



TRABAJO FIN DE MÁSTER

OPTIMIZACIÓN Y EXPANSIÓN: ESTUDIO DE DEPURADORAS DE PEQUEÑO TAMAÑO PARA AMPLIAR INFRAESTRUCTURAS EXISTENTES

Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Autor:

Alejandro Hernández Fernández

Tutor del presente trabajo:

D. Pedro Blázquez García

Madrid, 2024

AGRADECIMIENTOS

Cuando comencé con el TFM pensé que los agradecimientos sería algo fácil, así que lo deje para el final, para las prisas de los últimos días, pero resulta que no es tan fácil. Se me viene muchas personas la cabeza.

Lo primero es agradecer todo apoyo recibido por parte de mi familia. Agradecer a mi madre, Julia, a mi padre, Paco, a Carolina, y no puedo olvidarme de Jamy, Tala y Maíz. Sin su apoyo durante todos estos años, desde la carrera, hasta el Máster, llegar hasta aquí no habría sido posible.

Sin duda, agradecer por todos los conocimientos y experiencia que me han aportado mis compañeros y amigos David y Cristian. Por aguantarme todos los días y por aportar siempre su granito de arena para este TFM. Agradecer también a Javi y Mohamed, trabajadores en el ayuntamiento de El Barraco, que pudieron darme de primera mano, un montón de información sobre esta depuradora en concreto, pero, sobre todo, por sus conocimientos.

Agradecer a mi tutor, Pedro Blázquez García, la ayuda proporcionada desde del día cero, desde los conocimientos proporcionados en sus clases hace ya más de un año, hasta el día de hoy, donde acabando este TFM, ha sido inmejorable toda la atención proporcionada.

Por último, también quiero agradecer a todos los profesores y ponentes que durante estos dos años me han proporcionado conocimientos para crecer, tanto profesionalmente como personalmente.

DEDICATORIA

Sin duda, este TFM va dedicado en primer lugar a mis padres, sin ellos no sería quien soy y no habría llegado hasta aquí. Gracias a mi madre, Julia, por todo lo que ha conseguido a lo largo de su vida, aunque no haya sido nada fácil. Gracias por todo tu esfuerzo y por ser como eres, me ha ayudado a ser quien soy y a llegar donde he llegado.

No puedo olvidarme de ti, Carolina. Hace ya unos cuantos años comenzamos las andaduras juntos y siempre has estado ahí, en las cosas buenas y en las cosas malas, ayudándome a levantarme todas las veces que he querido tirar la toalla y apoyándome cuando tome la decisión de comenzar este Máster, a sabiendas de lo que significaría, pero por fin vemos la luz al final del túnel, comienza una nueva etapa muy diferente.

También quiero nombrar a mis compañeros de clase durante este Máster, hemos sufrido, pero al final yo me quedo con lo bueno, esos buenos momentos vividos durante los dos años de Máster y también me quedo con todo lo que he podido aprender de cada uno de vosotros. Esto se acaba, pero empieza otra etapa mucho mejor.

*"La mente que se abre a una nueva idea jamás
volverá a su tamaño original"*

Albert Einstein

RESUMEN

Título: Optimización y expansión: Estudio de depuradoras de pequeño tamaño para ampliar infraestructuras existentes

Autor: Alejandro Hernández Fernández

Tutor del proyecto: Pedro Gerardo Blázquez García

Palabras clave: Depuración, Ampliación, Optimización, Herramienta Multicriterio, Alternativas, Sostenibilidad

La normativa española sobre tratamiento de aguas residuales se rige principalmente por la Directiva 91/271/CEE. Además, existen varios reales decretos y resoluciones que establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas, la declaración de zonas sensibles, y la reutilización y gestión de lodos de depuración. Estas regulaciones buscan asegurar un tratamiento adecuado de las aguas residuales para proteger la salud pública y el medio ambiente.

Sin embargo, España lleva pagando multas millonarias a Europa por no cumplir con esta normativa. El Tribunal de Justicia de la Unión Europea condenó a España por su retraso en gestionar las obligaciones de tratamiento de las aguas residuales procedentes de nueve aglomeraciones urbanas de más de 15.000 habitantes. La sentencia condenaba a España a abonar a la Comisión Europea una multa de un importe de 10.950.000 euros por cada semestre de retraso y, a parte, una suma a tanto alzado de 12 millones de euros. En la actualidad se ha rebajado el importe de la multa al haber constatado una mejora en dos de las ocho aglomeraciones urbanas incluidas en la sentencia.

Con este trabajo fin de máster se busca crear una herramienta multicriterio que ayude a poblaciones con menos de 10.000 habitantes equivalentes a escoger el sistema de depuración que mejor se adapta a sus necesidades para ampliar y/o optimizar su Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR). Se ha comprobado que, no solo hay depuradoras que necesitan ampliaciones debido al aumento de población e industria, sino que también existen un gran número de depuradoras altamente sobredimensionadas, lo que ocasiona unos altos costes de operación y mantenimiento sin conseguir la correcta depuración de las aguas residuales.

Para la creación de la herramienta multicriterio se han usado numerosos criterios de diferente índole, tanto criterios técnicos, como ambientales y de explotación, donde cada uno de los criterios ha obtenido una puntuación según el sistema de depuración concreto.

Como resultado, se ha utilizado la herramienta en dos casos de estudio diferentes. Uno de ellos, una EDAR diseñada para 22.500 hab-eq pero que en la actualidad no llega a 3.000 hab-eq, y otra EDAR donde, debido a problemas continuos en las instalaciones y a un aumento de la población e industria, el caudal de entrada es el doble del previsto.

ABSTRACT

Title: Optimization and expansion: Study of small treatment plants to expand existing infrastructures

Author: Alejandro Hernández Fernández

Project tutor: Pedro Gerardo Blázquez García

Keywords: Depuration, Extension, Optimization, Multicriteria Tool, Alternatives, Sustainability

Spanish regulations on wastewater treatment are mainly governed by Directive 91/271/EEC. In addition, there are several royal decrees and resolutions that establish the rules applicable to the treatment of urban wastewater, the declaration of sensitive areas, and the reuse and management of sewage sludge. These regulations seek to ensure adequate treatment of wastewater to protect public health and the environment.

However, Spain has been paying million-dollar fines to Europe for not complying with these regulations. The Court of Justice of the European Union condemned Spain for its delay in managing wastewater treatment obligations from nine urban agglomerations with more than 15,000 inhabitants. The ruling condemned Spain to pay the European Commission a fine of 10,950,000 euros for each six-month period of delay and, in addition, a lump sum of 12 million euros. Currently, the amount of the fine has been reduced as an improvement has been confirmed in two of the eight urban agglomerations included in the sentence.

With this master's thesis we seek to create a multi-criteria tool that helps populations with less than 10,000 equivalent inhabitants to choose the purification system that best suits their needs to expand and/or optimize their Wastewater Treatment Plant (WWTP). It has been proven that not only are there treatment plants that need expansion due to the increase in population and industry, but there are also many highly oversized treatment plants, which causes high operation and maintenance costs without achieving correct water purification. residuals.

To create the multi-criteria tool, numerous different criteria have been used, both technical, environmental and exploitation criteria, where each of the criteria has obtained a score according to the specific purification system.

As a result, the tool has been used in two different case studies. One of them, a WWTP designed for 22,500 inhabitants-eq but which currently does not reach 3,000 inhabitants-eq, and another WWTP where, due to continuous problems in the facilities and an increase in population and industry, the inflow It is double what was expected.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	17
1.1. TIPOS DE AGUAS RESIDUALES	19
1.1.1. Aguas residuales domésticas o sanitarias	20
1.1.2. Aguas Residuales Industriales	21
1.1.3. Aguas Pluviales	23
1.1.4. Aguas Residuales Agrícolas	24
1.1.5. Lixiviados de Vertederos	24
1.2. LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES A LO LARGO DE LA HISTORIA	25
1.3. NORMATIVA APLICABLE	27
1.4. MULTAS A ESPAÑA	28
2. ESTADO DEL ARTE	31
2.1. JUSTIFICACIÓN Y PROPÓSITO DEL ESTUDIO DE INVESTIGACIÓN	31
2.2. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE DEPURACIÓN MÁS UTILIZADOS	31
2.2.1. Reactor biológico secuencial (SBR)	31
2.2.1.1. Introducción	31
2.2.1.2. Historia	32
2.2.1.3. Funcionamiento	32
2.2.1.4. Eliminación Fosforo y Nitrógeno	34
2.2.1.5. Ventajas y desventajas del sistema	35
2.2.2. Sistema MBR: reactor biológico + filtración por membranas	36
2.2.2.1. Introducción	36
2.2.2.2. Historia	36
2.2.2.3. Funcionamiento	37
2.2.2.4. Eliminación Fosforo y Nitrógeno	38
2.2.2.5. Ventajas y desventajas del sistema	39
2.2.3. Contactores biológicos rotativos (CBR)	40
2.2.3.1. Introducción	40
2.2.3.2. Historia	41
2.2.3.3. Funcionamiento	42
2.2.3.4. Eliminación Fosforo y Nitrógeno	43
2.2.3.5. Ventajas y desventajas del sistema	43
2.2.4. Humedales artificiales de flujo superficial H y V	45
2.2.4.1. Introducción	45
2.2.4.2. Historia	45
2.2.4.3. Funcionamiento	46
2.2.4.4. Eliminación Fosforo y Nitrógeno	47
2.2.4.5. Ventajas y desventajas del sistema	48
2.2.5. Lagunas artificiales	49
2.2.5.1. Introducción	49
2.2.5.2. Historia	49
2.2.5.3. Funcionamiento	50
2.2.5.4. Eliminación Fosforo y Nitrógeno	51
2.2.5.5. Ventajas y desventajas del sistema	52
2.3. USO DE ENERGÍA RENOVABLE EN SISTEMAS DE DEPURACIÓN	53
3. OBJETIVOS	57
3.1. OBJETIVOS PRINCIPALES	57

