La temperatura es también un factor importante para la simulación, ya que una temperatura baja no favorece al crecimiento de las bacterias, en nuestro caso, simularemos en la situación más desfavorable, es decir, en invierno. Para determinar la temperatura del agua, hemos partido de calcular la temperatura mínima en Almoradí y sumarle 3 grados. En la siguiente tabla se muestran las temperaturas en Almoradí durante 12 meses:

Tabla 15. Temperaturas mensuales en Almoradí (el punto es el separador decimal) (Fuente: Ayuntamiento de Almoradí, 2014)

	T (°C)	TM (°C)	Tm (°C)	Ma (°C)	ma (°C)
Enero	10.4	16.4	4.5	27.6	-1.9
Febrero	12.0	18.6	5.5	28.4	-2.3
Marzo	13.8	20.7	6.8	29.3	-1.2
Abril	16.5	23.8	9.2	32.8	1.6
Mayo	20.1	27.4	12.8	38.5	1.1
Junio	23.7	30.8	16.5	41.2	8.9
Julio	26.8	34.0	19.5	43.0	10.2
Agosto	27.0	34.4	19.6	42.1	11.3
Septiembre	24.1	31.5	16.7	40.1	9.4
Octubre	19.6	26.2	13.0	33.9	0.0
Noviembre	13.5	19.4	7.7	28.1	-1.2
Diciembre	11.0	16.8	5.1	27.4	-4.0
Año	18.2	25.0	11.4	-	-

Nos centramos en la primera columna que son las temperaturas medias, dentro de esta columna la temperatura mínima le sumaremos tres grados, luego:

Tabla 16. Temperatura en grados del agua en Almoradí (el punto es el separador decimal) (Fuente: Elaboración propia)

Mes	Temperatura media	Temperatura mínima	Temperatura agua
ENERO	10.4	11	14
FEBRERO	12		
MARZO	13.8		
ABRIL	16.5		
MAYO	20.1		
JUNIO	23.7		
JULIO	26.8		
AGOSTO	27		
SEPTIEMBRE	24.1		
OCTUBRE	19.6		
NOVIEMBRE	13.5		
DICIEMBRE	11		

✓ Componentes solubles y suspendidos del agua residual para el DESASS 7.1

Los componentes solubles y particulados que se utilizan en DESASS corresponden al modelo BNMR2, y hacen un total de 51 componentes, de los cuales 20 son solubles (S) y 31 son particulados (X)

En primer lugar, debemos conocer la terminología que usa DESASS para cada componente. Una vez identificado cada termino debemos saber si disponemos del dato requerido o habrá que estimarlo. La identificación de cada término se puede obtener del manual de DESASS 7.1. Veamos que significa cada término que aparecen en el programa a la hora de introducir los datos tanto para los componentes solubles como para las particuladas o suspendidas, no obstante, solo se introducirá como input los términos subrayados ya que son los necesarios para nuestro trabajo. A medida que analizaremos cada término que se introducirá en el programa como input (término subrayado) se explicará la forma de obtención del mismo.

Los datos que disponemos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 17. Datos para el diseño de la nueva EDAR Almoradí (Proyecto de construcción de las obras de la nueva EDAR Almoradí)

SS (mg/l)	460
DBO5 (mg/l)	595
DQO (mg/l)	970
NT (mg/l)	87
PT (mg/l)	11

En segundo lugar, debemos tener en cuenta las siguientes nociones:

$$DQO = DQO_{SOL} + DQO_{SUSP}$$

$$DBO = DBO_{LIM\ SOL} + DBO_{LIM\ SUSP}$$

$$DQO_{SOL} = DBO_{LIM\ SOL} + MO \text{ (materia orgánica) No biodegradable sol}$$

$$DQO_{SUSP} = DBO_{LIM\ SUSP} + MO \text{ No biodegradable susp}$$

$$SST = SSV \text{ (sólidos suspendidos volátiles)} + SSNV \text{ (sólidos suspendidos no volátiles)}$$

$$NT \text{ (nitrógeno total)} = N_{sol} \text{ (nitrógeno soluble)} + N_{susp} \text{ (nitrógeno suspendido)}$$

$$PT \text{ (fósforo total)} = P_{sol} \text{ (fósforo soluble)} + P_{susp} \text{ (fósforo suspendido)}$$

Una vez explicadas las nociones que hemos de tener en cuenta y fijándonos en la tabla, nos damos cuenta de que no disponemos de todos los datos, los datos que nos faltan son:

- DQO_{SOL}.
- DQO_{SUSP}.
- DBO_{LIM SOL}.
- DBO_{LIM SUSP}.
- NH₄.
- NO₃.
- Norg sol (nitrógeno orgánico soluble).
- Norg susp (nitrógeno orgánico suspendido).
- SSV.
- SSNV.
- PO₄.
- Porg sol (fósforo orgánico soluble).
- Porg susp (fósforo orgánico suspendido).

Para estimar los datos que nos faltan, tomamos como referencia los datos típicos de aguas residuales urbanas. En la siguiente tabla se analizan 22 depuradoras de Valencia de aguas residuales urbanas.

Tabla 18. Valores medios de los parámetros convencionales analizados en 22 depuradoras (Fuente: Javier.E. Sánchez-Ramírez et al, 2017)

Depuradora	N° Datos	Parámetros (mg/l)										
		DQO total	DQO sol	DBO5	DBO5 sol	NT	N-NO3	N-NH4	PT	P-PO4	SST	SSV
D1	6	724,5	149,2	383,0	95,8	54,0	0,0	39,8	8,0	6,0	392,0	282,0
D2	7	1170,0	464,5	777,0	292,2	82,0	<0,8	61,0	13,2	8,6	476,0	362,0
D3	1	551,0	391,2	298,0	216,9	39,1	0,0	30,7	4,2	1,6	110,0	86,0
D4	1	1279,0	639,5	870,0	391,5	104,0	-	-	20,2	9,1	397,0	317,6
D5	3	681,0	539,4	445,0	347,1	8,5	0,0	1,0	3,5	0,3	179,0	112,0
D6	1	827,0	322,5	360,0	-	49,4	0,2	32,3	3,2	0,4	404,0	298,0
D7	1	1275,0	395,3	680,0	299,2	179,0	-	-	25,0	9,8	605,0	453,8
D8	3	290,0	95,7	151,0	58,9	49,5	0,0	32,4	6,9	4,5	115,0	97,0
D9	4	879,6	387,0	467,6	224,4	71,6	0,2	24,7	17,9	11,5	383,6	303,0
D10	1	625,5	356,5	448,0	246,4	77,6	0,2	61,9	7,1	5,1	129,0	111,0
D11	1	722,0	332,1	470,0	202,1	55,0	-	-	5,3	2,5	229,0	176,3
D12	3	539,0	226,4	380,0	163,4	50,0	-	-	5,8	-	200,0	158,0
D13	4	375,0	243,8	262,0	152,0	55,3	-	42,2	6,9	4,0	78,6	70,0
D14	3	759,5	181,5	297,5	75,3	34,2	3,3	19,4	5,7	3,2	309,5	262,5
D15	10	450,3	279,2	292,6	183,5	56,0	-	56,6	7,6	5,4	98,6	72,0
D16	1	257,8	59,0	231,0	97,0	38,7	<0,2	25,7	5,4	3,5	87,1	70,3
D17	1	694,0	388,6	436,0	292,1	83,0	0,0	68,4	27,5	18,7	171,0	152,0
D18	1	377,0	173,4	217,0	132,4	48,6	0,0	41,4	9,6	6,6	136,0	115,0
D19	1	738,0	273,1	500,0	260,0	97,0	0,0	-	14,1	9,2	198,0	158,0
D20	1	361,0	205,8	255,0	114,8	65,0	-	-	8,7	3,5	117,0	101,0
D21	1	422,0	198,3	259,0	121,2	56,0	0,0	40,8	9,9	5,9	143,0	117,0
D22	1	691,0	324,8	585,0	275,0	65,0	-	-	6,8	3,7	230,0	172,0

Analicemos dato por dato de los parámetros que nos faltan:

- ✓ DQO_{SOL} : De la tabla anterior si calculamos la relación entre DQO_{SOL}/DQO obtendremos un porcentaje promedio que podremos usar para calcular la DQO_{SOL} . Los porcentajes suelen estar alrededor del 34-38 %, en algunos casos el 40 %, así que los valores de porcentaje superior al 45% e inferior al 30% quedan descartados. Entonces, obtenemos la siguiente tabla:

Tabla 19. Relación de DQO_{SOL}/DQO (el punto es el separador decimal) (Fuente: Elaboración propia)

DQO sol	DQO	% (DQO sol/DQO)	Promedio
464.5	1170	39.70	37.28
322.5	827	39.00	
395.3	1275	31.00	
95.7	290	33.00	
387	879.6	44.00	
273.1	738	37.01	

Tomamos un 37%.

Luego la DQO_{SOL} será:

$$DQO_{SOL} = 0,37 \times 970 = 358,9 \text{ mg DQO/l}$$

- ✓ DQO_{SUSP} . La DQO_{SUSP} es:

$$DQO_{SUSP} = DQO - DQO_{SOL} = 611,1 \text{ mg DQO/l}$$

- ✓ $DBO_{LIM SOL}$: Para estimar la DBO límite se ha utilizado la relación: $DBO_5/DBO_{LIM} = 0,72$. Además se ha considerado que la $DBO_{LIM SOL}$ suele ser del orden del 40% de la DBO_{LIM} . Luego, tenemos que:

$$DBO_{LIM SOL} = 0,4 \times 595/0,72 = 330,55 \text{ mg DBO/l}$$

- ✓ $DBO_{LIM SUSP}$: La $DBO_{LIM SUSP}$ es:

$$DBO_{LIM SUSP} = DBO_{LIM} - DBO_{LIM SOL} = 495,83 \text{ mg DBO/l}$$

- ✓ NH_4 : De la **tabla 18** si calculamos la relación entre NH_4/NT obtendremos un porcentaje promedio que podremos usar. Cabe destacar que el NH_4 suele ser superior al 60% del nitrógeno total, luego, los porcentajes inferiores se descartan. Entonces, obtenemos lo siguiente:

Tabla 20. Relación de NH₄/NT (el punto es el separador decimal) (Fuente: Elaboración propia)

NH ₄	NT	% (NH ₄ /NT)	Promedio
39.8	54	74	70
61	82	74	
30.7	39.1	79	
32.3	49.4	65	
32.4	49.5	65	
24.7	71.6	34	
61.9	77.6	80	
42.2	55.3	76	
19.4	34.2	57	
25.7	38.7	66	
68.4	83	82	
41.4	48.6	85	
40.8	56	73	

Luego el amonio es el 70% del nitrógeno total.

$$\text{NH}_4 = 0,7 \times 87 = 60,9 \text{ mg N/l}$$

- ✓ NO₃: De la **tabla 18** vemos que los nitratos son nulos en el análisis de aguas residuales urbanas, luego, el nitrato para nosotros será nulo

$$\text{NO}_3 = 0$$

- ✓ Norg sol (nitrógeno orgánico soluble): Si el amonio es del orden del 70% del nitrógeno total, el nitrógeno soluble debe ser superior, luego, asumiremos que es del orden del 80%. Luego, el nitrógeno orgánico soluble se calcula de la siguiente expresión:

$$\text{Norg sol} = \text{N}_{\text{SOL}} - \text{NH}_4 - \text{NO}_3 = 8,7 \text{ mg N/l}$$

- ✓ Norg susp (nitrógeno orgánico suspendido): Asumimos que el nitrógeno suspendido es el nitrógeno orgánico suspendido, luego, de la siguiente expresión obtenemos:

$$\text{Norg susp} = \text{NT} - \text{N}_{\text{SOL}} = 17,4 \text{ mg N/l}$$

- ✓ SSV: De la **tabla 18** si calculamos la relación entre SSV/SST obtendremos un porcentaje promedio que podremos usar. Entonces, obtenemos lo siguiente:

Tabla 21. Relación de SSV/SST (el punto es el separador decimal) (Fuente: Elaboración propia)

SSV	SST	% (SSV/SST)	Promedio
282	392	71.94	79.39
362	476	76.05	
86	110	78.18	
317.6	397	80.00	
112	179	62.57	
298	404	73.76	
453.8	605	75.01	
97	115	84.35	
303	383.6	78.99	
111	129	86.05	
176.3	229	76.99	
158	200	79.00	
70	78.6	89.06	
262.5	309.5	84.81	
72	98.6	73.02	
70.3	87.1	80.71	
152	171	88.89	
115	136	84.56	
158	198	79.80	
101	117	86.32	
117	143	81.82	
172	230	74.78	

Tomamos como valor un 80% ya que es el valor más frecuente, luego:

$$\text{SSV} = 0,8 \times 460 = 368 \text{ mg/l}$$

- ✓ SSNV: Los sólidos suspendido no volátiles se pueden calcular de la siguiente expresión:

$$\text{SSNV} = \text{SST} - \text{SSV} = 92 \text{ mg/l}$$

- ✓ PO₄: De la **tabla 18** si calculamos la relación entre PO₄/PT obtendremos un porcentaje promedio que podremos usar. Cabe destacar que el PO₄ no es nulo en aguas residuales, luego, los valores nulos se descartan. Entonces, obtenemos lo siguiente:

Tabla 22. Relación de PO₄/PT (el punto es el separador decimal) (Fuente: Elaboración propia)

PO ₄	PT	% (PO ₄ /PT)	Promedio %
6	8	75	59
8.6	13.2	65	
1.6	4.2	38	
9.1	20.2	45	
9.8	25	39	
4.5	6.9	65	
11.5	17.9	64	
5.1	7.1	72	
2.5	5.3	47	
4	6.9	58	
3.2	5.7	56	
5.4	7.6	71	
3.5	5.4	65	
18.7	27.5	68	
6.6	9.6	69	
9.2	14.1	65	
3.5	8.7	40	
5.9	9.9	60	
3.7	6.8	54	

Luego, el PO₄ es del orden del 59% del fósforo total:

$$PO_4 = 0,59 \times 11 = 6,49 \text{ mg P/l}$$

- ✓ Porg sol (fósforo orgánico soluble): Si el fosfato es del orden del 59% del fósforo total, el fósforo soluble debe ser superior, luego, asumiremos que es del orden del 70%.

Luego, el fósforo orgánico soluble se calcula de la siguiente expresión:

$$Porg \text{ sol} = P_{SOL} - PO_4 = 1,21 \text{ mg P/l}$$

- ✓ Porg susp (fósforo orgánico suspendido): Asumimos que el fósforo suspendido es el fósforo orgánico suspendido, luego, de la siguiente expresión obtenemos:

$$Porg \text{ susp} = PT - P_{SOL} = 3,3 \text{ mg P/l}$$

La tabla de resultados de los cálculos intermedios se representa en la siguiente tabla (en verde los parámetros que requieren de sus coeficientes estequiométricos correspondientes):

Tabla 23. Resultados de los cálculos intermedios (el punto es el separador decimal) (Fuente: Elaboración propia)

Cálculos intermedios	
DQO sol (mg DQO/l)	358.9
DQO susp (mg DQO/l)	611.1
DBOlim total (mg DBO/l)	826.39
DBOlim sol (mg DBO/l)	330.56
DBOlim susp (mg DBO/l)	495.83
NH ₄ (mg N/l)	60.9
NO ₃ (mg N/l)	0
Norg sol (mg N/l)	8.7
Norg susp (mg N/l)	17.4
SSV (mg/l)	368
SSNV (mg/l)	92
PO ₄ (mg P/l)	6.49
P org sol (mg P/l)	1.21
P org susp (mg P/l)	3.3

✓ **Concentración de los componentes solubles.**

S_A (mg DQO/l): Acetato + Ácido Acético. Es el principal producto de fermentación. Se modela de forma independiente. Los valores de agua residual típica suelen ser de una concentración de **20 mg DQO/l**.

S_{Al} (mg Al/l): Aluminio presente en el medio, empleado como micronutriente y como compuesto presente en proceso de precipitación.

S_{Ca} (mg Ca/l): Calcio presente en el medio, empleado como micronutriente y como compuesto presente en proceso de precipitación.

S_{CH₄} (mg DQO/l): Metano. Principal producto generado en los procesos de digestión anaerobia.

S_F (mg DQO/l): Sustrato orgánico soluble fácilmente biodegradable, fermentable. Se refiere a la fracción de la DQO soluble que está disponible para la degradación por los organismos heterótrofos y se calcula con la expresión:

$$S_F = DQO_{sol} - S_I - S_A$$

S_{Fe} (mg Fe/l): Hierro presente en el medio, empleado como micronutriente y como compuesto

presente en proceso de precipitación.

S_{H_2} (mg DQO/l): Hidrógeno. Subproducto generado en los procesos de digestión anaerobia.

S_{H_2S} (mg S- H_2S /l): Ácido sulfhídrico. Producto de la reducción del sulfato.

S_{Ca} (mg Ca/l): Calcio presente en el medio, empleado como micronutriente y como compuesto presente en proceso de precipitación. Para este valor dejaremos el valor que toma el programa para la opción de aguas residuales urbanas.

S_I (mg DQO/l): Concentración de materia orgánica inerte. La principal característica de este elemento es que no puede ser degradado. Se obtiene a partir de la siguiente expresión.

$$S_I = DQO_{SOL} - DBO_{Lim\ SOL}$$

S_{IC} (mg /l):

S_K (mg K/l): Potasio presente en el medio, empleado como micronutriente y como compuesto para mantener la electroneutralidad de los polifosfatos dentro de las bacterias. Para este valor dejaremos el valor que toma el programa para la opción de aguas residuales urbanas.

S_{Mg} (mg Mg/l): Magnesio presente en el medio, empleado como micronutriente y como compuesto para mantener la electroneutralidad de las polifosfatos dentro de las bacterias. Para este valor dejaremos el valor que toma el programa para la opción de aguas residuales urbanas.

S_{N_2} (mg N- N_2 /l): nitrógeno gaseoso. Se asume que solamente es un producto de la desnitrificación.

S_{NH_4} (mg N- NH_4 /l): Concentración de amonio más nitrógeno amoniacal.

$$NH_4 = 0,7 \times 87 = 60,9 \text{ mg N/l}$$

S_{NO_3} (mg N- NO_3 /l): Concentración de Nitrato, compuesto que se genera de la oxidación de nitrito.

$$NO_3 = 0$$

S_{NO_2} (mg N- NO_2 /l): Concentración de Nitrito, generado a partir de la oxidación del amonio y la reducción del nitrato.

S_{O_2} (mg O_2 /l): Concentración de oxígeno disuelto.

S_{PO_4} (mg P- PO_4 /l): Concentración de fósforo soluble inorgánico (ortofosfatos).

$$PO_4 = 0,59 \times 11 = 6,49 \text{ mg P/l}$$

S_{PRO} (mg DQO/l): Concentración de los productos de la fermentación excluyendo el ácido acético.

S_{SO₄} (mg S-SO₄/l): Sulfato presente en el agua residual, empleado como aceptor de electrones por las bacterias sulfatoreductoras, también se emplea como micronutriente para todo tipo de bacteria.

S_{TH} (mg /l):

S_{ALK} (mg CaCO₃/l): Alcalinidad del agua residual. Para este valor dejaremos el valor que toma el programa para la opción de aguas residuales urbanas.

✓ **Concentración de los componentes particulados.**

X_{ACID} (mg DQO/l): Bacterias acidogénicas. Organismos responsables de la generación de ácidos grasos volátiles por fermentación y de la hidrólisis de la materia orgánica particulada en condiciones anaerobias.

X_{ANA} (mg DQO/l): Bacterias amonioxidantes anaerobias. Bacterias responsables de que el amonio y el nitrito se convierta directamente en gas nitrógeno en condiciones anaerobias.

X_{AMM} (mg DQO/l): Bacterias amonioxidantes. Solo se tendrán en cuenta cuando el usuario decida calcular la nitrificación en un proceso de dos etapas.

X_{AUT} (mg DQO/l): Organismos nitrificantes autótrofos. Este componente incluye tanto las bacterias amonioxidantes como las nitritooxidantes. Solo se tendrán en cuenta cuando el usuario decida calcular la nitrificación en un proceso de una sola etapa.

X_H (mg DQO/l): Organismos heterótrofos.

X_I (mg DQO/l): Concentración de materia orgánica inerte. Para determinarlo se ha utilizado el valor de la DQO y la DBO del afluente y se calcula con la siguiente expresión:

$$X_I = DQO_{Susp} - DBO_{Lím\ Susp}$$

X_{NIT} (mg DQO/l): Bacterias nitritooxidantes. Solo se tendrán en cuenta cuando el usuario decida calcular la nitrificación en un proceso de dos etapas.

X_{NV} (mg /l): Sólidos suspendidos no volátiles.

X_{MAC} (mg DQO/l): Bacterias metanogénicas acetoclásticas. Estos son organismos anaerobios estrictos y son responsables de la conversión del ácido acético en metano.

X_{MH2} (mg DQO/l): Bacterias metanogénicas acetoclásticas. Estos son organismos anaerobios estrictos y son responsables de la conversión del hidrógeno en metano.

X_{PAO} (mg DQO/l): Organismos acumuladores de polifosfatos (PAOs). Se asume que estos organismos representan a todos los organismos acumuladores de polifosfatos.

X_{PHA} (mg DQO/l): Es un producto almacenado intracelularmente en los organismos acumuladores de polifosfatos. Éste incluye poli-hidroxialcanoatos (PHA), glicógeno, etc. Aunque está asociado con X_{PAO} no está incluido en su masa.

X_{PP} (mg DQO/l): Polifosfato. El polifosfato es un producto almacenado intracelularmente en los organismos acumuladores de polifosfatos. Aunque está asociado con X_{PAO} no está incluido en su masa. Forma parte del fósforo particulado.

X_{PRO} (mg DQO/l): Bacterias acetogénicas. Organismos responsables de la transformación en ácido acético de los grasos volátiles que no pueden ser transformados en metano.

X_S (mg DQO/l): Concentración de sustrato orgánico biodegradable particulado y necesita ser hidrolizado antes de su degradación. Se calcula con la siguiente expresión:

$$X_S = DBO_{Lím\ Susp} = DQO_{Susp} - X_I$$

X_{SRB-PRO} (mg DQO/l): Organismos sulfato-reductores, capaces de emplear como sustrato el ácido propiónico.

X_{SRB-AC} (mg DQO/l): Organismos sulfato-reductores, capaces de emplear como sustrato el ácido acético.

X_{SRB-H2} (mg DQO/l): Organismos sulfato-reductores, capaces de emplear como sustrato el hidrógeno.

X_{MEOH} (mg SST/l): Hidróxidos metálicos. Compuesto que se añade al sistema para llevar a cabo la precipitación química del fósforo.

X_{MEP} (mg SST/l): Fosfatos metálicos. Componente resultado de la precipitación química del fósforo.

X_{TSS} (mg SST/l): Concentración de sólidos suspendidos totales. No son un componente del modelo, pero se calcula su concentración a partir de los correspondientes factores estequiométricos.

X_{SSNV} : Concentración de sólidos suspendidos no volátiles, se calcula con la siguiente expresión:

$$X_{SSNV} = X_{TSS} - X_{SSV} = 92 \text{ mg/l}$$

X_{SSV} : Concentración de sólidos suspendidos volátiles. El programa calcula este valor por los correspondientes factores estequiométricos, no obstante, sabemos que:

$$X_{SSV} = X_{TSS} \times (\%SSV) = 368 \text{ mg/l}$$

NOTA: Se asume que la concentración de bacterias en el agua residual es nula.

Luego, para resumir lo anterior y destacar lo más importante tenemos:

$DQO = SF + Sa + SI + XS + XI$
$NT = NH_4 + NO_3 + Norg \text{ sol} + Norg \text{ susp}$
$PT = PO_4 + Porg \text{ sol} + P \text{ org susp}$
$SS = SSV + SSNV$

Figura 22. Relación de los cálculos intermedios y los parámetros de DESASS (Fuente: Elaboración propia)

Además, es necesario realizar una calibración de las constantes estequiométricas del nitrógeno, fósforo (soluble, suspendido y total) y los sólidos suspendidos totales, debido a que el programa tiene por defecto valores típicos de estos en el agua residual urbana. Esto se logra realizando un balance de materia de los componentes involucrados y de una serie de condiciones que se especifica a continuación:

- **Para el Nitrógeno:**

$$N_{SOL} = NH_4 + NO_3 + Norg \text{ sol}$$

$$N_{SUSP} = Norg \text{ susp}$$

$$Norg \text{ sol} = S_F \cdot I_{NSF} + S_I \cdot I_{NSI} = 8,7 \text{ mg N/l}$$

$$Norg \text{ susp} = X_S \cdot I_{NXS} + X_I \cdot I_{NXI} = 17,4 \text{ mg N/l}$$

Se debe tener en cuenta que existe mayor cantidad de nitrógeno en la parte suspendida de la materia orgánica biodegradable que en la soluble. Por lo tanto:

$$I_{NXS} \geq I_{NSF}$$

- **Para el Fósforo:**

$$P_{\text{SOL}} = PO_4 + P_{\text{org sol}}$$

$$P_{\text{SUSP}} = P_{\text{org susp}}$$

$$P_{\text{org sol}} = S_F \cdot I_{\text{PSF}} + S_I \cdot I_{\text{PSI}} = 1,21 \text{ mg P/l}$$

$$P_{\text{org susp}} = X_S \cdot I_{\text{PXS}} + X_I \cdot I_{\text{PXI}} = 3,3 \text{ mg P/l}$$

Al igual que en el caso del nitrógeno, se tiene en consideración que existe mayor cantidad de fósforo en la parte suspendida de la materia orgánica biodegradable que en la soluble. Por lo tanto:

$$I_{\text{PXS}} \geq I_{\text{PSF}}$$

- **Para los sólidos suspendidos volátiles:**

$$SST = SSV + SSNV$$

$$SSV = X_S \cdot I_{\text{SSTXS}} + X_I \cdot I_{\text{SSTXI}} = 368 \text{ mg/l}$$

$$I_{\text{SSTXS}} = I_{\text{SSTXI}}$$

Para calcular los correspondientes factores estequiométricos, procedemos de manera iterativa, es decir, proponemos un valor para un factor y despejamos el otro, teniendo en cuenta que se deben cumplir las condiciones anteriormente escritas. También, se ha de tener en cuenta que estos factores o coeficientes son muy pequeños.