3.1.	OBJETIVOS SECUNDARIOS.....	58
3.2.	INNOVACIÓN.....	61
4.	METODOLOGÍA.....	63
4.1.	ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN.....	63
4.2.	ESTRATEGIA PLANTEADA.....	64
4.3.	LIMITACIONES.....	66
4.4.	FASES DEL SISTEMA.....	67
4.4.1.	Criterios que deberían ser revisados por expertos.....	71
4.4.2.	Criterios que no requieren revisión por expertos.....	72
4.5.	RESULTADOS ESPERADOS.....	75
5.	DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA.....	76
5.1.	CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN EN AMPLIACIONES DE DEPURADORAS EN PEQUEÑAS POBLACIONES.....	76
5.1.1.	Criterios técnicos.....	76
5.1.1.1.	Calidad requerida del efluente según el medio receptor.....	76
5.1.1.2.	Tamaño de la población a tratar.....	78
5.1.1.3.	Superficie y características del terreno disponible para la ampliación de la EDAR.....	79
5.1.1.4.	Origen y concentración de la contaminación en el agua residual.....	80
5.1.1.5.	Versatilidad del tratamiento.....	81
5.1.1.6.	Climatología y otros factores.....	83
5.1.1.7.	Producción y estabilización de los fangos generados.....	85
5.1.1.8.	Complejidad en la explotación y mantenimiento.....	86
5.1.1.9.	Capacidad de automatización.....	87
5.1.2.	Criterios ambientales.....	88
5.1.2.1.	Producción de malos olores.....	88
5.1.2.2.	Generación de ruidos.....	89
5.1.2.3.	Integración paisajística.....	90
5.1.2.4.	Posibilidad de actuar como cobijo de especies animales.....	91
5.1.2.5.	Huella de carbono generada.....	92
5.1.3.	Criterios económicos.....	93
5.1.3.1.	Costes de explotación.....	93
5.1.3.2.	Costes de implantación.....	94
5.1.3.3.	Capacidad de adopción de energías renovables.....	95
5.1.4.	Criterios de Desempate.....	96
5.1.4.1.	Plazo de ejecución.....	97
5.1.4.2.	Posibilidad de financiación.....	98
6.	DESARROLLO.....	99
6.1.	MATRIZ DE PUNTUACIÓN.....	99
7.	RESULTADOS.....	105
7.1.	APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA A CASOS PRÁCTICOS.....	105
7.1.1.	El Barraco y San Juan de la Nava.....	106
7.1.1.1.	Antecedentes.....	106
7.1.1.2.	Introducción.....	108
7.1.1.3.	Aplicación de la Herramienta.....	111
7.1.1.4.	Conclusiones del caso de estudio.....	127
7.1.2.	Viladecavalls Este.....	128
7.1.2.1.	Antecedentes.....	128

7.1.2.2.	<i>Introducción</i>	131
7.1.2.3.	<i>Aplicación de la Herramienta</i>	134
7.1.2.4.	<i>Conclusiones del caso de estudio</i>	150
7.2.	<i>COMPARATIVA ENTRE AMBOS CASOS DE ESTUDIO</i>	152
7.3.	<i>ANÁLISIS DE LA HERRAMIENTA Y SUS LIMITACIONES</i>	156
8.	SOSTEIBILIDAD	159
8.1.	<i>SOSTENIBILIDAD MEDIOAMBIENTAL</i>	159
8.2.	<i>SOSTENIBILIDAD ECONÓMICA</i>	161
8.3.	<i>SOSTENIBILIDAD SOCIAL</i>	162
8.4.	<i>SOSTENIBILIDAD EN AMBOS CASOS DE ESTUDIO</i>	164
8.4.1.	<i>EDAR de El Barraco y San Juan de la Nava</i>	164
8.4.2.	<i>EDAR de Viladecavalls Este</i>	166
8.5.	<i>OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)</i>	168
8.5.1.	<i>ODS 6: Agua limpia y saneamiento</i>	168
8.5.2.	<i>ODS 13: Acción por el clima</i>	169
9.	CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	170
9.1.	<i>CONCLUSIONES</i>	170
9.2.	<i>FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN</i>	172
10.	BIBLIOGRAFIA	174

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1. Mapa de las cloacas durante el Imperio Romano (Hopkins 2007).....	26
Ilustración 2. Esquema planta depuradora (Valdivielso 2020)	27
Ilustración 3. Normativa de depuración en España a lo largo de los años https://elpais.com/politica/2018/07/25/actualidad/1532508768_001001.html (Planelles 2018)	29
Ilustración 4 Acronimos empelados en el presente trabajo para nombrar las tecnologías de depuración (de Miguel et al. 2010).....	31
Ilustración 5 Esquema Reactor Secuencial Discontinuo (SBR) (de Miguel et al. 2010).....	33
Ilustración 6. Esquema tipo de un sistema MBR («Bioreactor de membrana MBR» 2024)	38
Ilustración 7 Diferencias entre un sistema biológico convencional y un sistema MBR («Bioreactor de membrana MBR» 2024)	40
Ilustración 8 Esquema tipo de un CBR (Echeverría et al. 2020)	41
Ilustración 9 Esquema tipo de humedales artificiales de flujo superficial H y V (de Miguel et al. 2010)	47
Ilustración 10 Diagramas de flujo de instalaciones de Lagunaje para 20-200 h-e (de Miguel et al. 2010)	51
Ilustración 11. Potencia requerida por unidad de tratamiento (Bolinches 2023)	54
Ilustración 12 Consumo energético según tratamiento (González Martínez y Moreno Mora 2009)	55
Ilustración 13. Estaciones depuradoras que en la actualidad necesitan eliminación de Fosforo y/o Nitrógeno (Bolinches 2023).....	58
Ilustración 14. Matriz DAFO del Método PATTERN (elaboración propia).....	66
Ilustración 15. Criterios escogidos para la elaboración de la metodología (elaboración propia) ...	70
Ilustración 16. Ranking de relevancia (elaboración propia).....	74
Ilustración 17. Desplegable para escoger valor asignado a cada criterio (elaboración propia)	102
Ilustración 18. Ubicación de los municipios de El Barraco y San Juan de la Nava («Ayuntamiento de El Barraco» [sin fecha])	106
Ilustración 19. Ubicación EDAR El Barraco (elaboración propia)	107
Ilustración 20. Esquema EDAR El Barraco (elaboración propia)	107
Ilustración 21. Gráfico con las puntuaciones obtenidas EDAR San Juan de la Nava y El Barraco (elaboración propia).....	120
Ilustración 22. Gráfico con las puntuaciones obtenidas EDAR San Juan de la Nava y El Barraco (elaboración propia).....	124
Ilustración 23. Edificios existentes en la EDAR de El Barraco y San Juan de la Nava (elaboración propia).....	126
Ilustración 24. Terreno disponible en el interior de la EDAR de El Barraco y San Juan de la Nava (elaboración propia).....	126
Ilustración 25. Ubicación del municipio de Viladecavalls (elaboración propia).....	129
Ilustración 26. Ubicación EDAR Viladecavalls ESTE (elaboración propia)	130
Ilustración 27. Esquema de la EDAR de Viladecavalls Este antes de las obras (elaboración propia)	131
Ilustración 28. Gráfico con las puntuaciones obtenidas EDAR Viladecavalls Este (elaboración propia)	143