En la **tabla 26** se representa los valores de los coeficientes estequiométricos luego de realizarla calibración.

Tabla 24. Valores de los coeficientes estequiométricos (el punto es el separador decimal) (Fuente: Elaboración propia)

N org Sol	INSF	0.027	P org Sol	IPSF	0.0037
	INSI	0.011113		IPSI	0.00215
N org Susp	iNXS	0.03	P org Susp	iPXS	0.006
	inXI	0.02190573		iPXI	0.00281955
SSV	iSSTXS	0.6			
	iSSTXI	0.61162522			

Con estos coeficientes estequiométricos calculados se obtienen los valores de nitrógeno, fósforo y sólidos suspendidos volátiles.

En la siguiente figura se representan los valores a introducir en el DESASS.

	Soluble (mg/l)			
	Invierno	Verano		
So2	0.01	0.01	mgDQO/l	
Sf	310.55	310.55	mgDQO/l	
Sa	20.00	20.00	mgDQO/l	
Snh4	60.90	60.90	mgN/l	
Sno3			mgN/l	
Sno2			mgN/l	
Spo4	6.49	6.49	mgP/l	
Si	28.34	28.34	mgDQO/l	
Salk	350.00	350.00	mgCaCO3/l	
Sn2	16.24	16.24	mgN/l	
Spro			mgDQO/l	
Sh2			mgDQO/l	
Sch4			mgDQO/l	
Sco2	1.54	1.54	mmol C/l	
Sca	100.00	100.00	mg/l	
Smg	60.00	60.00	mg/l	
Sk	30.00	30.00	mg/l	
Sfe			mg/l	
Sal			mg/l	
Sso4	50.00	50.00	mgS/l	
Shs			mgS/l	

	Suspendida (mg/l)		
	Invierno	Verano	
Xi bm			mgDQO/l
Xio	115.27	115.27	mgDQO/l
Xs	495.83	495.83	mgDQO/l
Xh			mgDQO/l
Xpao			mgDQO/l
Xpp			mgP/l
Xpha			mgDQO/l
Xamm			mgDQO/l
Xamm-r			mgDQO/l
Xnit			mgDQO/l
Xaut			mgDQO/l
Xacid			mgDQO/l
Xpro			mgDQO/l
Xmac			mgDQO/l
Xmh2			mgDQO/l
Xmeoh			mg/l
Xnep			mg/l
Xsrb-h			mgDQO/l
Xsrb-a			mgDQO/l
Xtss	460.00	460.00	mg/l
Xnv	92.00	92.00	mg/l

Figura 23. Resultados de valores a introducir en el DESASS (el punto es el separador decimal).

5.3 Simulación de las alternativas propuestas.

En este apartado analizamos las alternativas propuestas y comentadas en el capítulo 4. La propuesta final de cada alternativa se consigue tras evaluar el efecto de los diferentes parámetros de operación y diseño como son: El volumen de los reactores, el tiempo de retención celular, el caudal de recirculación interna de nitratos, el porcentaje del caudal de recirculación de fangos, la concentración de oxígeno en los reactores aerobios y el consumo necesario de cloruro férrico. A continuación, describiremos el efecto de cada uno de los parámetros anteriores.

El volumen de los reactores aerobios, anóxicos y anaerobios es un parámetro de diseño que mejora la eliminación biológica de nitrógeno y fósforo. Así mismo, si hay que reducir los sólidos suspendidos hay que aumentar el volumen de los reactores. La idea para conseguir el volumen de reactores óptimo es usar un proceso iterativo hasta conseguir el volumen que cumpla los requisitos

deseados.

El tiempo de retención celular (TRC), variará según la alternativa en la que estemos, ya sea convencional o de oxidación total. Si decidimos aumentar el TRC reducimos el % SSVB, es decir, logramos estabilizar más el fango, no obstante, aumentan los sólidos suspendidos (SS). Aumentar el TRC implica aumentar la nitrificación, pero, también purgar menos.

El caudal de recirculación interna aporta nitratos a la zona anóxica. Si decidimos incrementar este parámetro favoreceremos la eliminación del nitrógeno.

Un incremento del porcentaje del caudal de recirculación de fangos favorece la desnitrificación debido a la mayor recirculación de nitratos al sistema.

La disminución de la concentración de oxígeno disuelto en los reactores aerobios favorece la desnitrificación, no obstante, se aumenta la concentración de amonio reduciendo la de nitratos.

El cloruro férrico favorece la precipitación del fósforo, luego, un aumento en la dosificación conlleva una disminución del fósforo, no obstante, hay una mayor producción de fangos. En el programa iremos variando el caudal ($\text{m}^3/\text{día}$) al que se suministra el reactivo. La concentración de cloruro férrico es de 500000 mg/l.

Una vez encontrados los parámetros óptimos de funcionamiento, se mostrarán las condiciones de funcionamiento más importantes de cada elemento de las alternativas propuestas.

Cabe destacar que el punto es el separador decimal.

5.3.1 Resultados alternativa 1: Proceso convencional con eliminación biológica de nitrógeno y precipitación química de fósforo.

En la **figura 24** se representa el esquema de proceso convencional simulado en la herramienta DESASS.

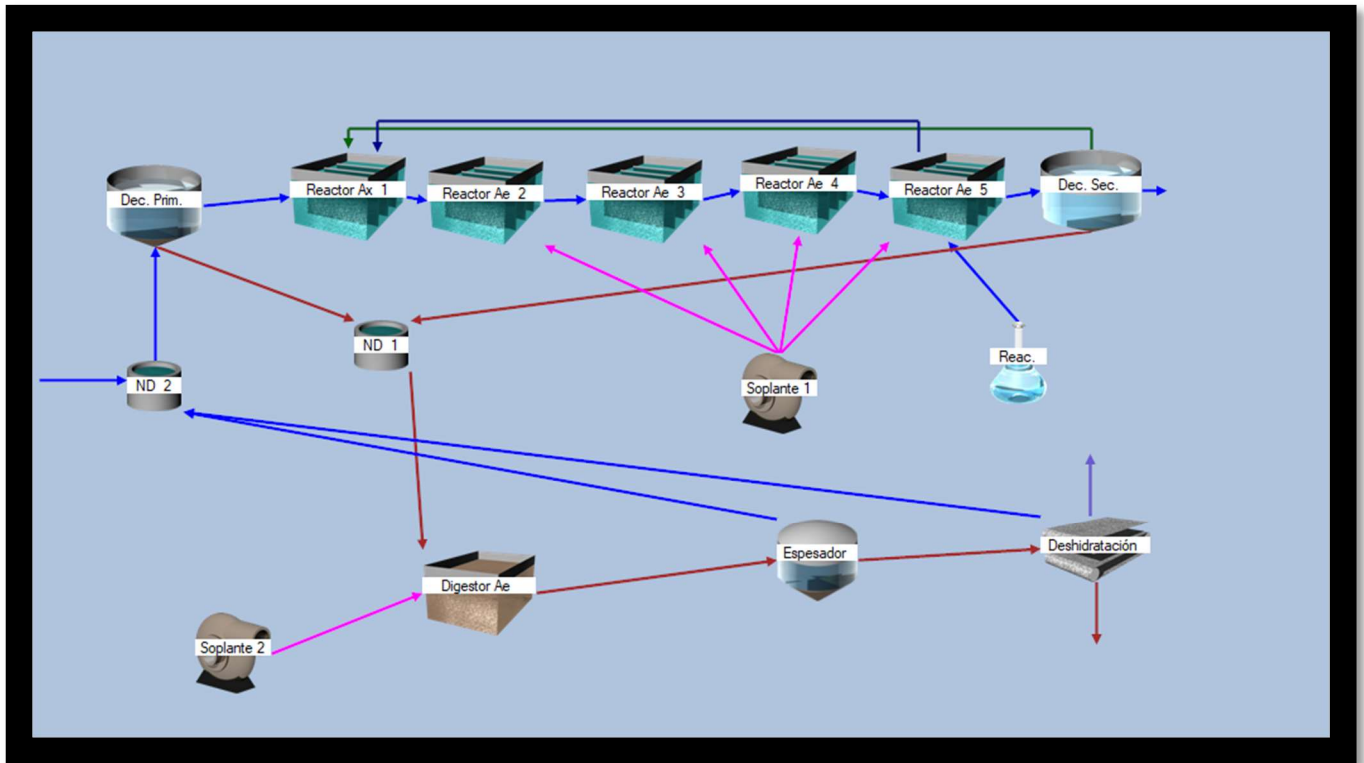


Figura 24. Esquema de simulación en DESASS de la alternativa 1 (Fuente: Elaboración propia).

Las condiciones de operación se detallan a continuación:

- Decantador primario:

Tabla 25. Condiciones de funcionamiento del decantador primario de la alternativa 1 (Fuente: Elaboración propia).

Decantador primario	
Número	1
Diámetro (m)	16
Altura (m)	3.5
Volumen (m ³)	703.72
TRH (h)	2
Caudal de purga de fangos (m ³ /día)	78
Concentraciones de SS (agua salida) (mg/l)	132.98
%SSV (agua de salida)	79.9
Concentración de SS (purga) (mg/l)	20878.02
% SSV (purga)	79.9

- Reactores:

Tabla 26. Condiciones de funcionamiento de los reactores de la alternativa 1 (Fuente: Elaboración propia).

Reactores	
Volumen (m ³)	3500
% Aerobio	80
% Anóxico	20
	%Ae 1 20
	%Ae 2 20
% Aerobio	%Ae 3 20
	%Ae 4 20
	Ae 1 528
	Ae 2 240
Número de difusores	Ae 3 240
	Ae 4 240
TRC (días)	15
Concentraciones de SS (mg/l)	3840.9
% SSV	62.5
Caudal recirculación de nitratos (m ³ /día)	20489.71
Caudal reactivos (m ³ /día)	0.5
Concentración reactivos (mg/l)	500000
Concentración reactivos (kg/m ³)	500
Cantidad de reactivos (cloruro férrico) (kg/día)	250

- Decantador secundario:

Tabla 27. Condiciones de funcionamiento del decantador secundario de la alternativa 1 (Fuente: Elaboración propia).

Decantador Secundario	
Número	2
Diámetro (m)	17
Altura (m)	3.8
Volumen (m ³)	862.52
TRH (h)	4
Caudal de purga fangos (m ³ /día)	128.58
Concentraciones de SS (mg/l)	6373.91
% SSV	62.3
Caudal de recirculación de fangos (m ³ /día)	7362.2

- Digestor aerobio:

Tabla 28. Condiciones de funcionamiento del digestor aerobio de la alternativa 1 (Fuente: Elaboración propia).

Digestor aerobio	
Número	1
Longitud (m)	32.14
Ancho (m)	32.14
Altura (m)	3.5
Volumen (m ³)	3615.43
Número de difusores	1024
TRH (h)	15

- Espesador:

Tabla 29. Condiciones de funcionamiento del espesador de la alternativa 1 (Fuente: Elaboración propia).

Espesador	
Número	1
Diámetro (m)	7.25
Altura (m)	3
Volumen (m ³)	123.85
TRH (h)	12
Caudal de purga fangos (m ³ /día)	103.29
Concentraciones de SS (mg/l)	16188.26
% SSV	61.4

- Deshidratador mecánico:

Tabla 30. Condiciones de funcionamiento del deshidratador mecánico de la alternativa 1 (Fuente: Elaboración propia).

Deshidratación mecánica	
Q purga (m ³ /día)	6.65
SS (mg/l)	250000.01
SS (kg/m ³)	250.0
Producción de fangos (kg/día)	1662.50007
%SSV	61.4
%SSVB	34.6

- Calidad del agua de salida:

Tabla 31. Calidad del efluente de la alternativa 1 (Fuente: Elaboración propia).

Calidad del efluente	
DQO (mg DQO /l)	42.77
NH ₄ (mg N/l)	0.21
NO ₃ (mg N/l)	9.19
NT (mg/l)	10.31
PO ₄ (mg P/l)	1.21
PT (mg/l)	1.91
SS (mg/l)	15.36

5.3.2 Resultados alternativa 2: Proceso de oxidación total con eliminación biológica de nitrógeno y precipitación química de fósforo. Esquema Ludzack-Ettinger modificado.

En la **figura 25** se representa el esquema del proceso de Ludzack-Ettinger modificado simulado en la herramienta DESASS.

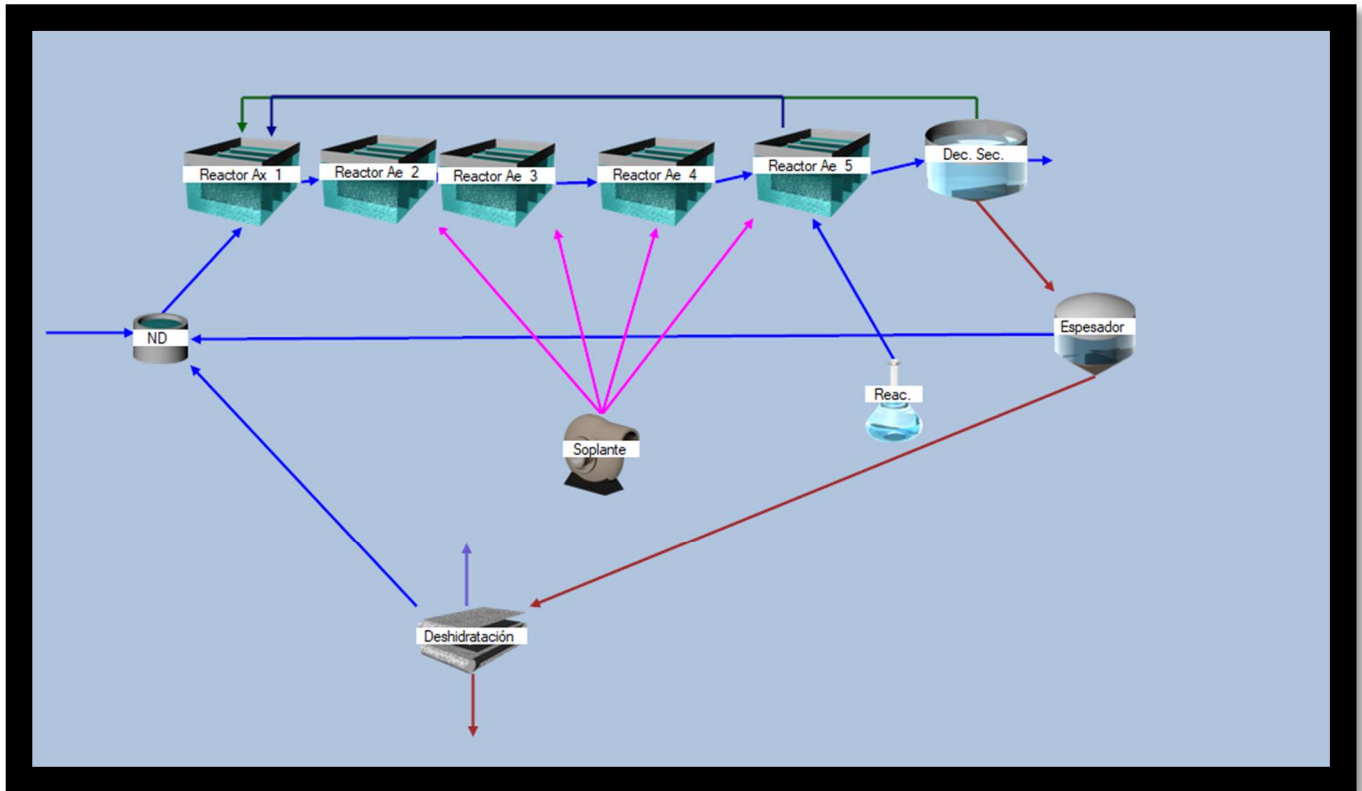


Figura 25. Esquema de simulación en DESASS de la alternativa 2 (Fuente: Elaboración propia).

Las condiciones de funcionamiento se detallan a continuación:

- Decantador primario: No existe
- Reactores:

Tabla 32. Condiciones de funcionamiento de los reactores de la alternativa 2 (Fuente: Elaboración propia).

Reactores		
Volumen (m ³)	12500	
% Aerobio	80	
% Anóxico	20	
% Aerobio	%Ae 1	20
	%Ae 2	20
	%Ae 3	20
	%Ae 4	20
Número de difusores	Ae 1	840
	Ae 2	840
	Ae 3	840
	Ae 4	840
TRC (días)	28	
Concentraciones de SS (mg/l)	3916.17	
% SSV	60	
Caudal recirculación de nitratos (m ³ /día)	20921.15	
Caudal reactivos (m ³ /día)	0.58	
Concentración reactivos (mg/l)	500000	
Concentración reactivos (kg/m ³)	500	
Cantidad de reactivos (cloruro férrico) (kg/día)	290	

- Decantador secundario:

Tabla 33. Condiciones de funcionamiento del decantador secundario de la alternativa 2 (Fuente: Elaboración propia).

Decantador Secundario	
Número	2
Diámetro (m)	17.37
Altura (m)	3.8
Volumen (m ³)	900.48
TRH (h)	4
Caudal de purga fangos (m ³ /día)	236.36
Concentraciones de SS purga (mg/l)	7090.23
% SSV	59.8
Caudal de recirculación de fangos (m ³ /día)	5867.34

- **Espesador:**

Tabla 34. Condiciones de funcionamiento del espesador de la alternativa 2 (Fuente: Elaboración propia).

Espesador	
Número	1
Diámetro (m)	8
Altura (m)	3
Volumen (m ³)	150.80
TRH (h)	12
Caudal de purga fangos (m ³ /día)	118.18
Concentraciones de SS (mg/l)	14154.8
% SSV	59.8

- **Deshidratador mecánico:**

Tabla 35. Condiciones de funcionamiento del deshidratador mecánico de la alternativa 2 (Fuente: Elaboración propia).

Deshidratación mecánica	
Q purga (m ³ /día)	6.65
SS (mg/l)	250000
SS (kg/m ³)	250
Producción de fangos (kg/día)	1662.5
%SSV	59.8
%SSVB	34.6

- **Calidad del efluente:**

Tabla 36. Calidad del efluente de la alternativa 2 (Fuente: Elaboración propia).

Calidad del efluente	
DQO (mg DQO /l)	42.48
NH ₄ (mg N/l)	0.14
NO ₃ (mg N/l)	7.94
NT (mg/l)	8.86
PO ₄ (mg P/l)	1.43
PT (mg/l)	1.91
SS (mg/l)	15.35

5.3.3 Resultados alternativa 3: Proceso de oxidación total con eliminación biológica de nitrógeno y eliminación biológica de fósforo. Esquema A²/O.

En la **figura 26** se representa el esquema de proceso del esquema A²/O simulado en la herramienta DESASS.

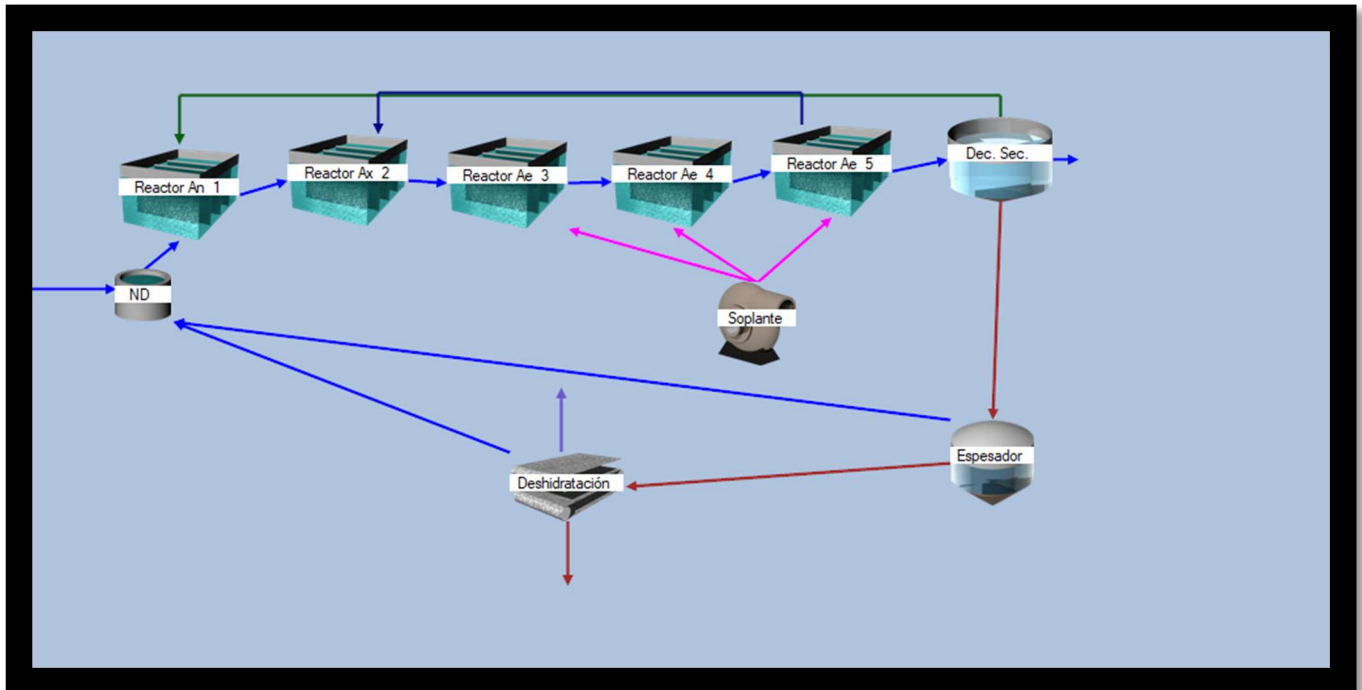


Figura 26. Esquema de simulación en DESASS de la alternativa 3 (Fuente: Elaboración propia).

Las condiciones de funcionamiento se detallan a continuación:

- Decantador primario: No existe.
- Reactores:

Tabla 37. Condiciones de funcionamiento de los reactores de la alternativa 3 (Fuente: Elaboración propia).

Reactores		
Volumen (m ³)	18000	
% Aerobio	45	
% Anaerobio	35	
% Anóxico	20	
	%Ae 1	10
% Aerobio	%Ae 2	15
	%Ae 3	20
	%Ae 4	0
Número de difusores	Ae 1	600
	Ae 2	900
	Ae 3	1188
	Ae 4	0
TRC (días)	28	
Concentraciones de SS (mg/l)	2600.75	
% SSV	65.1	
Caudal recirculación de nitratos (m ³ /día)	26818.3	

- Decantador secundario:

Tabla 38. Condiciones de funcionamiento del decantador secundario de la alternativa 3 (Fuente: Elaboración propia).

Decantador Secundario	
Número	2
Diámetro (m)	16.87
Altura (m)	3.8
Volumen (m ³)	849.38
TRH (h)	4
Caudal de purga fangos (m ³ /día)	369.94
Concentraciones de SS (mg/l)	4318.28
% SSV	65.1
Caudal de recirculación de fangos (m ³ /día)	7120.65

- **Espesador:**

Tabla 39. Condiciones de funcionamiento del espesador de la alternativa 3 (Fuente: Elaboración propia).

Espesador	
Número	1
Diámetro (m)	9.71
Altura (m)	2.5
Volumen (m ³)	185.13
TRH (h)	12
Caudal de purga fangos (m ³ /día)	184.97
Concentraciones de SS (mg/l)	8581.43
% SSV	65.2

- **Deshidratador mecánico:**

Tabla 40. Condiciones de funcionamiento del deshidratador mecánico de la alternativa 3 (Fuente: Elaboración propia).

Deshidratación mecánica	
Q purga (m ³ /día)	6.28
SS (mg/l)	250000
SS (kg/m ³)	250
Producción de fangos (kg/día)	1570
%SSV	65.2
%SSVB	34.8

- **Calidad del efluente:**

Tabla 41. Calidad del efluente de la alternativa 3 (Fuente: Elaboración propia).

Calidad del efluente	
DQO (mg DQO /l)	44.08
NH ₄ (mg N/l)	0.83
NO ₃ (mg N/l)	7.9
NT (mg/l)	9.51
PO ₄ (mg P/l)	1.53
PT (mg/l)	1.96
SS (mg/l)	12.19

5.3.4 Resultados alternativa 4: Combinación del proceso de oxidación total con reactor anaerobio de membranas (AnMBR) y con eliminación biológica de nitrógeno y precipitación química de fósforo.