Ilustración 29. Gráfico con las puntuaciones obtenidas EDAR Viladecavalls Este (elaboración propia)	147
Ilustración 30. Terreno disponible para la ampliación en la EDAR de Viladecavalls Este (elaboración propia)	149
Ilustración 31. Fase de construcción del SBR en la EDAR de Viladecavalls Este (elaboración propia)	151
Ilustración 32. Implementación de paneles solares durante la ampliación de la EDAR Viladecavalls Este (elaboración propia)	151
Ilustración 33. Vista del SBR tras su construcción (elaboración propia)	152
Ilustración 34. Gráfico con los porcentajes de sostenibilidad para la EDAR de El Barraco y San Juan de la Nava (elaboración propia)	166
Ilustración 35. Gráfico con los porcentajes de sostenibilidad para la EDAR de Viladecavalls Este (elaboración propia)	168

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Contaminación de las aguas residuales domesticas (Ramirez 2021b)	21
Tabla 2. Contaminación de las aguas residuales industriales (Ramirez 2021a).....	22
Tabla 3. Características de la contaminación de las agua pluviales (Tchobanoglous et al. 2003) ...	24
Tabla 4. Características principales de los lixiviados según la edad de la masa de residuos.(Teamconcept 2021).....	24
Tabla 5. Nivel de tratamiento exigido y rendimiento requerido según la fase de depuración. (de Miguel et al. 2010)	76
Tabla 6. Nivel de tratamiento alcanzado según la tecnología implantada. (de Miguel et al. 2010)	77
Tabla 7. Puntuación sistemas de depuración según calidad de depuración de las aguas (elaboración propia).....	78
Tabla 8. Sistema de depuración adecuado según el rango de población a tratar. (de Miguel et al. 2010)	78
Tabla 9. Puntuación sistemas de depuración según tamaño de población a tratar (elaboración propia).....	79
Tabla 10. Sistema de depuración adecuado según la superficie necesaria para su implementación (de Miguel et al. 2010).	79
Tabla 11. Puntuación sistemas de depuración según la superficie necesaria para su implementación (elaboración propia).....	80
Tabla 12. Sistema de depuración adecuado según el origen y la contaminación en el agua residual. (de Miguel et al. 2010)	80
Tabla 13. Puntuación sistemas de depuración según el origen y la contaminación en el agua residual. (elaboración propia).....	81
Tabla 14. Clasificación del sistema de depuración adecuado según su capacidad para adaptarse a las variaciones diarias de caudal y carga contaminante. (de Miguel et al. 2010).....	82
Tabla 15. Clasificación del sistema de depuración adecuado según su capacidad para adaptarse a las sobrecargas hidráulicas.(de Miguel et al. 2010)	82
Tabla 16. Clasificación del sistema de depuración adecuado según su capacidad para adaptarse a las sobrecargas orgánicas. (de Miguel et al. 2010)	83
Tabla 17. Puntuación sistemas de depuración según la versatilidad del tratamiento. (elaboración propia).....	83
Tabla 18. Clasificación del sistema de depuración adecuado según su capacidad para adaptarse a las condiciones climáticas. (elaboración propia)	84
Tabla 19. Puntuación sistemas de depuración según su capacidad para adaptarse a las condiciones climáticas. (elaboración propia).....	84
Tabla 20. Clasificación del sistema de depuración adecuado según la cantidad de fangos generada y estabilización de los fangos.(de Miguel et al. 2010)	85
Tabla 21. Puntuación sistemas de depuración según la cantidad de fangos generadas y la estabilización de estos. (elaboración propia).....	86
Tabla 22. Clasificación del sistema de depuración adecuado según la complejidad en la explotación y mantenimiento. (de Miguel et al. 2010)	86
Tabla 23. Puntuación sistemas de depuración según la complejidad en la explotación y mantenimiento. (elaboración propia).....	87
Tabla 24. Clasificación del sistema de depuración adecuado según la capacidad de automatización (elaboración propia).....	87

Tabla 25. Puntuación sistemas de depuración según la capacidad de automatización (elaboración propia).....	88
Tabla 26. Clasificación del sistema de depuración adecuado según la producción de malos olores. (de Miguel et al. 2010)	88
Tabla 27. Puntuación sistemas de depuración según la producción de malos olores. (elaboración propia).....	89
Tabla 28. Clasificación del sistema de depuración adecuado según la generación de ruidos. (de Miguel et al. 2010)	89
Tabla 29. Puntuación sistemas de depuración según la producción de malos olores. (elaboración propia).....	90
Tabla 30. Clasificación del sistema de depuración adecuado según la integración paisajística.(de Miguel et al. 2010)	90
Tabla 31. Puntuación sistemas de depuración según la integración paisajística. (elaboración propia)	91
Tabla 32. Clasificación del sistema de depuración adecuado según la posibilidad de actuar como cobijo de especies animales. (elaboración propia).....	91
Tabla 33. Puntuación sistemas de depuración según la posibilidad de actuar como cobijo de especies animales. (elaboración propia).....	92
Tabla 34. Clasificación del sistema de depuración adecuado según la huella de carbono generada. (elaboración propia).....	92
Tabla 35. Puntuación sistemas de depuración según la huella de carbono generada. (elaboración propia).....	93
Tabla 36. Incremento del IPC entre enero de 2011 y marzo 2024. («Cálculo de variaciones del Índice de Precios de Consumo» 2024).....	93
Tabla 37. Clasificación del sistema de depuración adecuado según los costes de explotación adaptada de (de Miguel et al. 2010)	94
Tabla 38. Puntuación sistemas de depuración según los costes de explotación. (elaboración propia)	94
Tabla 39. Clasificación del sistema de depuración adecuado según los costes de implantación adaptada de (de Miguel et al. 2010)	95
Tabla 40. Puntuación sistemas de depuración según los costes de implantación. (elaboración propia).....	95
Tabla 41. Clasificación del sistema de depuración adecuado según la capacidad de adopción de energías renovables. (elaboración propia)	96
Tabla 42. Puntuación sistemas de depuración según la capacidad de adopción de energías renovables. (elaboración propia).....	96
Tabla 43. Clasificación del sistema de depuración adecuado según su plazo de ejecución. (elaboración propia).....	97
Tabla 44. Puntuación sistemas de depuración según su plazo de ejecución. (elaboración propia).....	97
Tabla 45. Clasificación del sistema de depuración adecuado según su posibilidad de financiación. (elaboración propia).....	98
Tabla 46. Puntuación sistemas de depuración según su posibilidad de financiación. (elaboración propia).....	98
Tabla 47. Matriz de puntuación TIPO (elaboración propia).....	100
Tabla 48. Escala para la evaluación de criterios (elaboración propia).....	101
Tabla 49. Explicación sistema de puntuación (elaboración propia).....	102

Tabla 50. Ejemplo de matriz de decisión para un caso teórico (elaboración propia)	103
Tabla 51. Evolución población en ambos municipios(«Ávila» [sin fecha])	108
Tabla 52. Consumos en la entrada de la EDAR (elaboración propia).....	109
Tabla 53. Matriz de decisión EDAR San Juan de la Nava y El Barraco (elaboración propia)	119
Tabla 54. Matriz de decisión San Juan de la Nava y El Barraco incluyendo criterios de desempate (elaboración propia).....	122
Tabla 55. Evolución de la población en Viladecavalls. ((«Barcelona» 2024))	131
Tabla 56. Caudales medios diarios de entrada en la EDAR (elaboración propia)	132
Tabla 57. Matriz de decisión EDAR Viladecavalls Este (elaboración propia)	141
Tabla 58. Matriz de decisión EDAR Viladecavalls Este incluyendo criterios de desempate (elaboración propia).....	145
Tabla 59. Puntuación de criterios para cada caso de estudio (elaboración propia).....	155
Tabla 60. Puntuación de criterios ambientales para cada caso de estudio (elaboración propia) .	155
Tabla 61. Matriz DAFO de resultados (elaboración propia).....	156
Tabla 62. Sostenibilidad según cada criterio estudiado (elaboración propia).....	164
Tabla 63. Sostenibilidad y criterios para el caso de estudio de El Barraco y San Juan de la Nava (elaboración propia).....	165
Tabla 64 Sostenibilidad y criterios para el caso de estudio de Viladecavalls Este (elaboración propia).	166

1. INTRODUCCIÓN

La depuración de las aguas residuales es una práctica crucial en la gestión de recursos hídricos, para proteger y mejorar la salud pública y preservar en buenas condiciones el medio ambiente. Este proceso no solo reduce la contaminación y mejora la calidad del agua, sino que también contribuye a la sostenibilidad de los ecosistemas acuáticos y terrestres.