En la **figura 27** se representa el esquema de proceso del esquema de la alternativa 4 simulado en la herramienta DESASS. Recordemos que la idea principal de diseño es reutilizar el agua para riego, no obstante, en las épocas de año que se quiera tratar toda el agua residual, el agua de salida del AnMBR se recirculará para su tratamiento por oxidación total (línea de agua conectada al nudo 3 en el esquema)

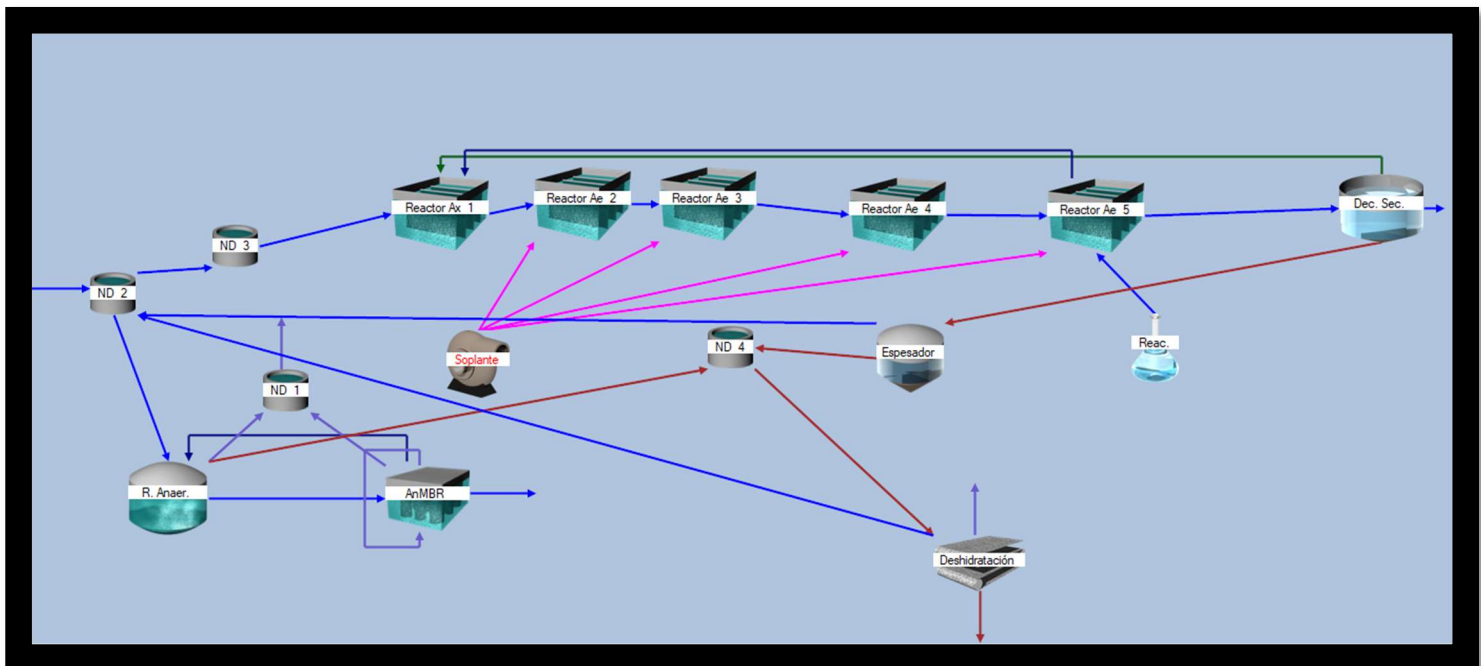


Figura 27. Esquema de simulación en DESASS de la alternativa 4 (Fuente: Elaboración propia).

Las condiciones de funcionamiento se detallan a continuación:

- Decantador primario: No existe.
- Reactores:

Tabla 42. Condiciones de funcionamiento de los reactores de la alternativa 4 (Fuente: Elaboración propia).

Reactores		
Volumen (m ³)	6000	
% Anaerobio	65	
% Anóxico	35	
% Aerobio	%Ae 1	15
	%Ae 2	20
	%Ae 3	15
	%Ae 4	15
Número de difusores	Ae 1	240
	Ae 2	306
	Ae 3	224
	Ae 4	224
TRC (días)	20	
Concentraciones de SS (mg/l)	3125.43	
% SSV	54.7	
Caudal recirculación de nitratos (m ³ /día)	9002.4	
Caudal reactivos (m ³ /día)	0.6	
Concentración reactivos (mg/l)	500000	
Concentración reactivos (kg/m ³)	500	
Cantidad de reactivos (cloruro férrico) (kg/día)	300	

- Decantador secundario:

Tabla 43. Condiciones de funcionamiento del decantador secundario de la alternativa 4 (Fuente: Elaboración propia).

Decantador Secundario	
Número	2
Diámetro (m)	16.2
Altura (m)	3.8
Volumen (m ³)	783.26
TRH (h)	4
Caudal de purga fangos (m ³ /día)	161.91
Concentraciones de SS (mg/l)	5653.52
% SSV	54.5
Caudal de recirculación de fangos (m ³ /día)	2390.93

- **Espesador:**

Tabla 44. Condiciones de funcionamiento del espesador de la alternativa 4 (Fuente: Elaboración propia).

Espesador	
Número	1
Diámetro (m)	6.42
Altura (m)	3
Volumen (m ³)	97.11
TRH (h)	12
Caudal de purga fangos (m ³ /día)	139.62
Concentraciones de SS (mg/l)	10955.77
%SSV	56.3

- **Deshidratador mecánico:**

Tabla 45. Condiciones de funcionamiento del deshidratador mecánico de la alternativa 4 (Fuente: Elaboración propia).

Deshidratación mecánica	
Q purga (m ³ /día)	6.07
SS (mg/l)	250000
SS (kg/m ³)	250
Producción de fangos (kg/día)	1517.5
%SSV	56.3
%SSVB	34.5

- **Reactor anaerobio de membranas (AnMBR):**

Tabla 46. Reactor anaerobio de membranas (AnMBR) de la alternativa 4 (Fuente: Elaboración propia).

Reactor anaerobio de membranas (AnMBR)	
Flujo transmembranal (l/m ² xh)	15
Caudal (m ³ /día)	2691.34
Caudal (l/h)	112137.372
Superficie (m ²)	7475.82483
Superficie nominal (m ²)	1914
Número de módulos	5
% metano	77.39
Caudal gas (m ³ /día)	615.34
Concentración de SS (mg/l)	13070.54
%SSV	59.1
Caudal recirculación (m ³ /día)	11000

- Reactor anaerobio:

Tabla 47. Reactor anaerobio de la alternativa 4 (Fuente: Elaboración propia).

Reactor Anaerobio	
TRC (días)	70
Concentración de SS (mg/l)	10502.93
%SSV	59.1

- Calidad del agua para riego:

Tabla 48. Calidad del agua para riego de la alternativa 4 (Fuente: Elaboración propia).

Calidad del agua para riego (con riego)	
DQO (mg DQO /l)	89.72
NH ₄ (mg N/l)	80.83
NO ₃ (mg N/l)	0
NT (mg/l)	81.66
PO ₄ (mg P/l)	9.82
PT (mg/l)	9.97
SS (mg/l)	1

- Calidad del efluente (con riego):

Tabla 49. Calidad del efluente (con riego) de la alternativa 4 (Fuente: Elaboración propia).

Calidad del efluente (con riego)	
DQO (mg DQO /l)	37.43
NH ₄ (mg N/l)	1.2
NO ₃ (mg N/l)	8.25
NT (mg/l)	10.09
PO ₄ (mg P/l)	0.35
PT (mg/l)	0.69
SS (mg/l)	10.74

- Calidad del efluente (sin riego):

Tabla 50. Calidad del efluente (sin riego) de la alternativa 4 (Fuente: Elaboración propia).

Calidad del efluente (sin riego)	
DQO (mg DQO /l)	54.59
NH ₄ (mg N/l)	1
NO ₃ (mg N/l)	11.32
NT (mg/l)	13.21
PO ₄ (mg P/l)	0.83
PT (mg/l)	1.59
SS (mg/l)	14.72

Dentro de la alternativa de reutilizar el agua para riego nos fijamos que la **tabla 48** hace referencia al efluente del AnMBR que usará para regar donde se destaca la elevada concentración de los nutrientes reduciendo el aporte de fertilizantes, luego, en la **tabla 49** se muestran los resultados del efluente del caudal de agua residual restante tras el proceso de oxidación total. No obstante, tal y como se comentó anteriormente, en aquellas épocas del año en las que no se necesite el agua para riego el efluente del AnMBR se introducirá en el proceso de oxidación total para conseguir la eliminación de nutrientes, esto se puede observar en la **tabla 50**.

6 COMPARACIÓN Y SIMULACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS SIMULADAS.

6.1 Análisis técnico de las alternativas.

Las 4 alternativas planteadas presentan resultados favorables con el cumplimiento de los límites de vertido que exige la legislación. El resumen de los resultados obtenidos en cada alternativa es mostrado en la **Tabla 51**. Además, en todos los casos se obtienen fangos estabilizados con un % SSVB < 35.

Tabla 51. Resumen de los resultados de las cuatro alternativas (Fuente: Elaboración propia).

AGUA DE ENTRADA		Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4			Normativa
Parámetros	Entrada	Resultados	Resultados	Resultados	Resultados (agua de riego)	Resultados (efluente con riego)	Resultados (efluente sin riego)	Requisitos de vertido
S_{NH_4} (mg N/l)	60.9	0.21	0.14	0.83	80.83	1.2	1	
S_{NO_3} (mg N/l)	0	9.19	7.94	7.9	0	8.25	11.32	
N_T (mg N/l)	87	10.31	8.86	9.51	81.66	10.09	13.21	15
S_{PO_4} (mg P/l)	6.49	1.21	1.43	1.53	9.82	0.35	0.83	
P_T (mg P/l)	11	1.91	1.91	1.96	9.97	0.69	1.59	2
DQO (mg DQO/l)	970	42.77	42.48	44.08	89.72	37.43	54.59	125
SS (mg SST/l)	460	15.36	15.35	12.19	1	10.74	14.72	35

Se puede observar que las 4 alternativas cumplen con los requisitos de vertido, no obstante, tendremos que analizar qué propuesta es la más viable económicamente. La propuesta más viable es la que tenga un menor coste de construcción + coste de explotación.

6.2 Requerimiento de equipos y materiales.

Debemos adquirir una lista de equipos y materiales. En el tratamiento biológico se necesita la compra de los siguientes elementos: Módulos de membranas para el AnMBR, Soplantes para la aireación de los reactores, Difusores, Bombas de recirculación, Tuberías y accesorios (válvulas, codos, elementos de protección, elementos de unión de tuberías).

Asimismo, el proceso de precipitación química necesitará la instalación de un sistema de almacenamiento y dosificación de cloruro férrico que consta de los siguientes elementos: Tanque de almacenamiento y Bombas dosificadoras.

Los equipos y materiales mencionados anteriormente se contabilizarán dentro del precio unitario del hormigón (€/m³)

6.2.1 Características de los equipos y materiales para el tratamiento biológico.

- **Módulos de membranas:**

Los módulos de membranas de fibra hueca serán instalados en el interior de tanques, por lo tanto, es necesario conocer el área total de membranas y el número de módulos requeridos según el modelo del fabricante KOCH Membrane Systems.

Para los cálculos de diseño se ha considerado un **flujo neto de permeado de 15 l/m²x h**. El **caudal que atraviesa la membrana** es de **2691.34 m³/d**. Reemplazando en la siguiente expresión se obtiene lo siguiente:

$$\text{Área de filtrado} = \frac{\text{Caudal } \left(\frac{l}{h}\right)}{\text{flujo neto de permeado } \left(\frac{l}{m^2 \times h}\right)}$$

Calculando la expresión anterior obtenemos que el área de filtrado es 7475.82 m²

Para calcular el número de módulos dividiremos el área de filtrado entre la superficie nominal de un módulo, según la siguiente expresión:

$$N^{\circ} \text{ de módulos} = \frac{\text{Área de filtrado } (m^2)}{\text{Superficie nominal } (m^2)}$$

En la **Tabla 46** se muestran los datos del área filtrante y las dimensiones de cada módulo según el modelo, información proporcionada por el fabricante.

Tabla 52. Dimensiones de los módulos de membranas (Fuente: Elaboración propia).

MODELO	L (mm)	H (mm)	W (mm)	Área filtrante (m ²)
LE 8	925	2,679	940	348
LE 16	1,675	2,679	940	696
LE 44	2,258	2,679	1,780	1,914

El número de módulos obtenidos según el modelo son mostrados en la **Tabla 47**.

Tabla 53. Número de módulos según el modelo a utilizar (Fuente: Elaboración propia).

Modelo	Área (m ²) (ud)	Nº módulos
LE 8	348	22
LE 16	696	12
LE 44	1,914	5

Se necesitan **5 (4+1) módulos del modelo LE 44**. Los módulos serán instalados en un tanque cuyas dimensiones serán las del módulo más un margen (cm) en cada dimensión por el número total de módulos, es decir, el volumen del tanque será:

$$V (m^3) = (L = 2.7) \times (W = 2.2) \times (H = 3) \times 5 = 89.1$$

6.3 Valoración económica de las alternativas.

Los costes en una estación depuradora de agua residual son referidos a los **costes de explotación y costes de construcción**.

6.3.1 Coste de Construcción.

En este apartado analizaremos los costes de construcción, donde enfocaremos los costes de encofrado y los costes del hormigonado armado. Para el coste de encofrado adoptaremos un precio de 45 €/m². Para el coste del hormigonado armado adoptaremos un precio de 75 €/m³ en el que está incluido el precio de las barras de acero. Los costes de hormigonado y encofrado habrá que amortizarlos a lo largo de su vida útil, de unos 20 años. El proceso de amortización lo realizaremos mediante el método francés aplicando la siguiente fórmula.

$$Cuota \left(\frac{\text{€}}{\text{año}} \right) = \frac{V.I \times i}{1 - \left(\frac{1}{1+i} \right)^N}$$

Donde:

V.I: Valor invertido (€).

i: Interés anual en tanto por uno.

N: Número de años a amortizar, en este caso, la vida útil.

El coste de encofrado y hormigonado armado se resume en la **Tabla 54 y 55** respectivamente.

Tabla 54. Coste de encofrado (€/año) (Fuente: Elaboración propia).

Hipótesis	Depuración convencional	Ludzack-Ettinger modificado	A2/O	Combinación oxidación total con membranas anaerobias
Área decantador primario (m ²)	201.06	0.00	0.00	0.00
Área decantador secundario (m ²)	226.98	236.97	223.52	206.12
Área reactor anóxico (m ²)	155.56	555.56	800.00	466.67
Área reactor aerobio (m ²)	622.22	2222.22	1800.00	866.67
Área reactor anaerobio (m ²)	0.00	0.00	1400.00	0.00
Área reactor anaerobio MBR (m ²)	0.00	0.00	0.00	817.82
Área digester aerobio (m ²)	803.43	0.00	0.00	0.00
Área espesador (m ²)	41.28	50.27	74.05	32.37
Área encofrado total (m ²)	2050.53	3065.01	4297.57	2389.64
Precio del encofrado (€/m ²)	45.00	45.00	45.00	45.00
Coste encofrado (€)	92,273.93 €	137,925.58 €	193,390.79 €	107,534.00 €
Vida útil (años)	20	20	20	20
Interés anual (%)	4	4	4	4
Cuota (€/año)	6,789.68 €	10,148.81 €	14,230.03 €	7,912.54 €

Tabla 55. Costes de hormigonado armado (€/año) (Fuente: Elaboración propia).

Hipótesis	Depuración convencional	Ludzack-Ettinger modificado	A2/O	Combinación oxidación total con membranas anaerobias
Volumen decantador primario (m ³)	703.72	0.00	0.00	0.00
Volumen decantador secundario (m ³)	862.52	900.48	849.38	783.26
Volumen total reactores (m ³)	3500.00	12500.00	18000.00	6000.00
Volumen reactor anóxico (m ³)	700.00	2500.00	3600.00	2100.00
Volumen reactor aerobio (m ³)	2800.00	10000.00	8100.00	3900.00
Volumen reactor anaerobio (m ³)	0.00	0.00	6300.00	0.00
Volumen anaerobio MBR (m ³)	0.00	0.00	0.00	4089.10
Volumen digestor aerobio (m ³)	3615.43	0.00	0.00	0.00
Volumen espesador (m ³)	123.85	150.80	185.13	97.11
Volumen hormigón total (m ³)	8805.52	13551.28	19034.51	10969.47
Precio del hormigón armado (€/m ³)	75.00	75.00	75.00	75.00
Coste hormigón (€)	660,414.00 €	1,016,346.00 €	1,427,588.25 €	822,710.25 €
Cúpula de AnMBR (€)	- €	- €	- €	274,236.75 €
Coste total (€)	660,414.00 €	1,016,346.00 €	1,427,588.25 €	1,096,947.00 €
Vida útil (años)	20	20	20	20
Interés anual (%)	4	4	4	4
Cuota (€/año)	48,594.42 €	74,784.52 €	105,044.44 €	80,715.28 €

Dentro de los **costes de construcción** tendremos en cuenta el coste de las membranas igualmente amortizado mediante el método francés tal y como se muestra en la **Tabla 56**.

Tabla 56. Coste de las membranas (€/año) (Fuente: Elaboración propia).

Hipótesis	Combinación oxidación total con membranas anaerobias	
Superficie de membranas (m ²)	1914	
Número de módulos	5	
Precio membranas (€/m ²)	35	
Precio (€)		334,950.00 €
Vida útil (años)	10	
Interés (%)	4	
Cuota(€/año)		41,296.30 €

6.3.2 Coste de Explotación

En este apartado contemplamos los siguientes costes:

- Costes de agitación.
- Costes de bombeo.
- Costes de aireación.
- Costes de recirculación de biogás.
- Coste de gestión del fango.
- Coste de cloruro férrico.
- Coste de limpieza de membranas.
- Metano producido (ahorro).

- **Coste de agitación.**

El **coste energético para la EDAR de Almoradí** ha sido fijado en **0.28374 €/ kWh** (IBERDROLA, s.f.).

La potencia adsorbida por los agitadores sumergidos en los reactores anóxicos y anaerobios ha sido fijada en **10 W/m³**. La potencia de los agitadores del reactor anaerobio de membranas se fija en **5 W/m³**. En la **Tabla 57 y 58** se muestran los consumos de energía y su respectivo coste anual (€/año).

Tabla 57. Consumo de energía y coste energético anual de los agitadores (€/año)

Hipótesis	Depuración Convencional	Ludzack-Ettinger modificado	A2/O	
Volumen total de reactores (m ³)	3500	12500	18000	
Reactor	Reactor anóxico	Reactor anóxico	Reactor anóxico	Reactor anaerobio
Porcentaje de volumen (%)	20	20	20	35
Volumen (m ³)	700	2500	3600	6300
Agitación (W/m ³)	10	10	10	10
Energía (W)	7000	25000	36000	63000
Energía (Kwh/día)	168	600	864	1512
Precio energía (€/kwh)	0.28374	0.28374	0.28374	0.28374
Precio (€/día)	47.67	170.24	245.15	429.01
Coste (€/año)	17,398.94 €	62,139.06 €	89,480.25 €	156,590.43 €

Tabla 58. Consumo de energía y coste energético anual de los agitadores (€/año) (Fuente: Elaboración propia).

Hipótesis	Combinación oxidación total con membranas anaerobias	
	Oxidación total	Membranas anaerobias
Volumen total de reactores (m ³)	8500	4000
Reactor	Reactor anóxico	Reactor anaerobio membranas
Porcentaje de volumen (%)	35	100
Volumen (m ³)	2975	4000
Agitación (W/m ³)	10	5
Energía (W)	29750	20000
Energía (Kwh/día)	714	480
Precio energía (€/kwh)	0.28374	0.28374
Precio (€/día)	202.59	136.20
Coste (€/año)	73,945.48 €	
		49,711.25 €

- **Coste de bombeo.**

Para calcular la energía consumida a la hora de bombear, debemos en primer lugar calcular la potencia necesaria. La potencia necesaria la obtendremos a partir de la siguiente expresión:

$$P (Kw) = \frac{9.81 \times Q \left(\frac{m^3}{s} \right) \times Hb (m. c. a)}{RB \times RM}$$

Donde:

Q: Caudal expresado en m³/s.

Hb: Altura de bombeo expresada en metros columna de agua.

RB: Rendimiento de la bomba. Se toma un valor del 70%.

RM: Rendimiento del motor. Se toma un valor del 90%.

La energía se obtendrá de la siguiente expresión:

$$E (Kwh) = P (Kw) \times t (tiempo en horas).$$

Para calcular la altura de bombeo (Hb) aplicaremos la siguiente expresión:

$$Z_A + \frac{P_A}{\gamma} + Hb = Z_B + \frac{P_B}{\gamma} + \Delta h_{A-B}$$

Teniendo en cuenta que los reactores y el decantador están abiertos a la atmósfera, las presiones relativas serán nulas, luego la altura de bombeo (Hb) se calculará de la siguiente forma:

$$Hb = (Z_B - Z_A) + \Delta h_{A-B}$$

En función de cada caso, se adoptará el valor de las pérdidas de carga más el desnivel más frecuente.

Las siguientes tablas reflejan los costes de bombeos respectivos:

Tabla 59. Coste de bombeo de recirculación de nitratos (€/año) (Fuente: Elaboración propia).

Hipótesis	Depuración convencional	Ludzack-Ettinger modificado	A2/O	Combinación oxidación total con membranas anaerobias
Bombeo inicial a la planta	- €	- €	- €	- €
Bombeo de recirculación nitratos				
Q Bombeo (m ³ /día)	20489.7	20921.16	26818.3	9002.4
Q Bombeo (m ³ /s)	0.24	0.242	0.310	0.104
Diferencia cotas + Pérdidas de carga (m.c.a)	2	2	2	2
HB (m.c.a)	2	2	2	2
RB x RM	0.63	0.63	0.63	0.63
Potencia (Kw)	7.385506944	7.541026587	9.66664914	3.244912698
tiempo funcionamiento (h)	24	24	24	24
Energía (kwh/día)	177.2521667	180.9846381	231.9995794	77.87790476
Precio energía (€/kwh)	0.28374	0.28374	0.28374	0.28374
Coste (€/año)	18,357.14 €	18,743.69 €	24,027.06 €	8,065.43 €

Tabla 60. Consumo de bombeo de recirculación de fangos (€/año) (Fuente: Elaboración propia).

Hipótesis	Depuración convencional	Ludzack-Ettinger modificado	A2/O	Combinación oxidación total con membranas anaerobias
Bombeo de recirculación de fangos				
Q Bombeo (m ³ /día)	7362.18	5867.34	7120.65	2390.93
Q Bombeo (m ³ /s)	0.085	0.0679	0.082	0.0277
Diferencia cotas + Pérdidas de carga (m.c.a)	2	2	2	2
HB (m.c.a)	2	2	2	2
RB x RM	0.63	0.63	0.63	0.63
Potencia (Kw)	2.653695833	2.114881151	2.566636409	0.861810086
tiempo funcionamiento (h)	24	24	24	24
Energía (kwh/día)	63.69	50.76	61.60	20.68
Precio energía (€/kwh)	0.28374	0.28374	0.28374	0.28374
Coste (€/año)	6,595.93 €	5,256.67 €	6,379.53 €	2,142.08 €

Tabla 61. Coste bombeo del digester aerobio al espesador (€/año) (Fuente: Elaboración propia).

Hipótesis	Depuración convencional
Bombeo digester aerobio-espesador	
Q Bombeo (m ³ /día)	206.58
Q Bombeo (m ³ /s)	0.0024
Diferencia cotas + Pérdidas de carga (m.c.a)	2
HB (m.c.a)	2
RB x RM	0.63
Potencia (Kw)	0.074461706
tiempo funcionamiento (h)	24
Energía (kwh/día)	1.787080952
Precio energía (€/kwh)	0.28374
Coste (€/año)	185.08 €

Tabla 62. Coste bombeo decantador secundario-espesador (€/año) (Fuente: Elaboración propia).

Hipótesis	Depuración convencional	Ludzack-Ettinger modificado	A2/O	Combinación oxidación total con membranas anaerobias
Bombeo decantador secundario-espesador				
Q Bombeo (m ³ /día)	236.36	369.94	161.91	
Q Bombeo (m ³ /s)	0.0027	0.0043	0.00187	
Diferencia cotas + Pérdidas de carga (m.c.a)	2	2	2	
HB (m.c.a)	2	2	2	
RB x RM	0.63	0.63	0.63	
Potencia (Kw)	0.085195899	0.133344775	0.058360417	
tiempo funcionamiento (h)	24	24	24	
Energía (kwh/día)	2.044701587	3.200274603	1.40065	
Precio energía (€/kwh)	0.28374	0.28374	0.28374	
Coste (€/año)		211.76 €	331.44 €	145.06 €

Tabla 63. Coste bombeo espesador-deshidratador (€/año) (Fuente: Elaboración propia).