Tras la pandemia acontecida en el año 2021 la correcta depuración de las aguas residuales se ha comprobado que es muy necesaria para proteger a la salud pública. Una buena depuración elimina patógenos y agentes contaminantes que pueden causar enfermedades transmitidas por el agua, como el cólera, la hepatitis y la disentería. Al tratar las aguas residuales antes de su vertido al medio natural o su reutilización, se minimiza el riesgo de posibles enfermedades y se protege la salud de todos los seres vivos. (World Health Organization 2024)

“La vigilancia microbiológica en aguas residuales puede utilizarse como indicador epidemiológico para la detección de la circulación del virus en la población. Las experiencias previas en la utilización de esta herramienta han demostrado su sensibilidad, incluso cuando la prevalencia de la COVID-19 presenta niveles bajos en la población.” («Vigilancia microbiológica en aguas residuales y aguas de baño como indicador epidemiológico para un sistema de alerta temprana para la detección precoz de SARS-CoV-2 en España» 2022)

Los procesos de depuración de aguas residuales se caracterizan por ser capaces de reducir en gran medida la carga de nutrientes tales como nitrógeno y fósforo, materia orgánica y contaminantes químicos, entre otros. Poder disminuir estos elementos es muy importante para evitar la eutrofización, un fenómeno que produce la proliferación de algas y la disminución del oxígeno disuelto, afectando gravemente a la biodiversidad acuática. (Smith 2003)

Una correcta y efectiva depuración de las aguas residuales es muy importante, cada vez más, ya que hace posible que esta agua se pueda reutilizar para diversos fines, entre ellos la agricultura, la industria, el riego de parques y el baldeo de calles, entre otros. Esta práctica es muy importante y a la vez valiosa, sobre todo en aquellas zonas donde se tiene una escasez de agua. Gracias a esta reutilización contribuimos al uso sostenible de parte de los recursos hídricos. (Angelakis y Gikas 2014)

Esto hace preguntarse, ¿cuánto vale el agua? Poder contestar a esta pregunta es muy complicado. El agua es un recurso de vital importancia para la vida en el planeta, y su acceso es fundamental para el bienestar humano, la salud, la agricultura, la industria y los ecosistemas. Desde esta perspectiva, el valor del agua es incalculable, ya que, sin ella, la vida tal como la conocemos no sería posible. (Naciones Unidas 2021)

Con la ayuda de este trabajo fin de máster pretendemos subrayar la relevancia crítica que poseen las aguas residuales en el contexto medioambiental y sanitario, especialmente enfocándonos en los retos específicos que enfrentan las pequeñas poblaciones en España en términos de tratamiento y depuración. A través de este trabajo buscamos explorar y proponer soluciones viables que

permitan abordar estos desafíos de una manera eficiente y sostenible, poniendo especial énfasis en la simplicidad y accesibilidad de las tecnologías y estrategias a implementar.

Una parte importante de este trabajo se centrará en la revisión de estudios de caso y experiencias previas que puedan servir de referencia para el diseño e implementación de sistemas de depuración adaptados a las necesidades y características específicas de las pequeñas poblaciones. Se prestará especial atención a las tecnologías emergentes y a las prácticas innovadoras en el campo del tratamiento de aguas residuales, evaluando su viabilidad técnica, económica y ambiental para su aplicación en el contexto español.

En la actualidad existen varios manuales que no sirven de apoyo cuando hablamos de depuración de aguas residuales en poblaciones pequeñas, entre ellos está el Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones del MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO. Este manual ha sido y sigue siendo muy importante en el mundo de la depuración de aguas, pero parte de este se ha quedado anticuado. Con este trabajo fin de máster también pretendemos mejorar este manual para que se pueda seguir usando y este actualizado.

Dividiremos el presente trabajo en varias secciones, donde en cada una de ellas abordaremos aspectos claves para la ampliación de depuradoras en pequeñas poblaciones:

- **Estado del arte**

En esta fase, se realizará una exhaustiva revisión de la bibliografía más relevante relacionada con la temática de depuración de aguas en pequeñas poblaciones y como abordar su ampliación. Se abordarán las distintas líneas de proceso planteadas en la literatura, tratando de manera concisa y directa todos los aspectos técnicos pertinentes. El objetivo principal es identificar las principales metodologías y tecnologías existentes en este campo, así como los desafíos y avances más significativos.

- **Objetivos Principales y Secundarios**

Se establecerán de manera clara y precisa los objetivos que se persiguen con esta investigación. Por un lado, se describirán los objetivos principales que serán abordados directamente por el trabajo. Por otro lado, se identificarán los objetivos secundarios que también se abordarán de manera colateral gracias a la investigación realizada.

- **Metodología**

Se desarrollará una herramienta multicriterio basada en los conocimientos obtenidos durante el estado del arte y en las asignaturas relacionadas con la temática. Se empleará una metodología multicriterio existente y se introducirán criterios específicos para adaptarla y mejorarla a la situación particular de este estudio, que se centra en la selección de alternativas de depuración para ampliar depuradoras existentes de pequeñas poblaciones.

- **Desarrollo del método**

En esta etapa, se describirá detalladamente el método utilizado para la selección de las alternativas de depuración. Se incluirán todos los cálculos y el aparato matemático desarrollado para la obtención de los resultados.

- **Sostenibilidad**

Una vez realizada la herramienta es importante corroborar cual llega a ser su futuro en relación con la sostenibilidad, para corroborar el trabajo realizado en busca de la sostenibilidad y como enfocar esta herramienta de cara al futuro.

- **Conclusiones**

Basándonos en los resultados obtenidos y en el análisis realizado durante la investigación, se elaborarán conclusiones que den respuesta a los objetivos planteados en el trabajo. Se evaluará el funcionamiento y la eficacia de la metodología multicriterio empleada, destacando los logros alcanzados y las limitaciones encontradas durante el proceso. Se discutirán los hallazgos más relevantes y se identificarán las áreas donde se ha logrado un mayor impacto y aquellas que requieren una mayor atención en futuras investigaciones.

- **Futuras líneas de investigación**

Se propondrán posibles áreas de estudio que surjan como resultado de esta investigación. Estas futuras líneas de investigación pueden basarse en las limitaciones identificadas durante el desarrollo del trabajo, en nuevas oportunidades emergentes o en la necesidad de ampliar el conocimiento en determinadas áreas. Se establecerán recomendaciones para investigaciones posteriores, señalando posibles enfoques metodológicos, aspectos técnicos a explorar y aspectos prácticos a considerar.

1.1. TIPOS DE AGUAS RESIDUALES

Comenzamos abordando en este apartado los principales parámetros que se usan para medir las aguas residuales para a continuación explicar de forma general cada una de las aguas residuales más importantes.

- Demanda bioquímica de oxígeno (DBO): Mide la cantidad de oxígeno consumido en la eliminación de la materia orgánica del agua mediante procesos biológicos aerobios.
- Demanda química de oxígeno (DQO): Mide la cantidad de oxígeno consumido en la eliminación de la materia orgánica por la adición de un oxidante químico.
- Sólidos en Suspensión: Un indicador de la calidad del agua que mide la cantidad de partículas sólidas que permanecen en suspensión. Hay dos tipos, los que se eliminan por sedimentación (sólidos sedimentables) y los que a pesar de no estar disueltos no pueden sedimentar (sólidos no sedimentables).

- Carbono orgánico total (COT): Mide la concentración de carbono en el agua residual.
- Demanda total de oxígeno (DTO): Mide la necesidad de oxígeno para la degradación de la materia.
- Demanda teórica de oxígeno (DTeO): Mide la necesidad de oxígeno para la degradación de la materia.
- Materia inorgánica
 - pH: Valores comprendidos entre 5 y 9.
 - Cloruros: Indicador de la contaminación fecal.
 - Alcalinidad: Mide la cantidad de carbonatos bicarbonatos e hidróxidos.
 - Nitrógeno: Produce vida, pero en exceso elimina oxígeno eutrofización.
 - Fósforo: produce vida, pero en exceso elimina oxígeno eutrofización.
 - Azufre: producen corrosión de los conductos.
 - Compuestos tóxicos: Pueden destruir la biota acuática o introducirse en la cadena alimentaria.
 - Metales pesados: cobre, cromo, boro, plomo, plata, arsénico, antimonio, bario, flúor y selenio, gases oxígeno disuelto, sulfuro de hidrógeno y metano.

Para abordar el tema de los diferentes tipos de aguas residuales, es importante reconocer que estas se clasifican según su origen, composición y los riesgos potenciales que representan para la salud y el medio ambiente. La gestión adecuada de las aguas residuales es fundamental para prevenir la contaminación y proteger los recursos hídricos.

1.1.1. Aguas residuales domésticas o sanitarias

Proceden de hogares y edificios residenciales. Estas aguas se dividen en:

- Aguas negras, procedentes de los inodoros.
- Aguas grises, procedentes de los lavabos, las duchas y las cocinas.