Hipótesis	Depuración convencional	Ludzack-Ettinger modificado	A2/O	Combinación oxidación total con membranas anaerobias
Bombeo espesador-deshidratador				
Q Bombeo (m ³ /día)	103.29	118.18	184.97	220.58
Q Bombeo (m ³ /s)	0.0012	0.0014	0.0021	0.002553009
Diferencia cotas + Pérdidas de carga (m.c.a)	2	2	2	2
HB (m.c.a)	2	2	2	2
RB x RM	0.63	0.63	0.63	0.63
Potencia (Kw)	0.037230853	0.04259795	0.066672388	0.079508003
tiempo funcionamiento (h)	24	24	24	24
Energía (kwh/día)	0.893540476	1.022350794	1.600137302	1.908192063
Precio energía (€/kwh)	0.28374	0.28374	0.28374	0.28374
Coste (€/año)	92.54 €	105.88 €	165.72 €	197.62 €

Tabla 64. Coste de bombeo reactor anaerobio-AnMBR (€/año) (Fuente: Elaboración propia).

Hipótesis	Combinación oxidación total con membranas anaerobias	
Bombeo Reactor An-AnMBR		
Q Bombeo (m ³ /día)	13691.34	
Q Bombeo (m ³ /s)	0.1585	
Diferencia cotas + Pérdidas de carga (m.c.a)	1	
HB (m.c.a)	1	
RB x RM	0.63	
Potencia (Kw)	2.47	
tiempo funcionamiento (h)	24	
Energía (kwh/día)	59.22	
Precio energía (€/kwh)	0.28374	
Coste (€/año)		6,133.17 €

Tabla 65. Coste bombeo permeado (€/año) (Fuente: Elaboración propia).

Bombeo permeado		
Q Bombeo (m ³ /día)	2691.34	
Q Bombeo (m ³ /s)	0.03115	
Diferencia cotas + Pérdidas de carga (m.c.a)	2.5	
HB (m.c.a)	2.5	
RB x RM	0.63	
Potencia (Kw)	1.21	
tiempo funcionamiento (h)	24.00	
Energía (kwh/día)	29.10	
Precio energía (€/kwh)	0.28374	
Coste (€/año)		3,014.03 €

- **Coste de aireación.**

El consumo energético es obtenido de la simulación en DESASS. En la **Tabla 66** se muestran los consumos diarios de energía (kWh/día) y su respectivo coste anual (€/año).

Tabla 66. Resumen del consumo energético diario (kWh/d) y coste energético anual de la aireación(€/año) (Fuente: Elaboración propia).

Hipótesis	Depuración convencional	Ludzack-Ettinger modificado	A2/O	Combinación oxidación total con membranas anaerobias
Número difusores reactor aerobio 1	400	624	440	240
Número difusores reactor aerobio 2	168	624	676	306
Número difusores reactor aerobio 3	168	624	900	224
Número difusores reactor aerobio 4	168	624	0	224
Número difusores digestor aerobio	784	0	0	0
Energía consumida R.A (kwh/día)	1330.7	2029.8	1752.7	900
Energía consumida D.A (kwh/día)	681	0	0	0
Precio energía (€/kwh)	0.28374	0.28374	0.28374	0.28374
Precio energía R.A (€/día)	377.57	575.94	497.31	255.37
Precio energía D.A (€/día)	193.23	0.00	0.00	0.00
Coste (€/año)	208,341.91 €	210,216.44 €	181,518.55 €	93,208.59 €

NOTA: En la tabla anterior, R.A se refiere a reactor aerobio y D.A se refiere a digestor aerobio.

- **Coste de recirculación de biogás.**

El fabricante de las membranas recomienda un caudal de recirculación de biogás de 15 m³/m³ de permeado para minimizar su ensuciamiento, luego, el caudal (Q) de biogás a recircular en (m³/día) sale de la siguiente expresión:

$$Q = \text{Caudal recirculación biogás (m}^3/\text{m}^3 \text{ permeado)} \times \text{Caudal permeado (m}^3/\text{día)}$$

En la **tabla 67** se refleja el coste de recirculación de biogás (€/año).

Tabla 67. Coste de recirculación de biogás (€/año) (Fuente: Elaboración propia).

Hipótesis	Combinación oxidación total con membranas anaerobias
Caudal recirculación biogás (m ³ /m ³ permeado)	15
Q permeado (m ³ /día)	2691.34
Q de biogás a recircular (m ³ /día)	40370.1
Presión de compresión biogás (m.c.a)	4
Potencia (kw)	29
Tiempo funcionamiento (h)	24
Energía (kwh/día)	696
Precio energía (€/kwh)	0.28374
Coste (€/año)	72,081.31 €

- **Coste de gestión de fangos.**

El **coste para la gestión de fangos** se ha dividido en dos partes: La primera parte en la estabilización del fango. Para la estabilización del fango se añadirá polielectrolito a **6 kg por cada tonelada de fango**, con un precio de **2300 €/ton de polielectrolito**. La segunda parte en el transporte del fango, cuyo precio se ha fijado en **5 €/ton de fango deshidratado**. La producción diaria de fangos (Kg/d) y el coste anual que conlleva su gestión en cada una de las alternativas son mostrados en la **Tabla 68**.

Tabla 68. Producción diaria de fangos (Kg/d) y el coste anual en su gestión (€/año)

Hipótesis	Depuración Convencional	Ludzack-Ettinger modificado	A2/O	Combinación oxidación total con membranas anaerobias
Deshidratador	Deshidratador	Deshidratador	Deshidratador	Deshidratador
Xtss (mg/l)	250000	250000	250000	250000
Xtss (kg/m ³)	250	250	250	250
Qpurga (m ³ /día)	6.65	6.65	6.28	6.1
Xtss (kg/día)	1662.5	1662.5	1570	1525
Xtss (ton/día)	1.6625	1.6625	1.57	1.525
Poliectrolito (kg polielectrolito/ton de fango)	6	6	6	6
Poliectrolito (kg/día)	9.975	9.975	9.42	9.15
Poliectrolito (ton/día)	0.009975	0.009975	0.00942	0.00915
Precio polielectrolito (euros/ton)	2300	2300	2300	2300
Precio polielectrolito (euros/día)	22.94	22.94	21.67	21.05
Transporte fango (euros/ton)	5	5	5	5
Precio transporte (euros/día)	8.3125	8.3125	7.85	7.625
Coste total Gestion (€/año)	11,408.08 €	11,408.08 €	10,773.34 €	10,464.55 €

NOTA: Xtss se refiere a Sólidos suspendidos totales y Q se refiere a caudal.

- **Coste de Cloruro Férrico.**

El **coste del cloruro férrico** se ha sido fijado en **200 €/ton**. El consumo diario de cloruro férrico y su coste anual (€/año) son mostrados en la **Tabla 69**.

Tabla 69. Consumo diario de cloruro férrico (ton/día) y su coste anual (€/año)

Hipótesis	Depuración Convencional	Ludzack-Ettinger modificado	Combinación oxidación total con membranas anaerobias
Reactivo	Cloruro férrico	Cloruro férrico	Cloruro férrico
Q (m ³ /día)	0.5	0.58	0.6
Concentración (mg/l)	500000	500000	500000
Concentración (kg/m ³)	500	500	500
Concentración (kg/día)	250	290	300
Concentración (ton/día)	0.25	0.29	0.3
Precio reactivo (euros/ton)	200	200	200
Precio reactivo (euros/día)	50	58	60
Coste final reactivo (€/año)	18,250.00 €	21,170.00 €	21,900.00 €

- **Coste de limpieza de membranas.**

Para la limpieza de membranas se usará Hipoclorito de sodio y ácido cítrico. El coste de los reactivos **Hipoclorito de sodio y ácido cítrico** han sido fijados en **250 y 1500 €/ton**, respectivamente. El coste anual de estos reactivos (€/año) son mostrados en la **Tabla 70**.

Tabla 70. Coste anual de reactivos para limpieza química de membranas (€/año) (Fuente: Elaboración propia).

Hipótesis	Combinación oxidación total con membranas anaerobias
Nº de limpiezas al año	2
Volumen membranas (m ³)	89.1
Concentración de reactivos (mg/l) o (g/m ³)	2000
toneladas de reactivo (ton)	0.1782
Precio del hipoclorito sódico (€/ton)	250
Precio del ácido cítrico (€/ton)	1500
Coste (€/año)	623.70 €

- **Metano producido (ahorro).**

En la alternativa 4 se produce metano que se puede utilizar para la obtención de energía y conseguir un ahorro, en la **tabla 71** se refleja el ahorro conseguido. Se ha considerado un poder calorífico de 38000 KJ/m^3 , el poder calorífico es la energía por unidad de volumen o masa que se desprende en una reacción química. El rendimiento de los equipos para generar energía suele ser del orden del 30%. Hay que tener en cuenta para el cálculo la siguiente relación:

$$1 \text{ KJ} = 0.000277778 \text{ kwh}$$

Tabla 71. Ahorro en €/año debido a la generación de metano. (Fuente: Elaboración propia).

Hipótesis	Combinación oxidación total con membranas anaerobias	
Caudal de gas ($\text{m}^3/\text{día}$)	615.34	
Porcentaje de metano (%)	77.39	
Caudal de metano ($\text{m}^3/\text{día}$)	476.21	
Energía metano (kJ/m^3)	38000	
Rendimiento (%)	30	
Energía (kJ/día)	5428812.5	
Energía (KJ/año)	1981516576	
Energía (kwh/año)	550421.7114	
Precio energía (€/kwh)	0.28374	
Ahorro (€/año)	156,176.66 €	

6.4 Selección de la alternativa óptima.

Tabla 72. Costes totales (€/año). (Fuente: Elaboración propia).

Hipótesis	Depuración convencional	Ludzack-Ettinger modificado	A2/O	Combinación oxidación total con membranas anaerobias
Costes				
Coste hormigonado (€/año)	48,594.42 €	74,784.52 €	105,044.44 €	80,715.28 €
Coste encofrado (€/año)	6,789.68 €	10,148.81 €	14,230.03 €	7,912.54 €
Coste de agitación (€/año)	17,398.94 €	62,139.06 €	246,070.68 €	123,656.73 €
Coste gestión fango (€/año)	11,408.08 €	11,408.08 €	10,773.34 €	10,464.55 €
Coste Cloruro Férrico (€/año)	18,250.00 €	21,170.00 €	- €	21,900.00 €
Coste de bombeo (€/año)	25,230.68 €	24,318.00 €	30,903.75 €	19,697.40 €
Coste aireación (€/año)	208,341.91 €	210,216.44 €	181,518.55 €	93,208.59 €
Coste recirculación biogas (€/año)	- €	- €	- €	72,081.31 €
Coste limpieza membranas (€/año)	- €	- €	- €	623.70 €
Coste membranas (€/año)	- €	- €	- €	41,296.30 €
Producción metano (€/año)	- €	- €	- €	156,176.66 €
COSTES TOTALES (€/año)	336,013.70 €	414,184.90 €	588,540.79 €	315,379.75 €

De la tabla anterior vamos a destacar y analizar los siguientes costes: El coste de agitación es menos caro en la primera alternativa por tener un menor volumen del reactor anóxico, es mayor en la tercera alternativa (A2/O) ya que presenta un elevado volumen del reactor anaerobio y anóxico, es decir, cuanto mayor es el volumen mayor es el coste de agitación. El coste de gestión del fango y bombeo es muy parecido. El coste de aireación es parecido en las dos primeras alternativas, un poco menor en la tercera por contar con un reactor anaerobio y mucho menor en la última alternativa, esto se debe a que gran parte de la materia orgánica se elimina en el anaerobio y el amonio no se elimina del todo (uso para riego), entonces no se airea para oxidar el amonio. El coste de reactivo (cloruro férrico) es muy parecido en todas a diferencia de la alternativa 3 que no se requiere. La alternativa 4 tiene un suplemento a lo que respecta los costes de construcción (Coste de membranas) y costes de explotación (recirculación de biogás y

limpieza de las membranas), no obstante, con esta alternativa se genera biogás en el reactor anaerobio que se aprovecha para la generación de energía suponiendo un ahorro. Nos fijamos que el precio de la energía hace que esta alternativa 4 sea la más rentable, es decir, si el precio de energía fuese más barato, la alternativa más rentable sería la primera.

En la **figura 28** se muestra un comparativo de los costes de construcción y explotación de cada alternativa.