Como podemos ver en la Tabla 1, estas aguas contienen materia orgánica, bacterias, virus, nutrientes como nitrógeno y fósforo, y pueden contener trazas de productos farmacéuticos y hormonales (Henze, M., & Comeau, Y., 2008).(Carpenter et al. 1998)

Tabla 1. Contaminación de las aguas residuales domesticas (Ramirez 2021b)

CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS				
Parámetro	Características	Fuerte (mg/l)	Media (mg/l)	Ligera (mg/l)
Sólidos Volátiles	Volátiles	700	350	120
	Fijos	300	150	80
Sólidos en Suspensión	Volátiles	400	250	70
	Fijos	100	50	30
Sólidos Sedimentables	Volátiles	100	72	16
	Fijos	150	108	24
Sólidos Disueltos	Volátiles	300	100	50
	Fijos	200	100	50
DBO	a 20°C	>300	200	100
DQO	-	>800	400	160
Oxígeno Disuelto	-	0	0.1	0.2
Nitrógeno Total (N)	Orgánico	>86	50	25
Nitrógeno Total (N)	Amoniaco Libre N-NH4	35	20	10
Nitritos	N-NO2	0.10	0.05	0.00
Nitratos	N-NO3	0.40	0.20	0.10
Fósforo Total (P)	-	>17	7	2
Cloruros	-	>175	100	15
pH	-	>6.9	6.9	6.9
Grasas	-	>40	20	0

1.1.2. Aguas Residuales Industriales

Este tipo de aguas residuales tiene su origen en gran diversidad de industrias y pueden variar enormemente en su composición dependiendo del tipo de industria tal y como podemos observar en la Tabla 2 que tenemos a continuación. Contienen productos químicos específicos de los procesos industriales, metales pesados, materia orgánica, y en algunos casos, contaminantes radiactivos. Estas aguas son más difíciles de tratar que las aguas residuales domésticas y requieren tratamientos específicos antes de su vertido o reutilización. (Oral et al. 2020).

Tabla 2. Contaminación de las aguas residuales industriales (Ramirez 2021a)

CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES				
Actividad / Descripción de la contaminante		Unidad característica	Materias en suspensión (gr.)	Materias oxidables (gr. DBO5)
Industrias de transformación:				
	Fábrica de aceite	Kg aceite refinado	7.3	9.7
	Fábrica de jabón	Kg jabón	20	50
	Margarina	Kg margarina	5	80
	Vinazas	L alcohol producido	6.6	31
	Destilación de la uva	L alcohol producido	12	30
	Producción de vinos	L producido	15	10
	Cervezas sin recuperación de levaduras	Kg levadura no recuperada 12.5% MS	125	150
	Maltería	Kg malta producido	1.9	4.6
	Jugos frutas a partir de frutas	L jugo producido	3.6	6.6
	Jugos frutas con concentrados	L jugo producido	0.6	1.1
Industrias azucareras:				
	Lavado y transporte de remolacha	Kg remolacha tratado	81	2.9
	Refinado	Kg azúcar producido	1.5	3.2
Industrias de levaduras:				
	Melaza de azúcares	Kg melaza	19	150
	De otros productos	Kg productos	8	80
Industrias de la leche:				
	Leche, queso, mantequilla	L leche	1.2	3.5
	Sin recuperación de suero y mante		26	46
Mataderos:				
	Transporte hidráulico de materiales residuales	Kg en canal	20	17
	Caballo	Kg en canal	5	14.3
	Tenera	Kg en canal	5	5
	Oveja	Kg en canal	10	27
	Cerdo	Kg en canal	10	9.9
	Aves	Kg en canal	5	5.3
	Tratamiento de subproductos	Kg	5.5	4.6
	Curado	Kg producto	14	11

Industrias de conservas:				
	Legumbres	Kg producto entrado	5	10
	Frutos	Kg producto entrado	7	13
	Carnes	Kg carne entrada	2	5
	Salazones	Kg producto entrado	2	15
	Pescados	Kg producto entrado	13	16
	Industria alimenticia: Confitería	Kg producto terminado	5	9
	Chocolatería	Kg producto terminado	13	14
	Condimentos	Empleado	1500 g/día	1500 g/día
	Café soluble	Empleado	3000 g/día	5000 g/día
	Helados	Empleado	400 g/día	250 g/día
Industria textil				
	Lavado de lanas	Kg lana	80	100
	Industrias de Transformación: Fabricación de fibras artificiales	Kg materia producida	28	35
	Blanqueado	Kg materia producida	6.5	29
	Tinturas	Kg materia producida	32	48
	Lavanderías	Empleado	100 g/día	50 g/día
Industrias de la piel y el calzado				
	Tenería al cromo	Kg piel bruta	50	50
	Tenería vegetal	Kg piel bruta	100	150
	Curtido	Kg piel bruta	200	300
	Gamuza	Kg piel bruta	300	1000
Otras actividades				
		Empleado	100 g/día	50 g/día

1.1.3. Aguas Pluviales

Dentro de este apartado tenemos las aguas de escorrentía urbana que se generan durante episodios de lluvia. Su tratamiento es crucial para prevenir impactos negativos en los cuerpos de agua receptores ya que consigo arrastran gran cantidad de suciedad. (Tchobanoglous et al. 2003) En la tabla 3 se pueden ver los datos de concentración para cada tipo de contaminación de las aguas pluviales.

Tabla 3. Características de la contaminación de las aguas pluviales (Tchobanoglous et al. 2003)

CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS PLUVIALES			
Contaminante	Tipo	Concentración	Unidad
DBO5	Orgánico	25	mg/l
DQO	Orgánico	62	mg/l
SS	Sólidos en Suspensión	231	mg/l
SSV	Sólidos Volátiles	38	mg/l
Nitrógeno	NH3 (Amoníaco)	0.2	mg/l
Nitrógeno	NO2 (Nitritos)	0.05	mg/l
Nitrógeno	NO3 (Nitratos)	0.5	mg/l
NTJ	Orgánico (Nitrógeno Total)	1.4	mg/l
Fósforo	Disuelto	0.46	mg/l
Fósforo	Total	1.15	mg/l
Microorganismos	Coliformes Fecales	106	Nº/100 ml
Microorganismos	Coliformes Totales	9.3 x 10 ⁶	Nº/100 ml
Microorganismos	Estreptococos Fecales	3.2 x 10 ⁴	Nº/100 ml

1.1.4. Aguas Residuales Agrícolas

Resultan del riego agrícola y el escurrimiento de campos de cultivo, transportando residuos de fertilizantes, pesticidas, y restos de suelo procedente de su erosión. Estas aguas pueden contribuir significativamente a la eutrofización de las aguas y para evitarlo debemos tener prácticas agrícolas sostenibles. (Carpenter et al. 1998)

1.1.5. Lixiviados de Vertederos

Los lixiviados son aguas que han pasado a través de desechos sólidos en vertederos, extrayendo compuestos disueltos y suspendidos en el proceso. Son altamente contaminantes y requieren tratamientos especializados para eliminar materia orgánica, metales pesados y otros contaminantes antes de su disposición final. (Kjeldsen et al. 2002) En la Tabla 4 se observan las características de este tipo de aguas residuales en función de la edad de los lixiviados.

Tabla 4. Características principales de los lixiviados según la edad de la masa de residuos. (Teamconcept 2021)

Parámetro	Estado Joven	Estado Intermedio	Estado Maduro

Tiempo en años	Menos de 5	Entre 5 y 10	Más de 10
Rango de pH	Entre 3 y 6	Entre 6 y 7.5	7.5 o más
Demanda Química de Oxígeno (DQO) mg/L	10.000 a 50.000	4.000 a 20.000	Hasta 5.000
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5) mg/L	10.000 a 25.000	1.000 a 4.000	Máximo 1.000
Nitrógeno Amoniacal (NH4+) mg/L	1.500 a 4.250	250 a 700	30 a 200 o menos de 30
Alcalinidad mg/L	8.000 a 18.000	4.500 a 6.000	No aplicable
Fósforo mg/L	100 a 300	10 a 100	Menos de 10
Sulfatos (SO42-) mg/L	500 a 2.000	200 a 1.000	50 a 200 o menos de 50
Sólidos Disueltos Totales mg/L	10.000 a 25.000	5.000 a 10.000	1.000 a 5.000 o menos de 1.000
Tipo de Compuestos Orgánicos	Predominio de Ácidos Grasos Volátiles (~80%)	Mezcla de Ácidos Grasos Volátiles y Ácidos Húmicos/Fúlvicos	Ácidos Húmicos y Fúlvicos predominantemente
Presencia de Metales Pesados	Baja a Media	Baja	Baja
Nivel de Biodegradabilidad	Alta	Media	Baja

1.2. LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES A LO LARGO DE LA HISTORIA

La evolución de la gestión de aguas residuales a lo largo de la historia es un tema fundamental para comprender las prácticas actuales y orientar las futuras estrategias en este ámbito. Este análisis histórico permite identificar los avances tecnológicos, los cambios en las políticas públicas y las modificaciones en la percepción social sobre la importancia del tratamiento de las aguas residuales.

Ya en el siglo III a.C. las ciudades como Mohenjo-Daro y Harappa, pertenecientes a la civilización del Vall del Indo mostraron sistemas de saneamiento avanzados para su tiempo, con redes de alcantarillado y baños en las casas, destacando una temprana comprensión de la importancia de la gestión de aguas residuales.(McIntosh 2008)

El Imperio Romano (800 a.C. - 476 d.C.): destacó por la construcción de infraestructuras, entre ellas la Cloaca Máxima en Roma, evidenciando el desarrollo de sistemas de saneamiento urbanos sofisticados para la gestión de aguas residuales y pluviales. En la Ilustración 1 se observa un primer boceto de mapa con las cloacas en el Imperio Romano.



Ilustración 1. Mapa de las cloacas durante el Imperio Romano (Hopkins 2007)

En la Edad Media el crecimiento de las poblaciones en las urbes llevó a condiciones insalubres, con sistemas de saneamiento inadecuados que contribuyeron a la propagación de enfermedades, entre las que destaca la conocida como Peste Negra. (McIntosh 2008)

Continuando a lo largo de la historia, en el año 1858, la ciudad de Londres fue azotada por lo que se conoce como el "Gran Hedor", una ola de calor donde, a raíz de esta, se realizó un cambio significativo en la historia del saneamiento urbano con la creación del primer sistema de alcantarillado moderno de la ciudad de Londres, diseñado por Joseph Bazalgette, marcando un hito en la gestión de aguas residuales en todo el mundo. (Porter 2001)

Finalmente, el siglo XX vio el desarrollo de tecnologías avanzadas para el tratamiento de aguas residuales, impulsado por una mayor conciencia ambiental y la implementación de regulaciones más estrictas. Destaca el desarrollo del proceso de lodos activos en el año 1914. La innovación continúa en el siglo XXI con el enfoque en la sostenibilidad y la reutilización del agua. (Tchobanoglous et al. 2003)

En la actualidad, a nivel global, el tratamiento y la gestión de las aguas residuales siguen enfrentando desafíos importantes, aunque también se están realizando esfuerzos importantes para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de estos procesos. La producción, recolección, tratamiento y reutilización de aguas residuales han sido objeto de una evaluación global, ofreciendo una perspectiva detallada sobre las necesidades de aceleración para alcanzar el objetivo 6 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para 2030. Este objetivo se enfoca en mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando los vertidos y aumentando significativamente el

reciclaje y la reutilización segura a nivel global. (Gamez 2024) En la Ilustración 2 se tiene, de forma esquemática, la línea de agua y de fangos de una depuradora tipo.

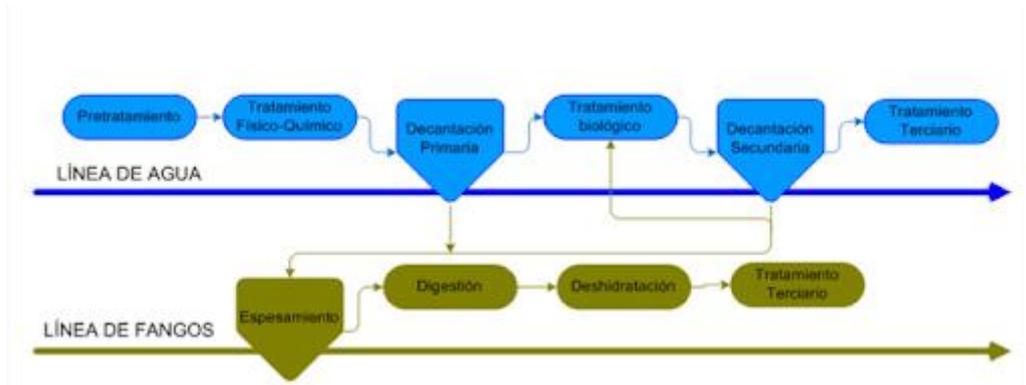


Ilustración 2. Esquema planta depuradora (Valdivielso 2020)

1.3. NORMATIVA APLICABLE

La Directiva de Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas de la Unión Europea, adoptada en 1991, ha sido fundamental en la mejora significativa de la calidad de ríos, lagos y mares en Europa. La directiva establece requisitos claros para la recolección, tratamiento y descarga de aguas residuales urbanas e industriales, asegurando que el tratamiento secundario sea aplicado a todas las descargas de áreas urbanas con más de 2,000 habitantes, y tratamientos más avanzados en áreas con aguas sensibles de más de 10,000 habitantes. Además, se han introducido regulaciones para el control de lodos de depuradora y la reutilización del agua tratada cuando sea apropiado). («Urban wastewater - European Commission» 2024)

Con el paso de los años, la Directiva de Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas ha evolucionado para abordar desafíos emergentes, incluyendo la contaminación por micropoluentes como residuos farmacéuticos y cosméticos, que representan el 92% de los contaminantes tóxicos en las aguas residuales. A pesar de los avances, con más del 90% de las aguas residuales urbanas tratadas según los estándares de la UE, aún existen áreas de preocupación, como la contaminación de fuentes más pequeñas y el manejo de aguas pluviales, que requieren atención adicional.

La revisión de 2022 de la directiva busca adaptarla a los nuevos estándares y desafíos, con el objetivo de reducir aún más la contaminación, el uso de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero. La nueva revisión enfatiza la mejora del acceso a servicios de saneamiento, particularmente para los más vulnerables, y promueve que la industria contribuya al tratamiento de micropoluentes. Además, se insta a los países de la UE a monitorear patógenos en las aguas residuales, liderando hacia un sector más circular. («Urban wastewater - European Commission» 2024)

La normativa española sobre tratamiento de aguas residuales se rige principalmente por la Directiva 91/271/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de aguas residuales urbanas. Además, existen varios reales decretos y resoluciones que establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas, la declaración de zonas sensibles, y la reutilización y gestión de lodos de depuración. Estas regulaciones buscan asegurar un tratamiento adecuado de las aguas residuales para proteger la salud pública y el medio ambiente (Ministerio para la Transición

La Directiva sobre el tratamiento de aguas residuales urbanas, adoptada en 1991, ha logrado una reducción significativa de las emisiones contaminantes, confirmado por una evaluación de la Comisión en 2019. A pesar de estos avances, quedan desafíos como la contaminación en pequeñas aglomeraciones y los micro contaminantes. En respuesta, se proponen nuevas normas para abordar estas fuentes de contaminación, reducir el consumo de energía en el sector y mejorar la contribución del sector a los objetivos climáticos de la UE.

Para mejorar la efectividad en la lucha contra la contaminación, el Consejo ha acordado ampliar el ámbito de aplicación de la Directiva para incluir todas las aglomeraciones con una carga superior a 1.250 habitantes equivalentes, introduciendo obligaciones como la implementación de tratamiento secundario y terciario en plazos específicos. Se introduce además el tratamiento cuaternario para eliminar micro contaminantes en instalaciones de más de 200,000 habitantes equivalentes, con la novedad de que los productores de productos farmacéuticos y cosméticos contribuyan a los costes asociados.

Estas medidas avanzan hacia un sector más sostenible, estableciendo un ambicioso objetivo de neutralidad energética para 2045, donde las plantas de tratamiento deben producir tanta energía como consumen. Además, se enfatiza en la importancia de monitorear parámetros de salud en aguas residuales urbanas para prevenir enfermedades transmisibles. La implementación de estas directrices requerirá planes nacionales detallados, coherentes con los programas de medidas de los planes hidrológicos, asegurando una gestión sostenible del agua. («El Consejo adopta su posición sobre nuevas normas para un tratamiento más eficiente de las aguas residuales urbanas» 2024)

1.4. MULTAS A ESPAÑA

El Tribunal de Justicia de la Unión Europea (TJUE) condenó a España por su retraso en gestionar las obligaciones de tratamiento de las aguas residuales procedentes de nueve aglomeraciones urbanas de más de 15.000 habitantes. La sentencia condena a España a abonar a la Comisión Europea una multa de un importe de 10.950.000 euros por cada semestre de retraso y una suma a tanto alzado de 12 millones de euros. («El Tribunal de Justicia de la UE multa a España por incumplir la directiva de saneamiento y depuración de aguas residuales» 2024)

Mediante esta sentencia, el Tribunal de Justicia declara que España ha incumplido su obligación de dar cumplimiento a una sentencia previa de 2011, del mismo Tribunal, en la que se declaraba que

38 aglomeraciones, distribuidas en el mapa de la Ilustración 3, no cumplían con los requisitos de la Directiva 91/271 de saneamiento y depuración de aguas residuales.