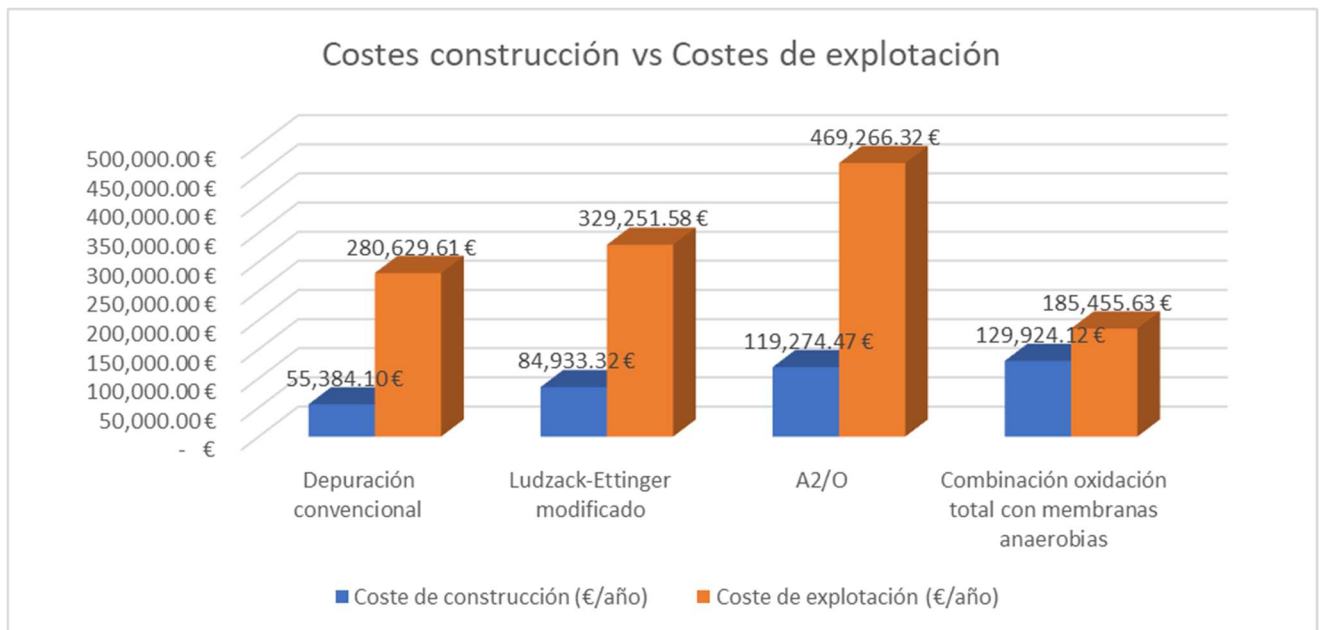


Figura 28. Comparativo de los costes de construcción y explotación de cada alternativa (€/año) (Fuente: Elaboración propia).

De la figura anterior se ve que la alternativa 4 es la que tiene un elevado coste de construcción debido al suplemento que dan el coste de las membranas, no obstante, tiene el menor coste de explotación debido al ahorro que produce la generación de biogás y el precio de energía. La alternativa 1 tiene el menor de coste de construcción debido a que es la que se necesita menos volumen para los equipos. La alternativa 3 es la que tiene un mayor coste de explotación por el elevado volumen de los equipos, por ejemplo, los reactores.

De la **figura 29** (siguiente página) se refleja una comparación de los costes totales de cada alternativa.

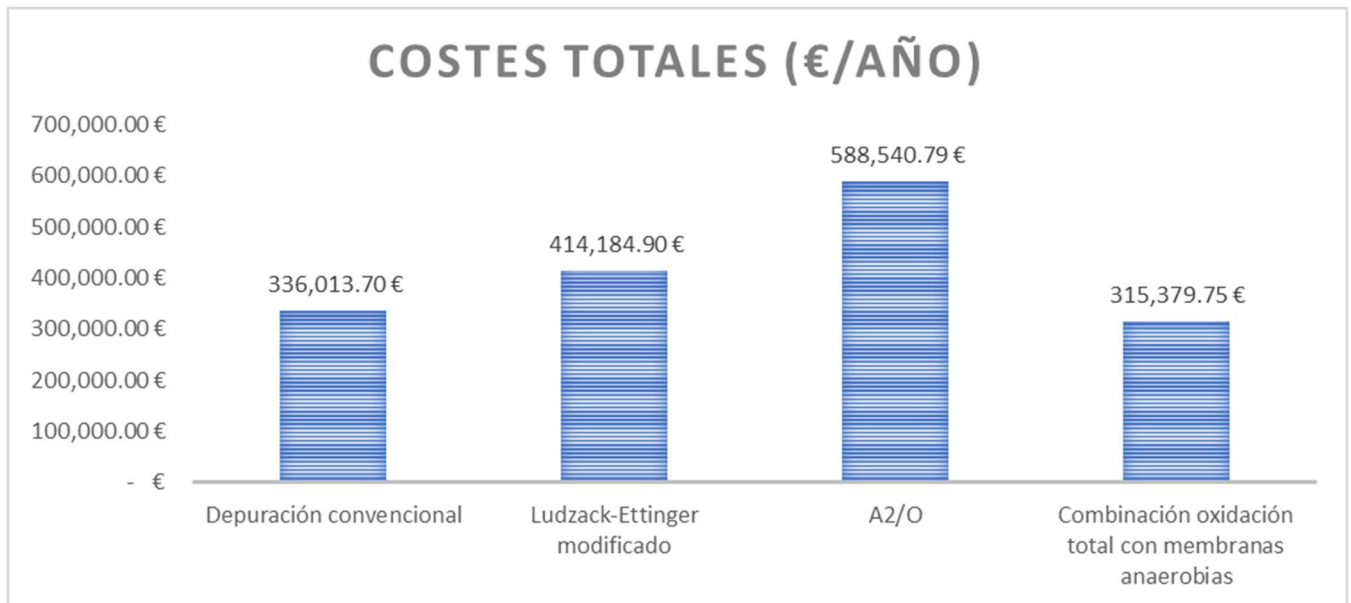


Figura 29. Comparativo de los costes totales (€/año) (Fuente: Elaboración propia).

De esta figura se destaca que la **alternativa 4** muestra el menor coste total, ya analizado anteriormente. Por lo tanto, la solución de diseño a la nueva EDAR de Almoradí será la **alternativa 4** en donde la situación de diseño es reutilizar el agua para riego. Cabe volver a destacar el ahorro producido a la hora de generar biogás y el precio de la energía, es decir, si no fuese por la producción de biogás y el elevado coste de la energía, la solución a adoptar sería la alternativa 1. También nos fijamos en que la alternativa 3 es la más cara, esto se debe al mayor coste de explotación que requiere.

7 CONCLUSIONES.

En este trabajo fin de Máster hemos podido comparar cuatro alternativas para la eliminación de nitrógeno y fósforo para la nueva EDAR de Almoradí. La selección de la alternativa óptima se ha hecho en base a un análisis técnico-económico de cada una de las alternativas, en donde, se ha comprobado que todas las soluciones cumplen con los requisitos de vertido, no obstante, cada una de ellas tiene un coste diferente. El coste total de cada una es la suma del coste de construcción más el coste de explotación. La alternativa 4 es la que tiene un elevado coste de construcción debido al suplemento que dan el coste de las membranas, sin embargo, tiene el menor coste de explotación debido al ahorro que produce la generación de biogás y el precio de energía. Se concluye que **la óptima es la alternativa 4: Combinación del proceso de oxidación total con reactor anaerobio de membranas (AnMBR) con eliminación biológica de nitrógeno y precipitación química de fósforo** en donde la situación de diseño es

la de reutilizar el agua para riego. Esto se ve muy influenciado por el precio de energía, si éste fuese inferior, la alternativa más óptima sería la primera, ya que esta presenta un coste total ligeramente superior a la cuarta.

8 BIBLIOGRAFÍA.

- Asensi, E. (Marzo de 2015). Eliminación de nutrientes en cultivos en suspensión. *Tratamientos biológicos de A.R.* Valencia, España.
- Avendaño, L. (Julio de 2011). Estudio de la población de bacterias nitrificantes y su relación con los parámetros físico-químicos, biológicos y operacionales en una EDAR con sistema convencional de Fangos Activos. *Trabajo de Fin de Máster*, 4-5. Valencia, Comunidad Valenciana, España.
- Ayuntamiento de Almoradí. (2014). Plan general estructural de Almoradí.
- Calderón, K. (2012). Estudio de la microbiota involucrada en los procesos depuradores para el tratamiento de aguas residuales urbanas mediante reactores de membrana (MBR) y Reactores de Biopelícula (MBBR). *Tesis Doctoral*. Granada, Granada, España: Universidad de Granada.
- Carrasco, J. (04 de Febrero de 2016). Obtenido de chrome-extension://oemmdcbldboiebfnladdacbfmadadm/http://www.chj.es/ES-ES/CIUDADANO/PARTICIPACION_PUBLICA/Documents/Plan%20Hidrol%C3%B3gico%20de%20cuencia/Turia_05_Aspectos_ambientales_en_tramo_final_Turia.pdf
- Catalán, J. (1997). *Depuradoras "Bases Científicas"*. Madrid, España: Bellisco.
- CEDEX. (15 de Abril de 2016). *Hispagua - Sistema Español de información sobre el agua*. Obtenido de http://hispagua.cedex.es/sites/default/files/hispagua_articulo/Ingcivil/P-021-031_1.pdf
- Crites, R., & Tchobanoglous, G. (2000). *Sistema de Manejo de Aguas Residuales para núcleos pequeños y descentralizados*. Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw - Hill Interamericana S.A.
- Diario oficial de la Generalitat Valenciana. Resolución de 13 de julio de 2018 de la Dirección General de Medio Natural y Desarrollo Rural.
- Entidad de Saneamiento de Aguas. (s.f.). Recuperado el 16 de Marzo de 2016, de EPSAR: <http://www.epsar.gva.es/saneament/instalaciones/edar.aspx?id=67>
- Elber Víctor Puga Usucachi. (2016). Trabajo Fin de Máster. Evaluación técnica-económica de alternativas para la eliminación de los nutrientes fósforo y nitrógeno, de la estación depuradora de aguas residuales (EDAR) Camp de Turia II, comunidad Valenciana.
- Ferrer, J., Seco, A., Serralta, J., Ribes, J., Aguado, D., Ruano, M., & García, M. (2011). *Diseño y Simulación de EDAR mediante Software DESASS* (Primera ed.). Valencia, España: Universitat Politècnica de València.
- Gerardi, M. (2002). *Nitrification and Denitrification in the Activated Sludge Process*. New York, USA: John Wiley & Sons.
- Henze, M., Van Loosdrecht, M., Ekama, G., & Brdjanovic, D. (2011). *Biological Waste water Treatment - Principles, Modelling and Design*. London, UK: IWA Publishing. Recuperado el 3 de Febrero de 2016
- Javier. E. Sánchez-Ramírez. (2017). Obtención de los principales parámetros del agua residual urbana empleados en los modelos matemáticos de fangos activados a partir de una caracterización de analítica simple.

Jiménez, E. (2010). Tesis Doctoral. *Modelación Matemática del proceso de nitrificación en dos etapas. Desarrollo de metodologías de calibración del modelo para un reactor SHARON y proceso de fangos activados.*, 8. Valencia, Valencia, España.

Lloret, J. (22 de 07 de 2014). Estudio de alternativas para la ampliación de la depuradora de aguas residuales Alzira - Carcaixent mediante simulación con software DESASS. 16. Valencia, Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.

Martí, M. (10 de Setiembre de 2014). TFM. *Modificación de la configuración de la EDAR de Calahorra para la recuperación de fósforo en la línea de fangos*, 6-8. Valencia, Valencia, España.

Metcalf, & Eddy. (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales* (Tercera ed.). Madrid, España: McGraw-Hill/.

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (s.f.). Recuperado el 15 de Marzo de 2016, de
http://www.magrama.gob.es/es/agua/publicaciones/03_Manual_Directiva_91_271_CEE_tcm7-28959.pdf

Ministerio de Hacienda y Administraciones Públicas. (s.f.). *Intervención General de la Administración del Estado*. (Diario Oficial de las comunidades Europeas) Recuperado el 16 de Marzo de 2016, de
http://www.igae.pap.minhap.gob.es/sitios/igae/es-ES/ClnControlGastoPublico/normativacontrolfc/Documents/Di_98-15-CE.pdf

P. Sincero, A., & A. Sincero, G. (2003). *Physical - Chemical Treatment of Water and WasteWater*. Maryland, USA: IWA PUBLISHING.

Proyecto de construcción de las obras de la nueva EDAR Almoradí. Anejo nº2. Estudio de caudales y cargas contaminantes.

Seco, A., & Ferrer, J. (2012). *Tratamientos Biológicos de Aguas residuales* (Segunda ed.). Valencia, España: Universitat Politècnica de València.

TOTAGUA. (s.f.). *TOTAGUA*. Recuperado el 14 de Abril de 2016, de
<http://www.totagua.com/equipos-para-la-depuracion/ultrafiltracion-de-aguas-residuales.html#catalogo>

Wikimapia. (04 de FEBRERO de 2016). *Wikimapia*. Obtenido de
<http://wikimapia.org/#lang=es&lat=39.501259&lon=-0.462971&z=13&m=b&show=/33371970/es/EDAR-Camp-de-Turia-II/photo/5041613>