Ilustración 3. Normativa de depuración en España a lo largo de los años https://elpais.com/politica/2018/07/25/actualidad/1532508768_001001.html (Planelles 2018)

En la actualidad, la Comisión Europea ha rebajado el importe de la multa que España paga por el deficiente tratamiento y depuración de aguas residuales urbanas al haber constatado una mejora sustancial y el cumplimiento de las obligaciones en Gijón-Este e Isla Cristina, dos de las ocho aglomeraciones urbanas incluidas en la sentencia. La Comisión Europea ha rebajado el importe de la multa que España paga por el deficiente tratamiento y depuración de aguas residuales urbanas al haber constatado una mejora sustancial y el cumplimiento de las obligaciones en Gijón-Este e Isla Cristina, dos de las ocho aglomeraciones urbanas incluidas en la sentencia. («La mejora en la depuración de aguas residuales urbanas rebaja a menos de un tercio el importe de la multa que España paga a la Comisión Europea» 2024)

A pesar de los avances significativos que España ha ido logrado en los últimos años en la gestión de aguas residuales, aún se enfrenta a un largo recorrido por delante. Para poder conseguir una mejora sustancial, es muy importante aprovechar los Proyectos Estratégicos para la Recuperación y Transformación Económica (PERTE), que son esenciales para fomentar iniciativas innovadoras destinadas a optimizar el tratamiento de las aguas residuales.

En la situación específica de este TFM, resulta crucial emplear el PERTE dedicado a la digitalización del ciclo del agua. Esta medida estratégica permitirá, entre otras acciones, facilitar la digitalización de pequeñas plantas de tratamiento, mejorando significativamente su eficiencia y elevando la

calidad del agua depurada. Además, la implementación del PERTE de Economía Circular es vital para gestionar adecuadamente los residuos generados por las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR), posibilitando la reutilización de subproductos como los fangos y las aguas regeneradas, pudiendo usarse para la limpieza de calles y el regado de zonas verde, entre otras.

Otro objetivo fundamental es lograr la autosuficiencia energética en las depuradoras de pequeñas poblaciones, que actualmente representan una proporción desproporcionadamente alta del consumo energético a pesar de contar con presupuestos más limitados. Este desafío y oportunidad se ilustran claramente en la gráfica adjunta, subrayando la importancia de adoptar medidas efectivas para abordar esta situación.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. JUSTIFICACIÓN Y PROPÓSITO DEL ESTUDIO DE INVESTIGACIÓN

Las aguas residuales se someten a un tratamiento que comprende una serie de procesos físicos, químicos y biológicos para eliminar todos los contaminantes que perjudican a los seres vivos, dependientes del medio receptor y el medio ambiente donde son vertidos los efluentes. Durante la realización de este trabajo se usarán acrónimos para describir diferentes tipo de tratamiento. Estos acrónimos se pueden encontrar en la Ilustración 4.

Tratamiento	Acrónimo	Tratamiento	Acrónimo
Fosa Séptica	FS	Filtro intermitente de Arena (con recirculación)	FAL
Tanque Imhoff	TI	Infiltración-Percolación	IP
Decantación Primaria	DP	Contactador Biológico Rotativo	CBR
Lagunaje	LA	Lecho Bacteriano	LB
Humedal Artificial Flujo Subsuperficial Vertical	HFSV	Aireación Prolongada	AP
Humedal Artificial Flujo Subsuperficial Horizontal	HFSH	Reactor Secuecial	SBR
Filtro de Turba modificado	FT _m ¹	Reactor Biopelícula sobre Lecho Móvil	MBBR
Filtro Intermitente de Arena	FIA		

Ilustración 4. Acrónimos empelados en el presente trabajo para nombrar las tecnologías de depuración (de Miguel et al. 2010)

2.2. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE DEPURACIÓN MÁS UTILIZADOS

Para el desarrollo de este trabajo, se ha realizado una selección cuidadosa de las tipologías de estaciones de tratamiento de aguas residuales, basada en su versatilidad y en su uso más generalizado tanto en España con en Europa.

2.2.1. Reactor biológico secuencial (SBR)

2.2.1.1. Introducción

Los Reactores Biológicos Secuenciales, comúnmente conocidos como sistema SBR, por sus siglas en inglés Sequential Batch Reactor, tiene su origen como una tecnología de la depuración de aguas residuales nueva, innovadora y vanguardista para su época. A este sistema se lo consideró en su día como un sistema innovador gracias a la potente habilidad que tiene para adaptarse a los

cambios que se puedan producir en la carga contaminante. La configuración del SBR se caracteriza por su enfoque secuencial, como dice su nombre, donde comienza por el llenado y a continuación el vaciado, lo que lo convierte, aunque en primera instancia lo parezca, en un método altamente eficiente y versátil. Este proceso se realiza siguiendo un esquema compuesto por varias fases, cada una planificada de forma cuidadosa y muy estudiada para maximizar la eficacia del tratamiento. La flexibilidad del SBR lo convierte en una opción óptima para enfrentarse a desafíos durante su explotación en plantas de tratamiento de aguas residuales. La gestión eficiente de los ciclos permite un control preciso del proceso, mejorando de muy buena forma la eliminación de contaminantes y asegurando resultados consistentes en todo momento. Este sistema destaca por su capacidad para eliminar diferentes tipos de contaminantes, desde materia orgánica hasta compuestos químicos específicos. Gracias a su versatilidad, este sistema de depuración es muy adecuado para un amplio abanico de plantas depuradoras, desde plantas depuradoras en instalaciones industriales hasta en plantas depuradoras municipales. (Alleman y Irvine 1980)

2.2.1.2. *Historia*

Los inicios de este sistema comenzaron hace aproximadamente un siglo, cuando Arden y Lockett publicaron unos primeros estudios a comienzos del siglo XX. Estos estudios estaban basados en experimentos realizados en unos reactores que ellos llamarán Reactores de Llenado y Vaciado, que eran reactores a escala piloto. A pesar de estos estudios, los estudios que les prosiguieron por diversos profesionales no lograron avances significativos hasta que, en 1971, Irvine y David retomaron el desarrollo de estos reactores, marcando un punto crucial en su evolución. En 1983 Sir Thomas Wardle publicó unos nuevos trabajos basado en sus experiencias, ofreciendo una información muy valiosa que revitalizó el interés en los SBR a nivel internacional. Estas contribuciones permitieron que estudios similares se reanudaran de manera extensa en diversos países, marcando un renacimiento en la investigación y desarrollo de esta tecnología. (Dautan et al. 1988)

La publicación de las experiencias de Wardle no solo revitalizó el interés en los SBR, sino que también estableció una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas. A partir de entonces, los Reactores Biológicos Secuenciales se consolidaron como una tecnología fundamental en el tratamiento de aguas residuales, siendo adoptados en plantas de tratamiento en todo el mundo.

2.2.1.3. *Funcionamiento*

Los SBR realizan la depuración en cuatro etapas, cada una de ellas es esencial para conseguir una correcta depuración de las aguas residuales. Estas etapas se realizan de manera secuencial, donde una vez se han realizado las cuatro etapas se consigue la depuración de las aguas. Estas etapas, diseñadas para optimizar la eficiencia del proceso, son las siguientes:

1. Etapa de Llenado: En esta fase, se lleva a cabo la adición de sustrato al reactor mediante el agua procedente del afluente. Este sustrato es fundamental para comenzar con las reacciones biológicas y químicas necesarias para el tratamiento del agua. Es muy

importante controlar de forma correcta la entrada de agua para asegurar el buen comportamiento del proceso.

2. Etapa de Reacción: En esta etapa, el reactor puede someterse o no a aireación, dependiendo de las exigencias específicas del tratamiento, que depende de la carga contaminante que tengamos. Esta flexibilidad permite adaptar el sistema a diversas necesidades de tratamiento, desde aguas negras hasta incluso pequeños vertidos industriales.
3. Etapa de Sedimentación: Durante esta fase, se procede a la decantación de los sólidos, lo que conduce a la clarificación del sobrenadante. Esta separación es esencial para lograr un efluente de calidad, libre de partículas sólidas en suspensión. La eficiencia de la sedimentación contribuye directamente a la calidad del agua tratada.
4. Etapa de Vaciado: La última etapa del ciclo implica la extracción del agua tratada del reactor. Este paso tiene como objetivo principal asegurar la evacuación eficiente del efluente tratado, cumpliendo con los estándares de calidad requeridos para su liberación al medio natural o para su reutilización. (Cárdenas et al. 2006)

Tras explicar cada una de las etapas, en la Ilustración 5 se observa de forma esquemática el funcionamiento de este sistema de depuración.

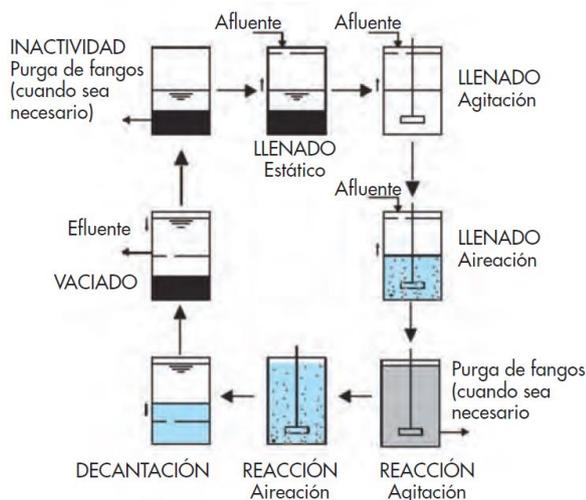


Ilustración 5. Esquema Reactor Secuencial Discontinuo (SBR) (de Miguel et al. 2010)

Es importante destacar que este sistema de reactores discontinuos ofrece la ventaja de lograr la remoción simultánea de diferentes contaminantes, como la materia orgánica (MO), nitrógeno (N) y fósforo (P). Esta capacidad lo convierte en una herramienta versátil y eficaz para abordar múltiples aspectos de la contaminación del agua, contribuyendo así a la preservación y gestión sostenible de este recurso vital. (Cárdenas et al. 2006)

2.2.1.4. Eliminación Fosforo y Nitrógeno

La correcta eliminación del nitrógeno en procesos de tratamiento de aguas residuales implica principalmente dos etapas cruciales: la nitrificación y la desnitrificación. En la fase de nitrificación, el amonio presente en el agua residual es convertido aeróbicamente en nitrato. Este proceso es llevado a cabo por bacterias nitrificantes autotróficas, específicamente nitrosomonas y nitrobacter. Estas bacterias son aerobias obligadas, lo que significa que requieren oxígeno para realizar sus funciones metabólicas.

La combinación de estos dos procesos, nitrificación y desnitrificación ofrece una correcta eliminación del nitrógeno, ayudando a cumplir con los estándares de calidad del agua y evitando los impactos negativos de la contaminación provocada por el nitrógeno en los ecosistemas acuáticos.(Munoz Paredes y Ramos 2014)

La correcta eliminación del nitrógeno en un sistema SBR se logra mediante la implementación de una estrategia que se basa en el cambio entre periodos aerobios o aireados y anóxicos durante el proceso de depuración. La introducción deliberada de un periodo anóxico justo después del periodo de aireación ha demostrado ser una práctica con la que se obtiene buenos resultados para mejorar la eficiencia en la remoción del nitrógeno a través del proceso de desnitrificación. Esta secuencia de operación facilita una remoción eficaz del nitrógeno, contribuyendo así a reducir los niveles de este componente en el efluente tratado. Esto también permite una gestión más eficiente de los recursos y de la energía en el tratamiento de aguas residuales ya que minimiza el consumo de oxígeno durante la fase anóxica y maximiza la eficiencia global del sistema. Esta manipulación precisa de las condiciones operativas destaca cómo la ingeniería de procesos puede potenciar la capacidad de los SBR para cumplir con los estándares ambientales y de calidad del agua, mostrando un enfoque avanzado y sostenible en el tratamiento de aguas residuales.(Mahvi 2008)

La eliminación eficiente del fósforo (P) se posiciona como un componente crucial en la gestión del agua para contrarrestar la eutrofización, fenómeno que puede inducir cambios adversos en la calidad de los cuerpos de agua dulce. Su presencia en exceso puede desencadenar un crecimiento descontrolado de algas y plantas acuáticas, afectando negativamente la salud general del ecosistema. Para eliminar el fósforo en este sistema es necesaria la participación de microorganismos especializados, conocidos como polifosfato acumuladores, que tienen la capacidad de acumular fosfato intracelularmente durante ciertas fases del tratamiento de aguas residuales. Estos microorganismos liberan estratégicamente el fósforo almacenado en respuesta a condiciones ambientales específicas, permitiendo su eliminación del sistema de agua.(Tchobanoglous et al. 2003)

La eliminación efectiva del fósforo se ve influenciada por diversos factores, destacando la composición de las aguas residuales como un elemento crucial. La relación entre la demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno (N) y fósforo (P) en el efluente desempeña un papel determinante. Además, la presencia de cationes en las aguas residuales, la temperatura ambiente, el tiempo de retención de sólidos (TRS), la duración del ciclo del Reactor Biológico Secuencial (SBR) y el tipo de inóculo empleado son elementos fundamentales para optimizar la eliminación de fósforo. El control preciso de las fases anaerobias y aerobias en el proceso también se erige como un elemento clave. La fase anaerobia favorece la acumulación de fósforo intracelular por parte de

microorganismos, mientras que la fase aerobia facilita su liberación, permitiendo su eliminación del proceso. Este control estratégico de las condiciones operativas en el SBR contribuye significativamente a maximizar la eficiencia en la eliminación de fósforo, adaptándose así a las particularidades de las aguas residuales tratadas y asegurando resultados buenos en términos de calidad del agua tratada y cumplimiento de estándares ambientales.(Arun, Mino y Matsuo 1988)

2.2.1.5. *Ventajas y desventajas del sistema*

Ventajas

Este sistema destaca por el mínimo requerimiento de espacio, gracias a la disposición secuencial de las fases de tratamiento en un solo reactor permite una eficiente utilización del espacio, maximizando la capacidad de tratamiento en áreas reducidas. La facilidad de manejo constituye otro aspecto crucial, donde la capacidad de realizar modificaciones en el tratamiento brinda flexibilidad operativa. En términos de control de mantenimiento y operaciones, los SBR ofrecen precisión y versatilidad. La capacidad de controlar de manera precisa las condiciones de funcionamiento, la recolección de datos representativos mediante sensores de toma de muestras y en línea, y el control final de cada reacción biológica y la calidad del efluente permiten una gestión óptima del sistema. Además, los SBR presentan ventajas económicas significativas al no ser unos sistemas con un coste elevado tanto en fase de compra como en fase de explotación ya que la flexibilidad para ajustar y cambiar la duración de las diferentes etapas de tratamiento no solo mejora la eficiencia del proceso, sino que también contribuye a optimizar los costes asociados.(Akin y Ugurlu 2005)

Desventajas

La implementación de sistemas de Reactor Biológico Secuencial (SBR) presenta ciertos desafíos que requieren un nivel mayor de sofisticación en comparación con los sistemas convencionales, especialmente. Este requisito más avanzado se debe a la complejidad inherente de coordinar las distintas fases del proceso en un solo reactor, lo que demanda una gestión precisa de los tiempos y una supervisión detallada. Asimismo, el mantenimiento asociado a los sistemas SBR tiende a ser más elevado en comparación con los sistemas convencionales. Esto se atribuye al uso de controles más sofisticados y válvulas automáticas, que, aunque proporcionan una mayor eficiencia, también requieren una atención más rigurosa para garantizar su funcionamiento óptimo. Otro aspecto para considerar es la posible descarga de lodos flotantes o sedimentados durante la fase de descarga o decantación del reactor en algunas configuraciones de SBR. Este fenómeno puede ser gestionado mediante un diseño cuidadoso y ajustes en la operación para minimizar su impacto en la calidad del efluente. Adicionalmente, existe la posibilidad de taponamiento de los dispositivos de aireación durante ciclos operativos específicos, dependiendo del sistema de aireación utilizado por el fabricante. Este desafío resalta la importancia de seleccionar y mantener adecuadamente los componentes del sistema para asegurar un rendimiento continuo y eficiente.

2.2.2. Sistema MBR: reactor biológico + filtración por membranas

2.2.2.1. Introducción

El sistema MBR, también conocido como biorreactor de membrana (MBR) es una tecnología moderna y avanzada para el tratamiento de aguas residuales la cual combina procesos biológicos con filtración por membranas para proporcionar un tratamiento eficiente y de alta calidad del agua. Los MBRs son reconocidos por obtener al final un efluente de gran calidad, posibilidad de reutilización del agua obtenida, una huella de carbono menor en comparación con sistemas tradicionales, y un mejor control del proceso. Inicialmente, los sistemas MBR utilizaban módulos de membrana de microfiltración (MF) o ultrafiltración (UF) en flujo cruzado, pero esto llevaba consigo un elevado coste operativo haciendo muy complicado la utilización del proceso en agua residuales con gran carga contaminante. Sin embargo, el desarrollo de la tecnología de membranas sumergidas en la década de los 80 redujo el consumo de energía al utilizar aireación para inducir un flujo cruzado y extraer agua purificada mediante un ligero vacío, permitiendo así la adopción de la tecnología MBR para aplicaciones más convencionales. Entre las membranas, las de fibra hueca son las más utilizadas en tecnologías MBR sumergidas basadas en el área de membrana vendida/utilizada a nivel mundial. (Buer y Cumin 2010)

Un desafío importante de los MBR es que con aguas muy contaminadas las membranas se ensucian y se atoran y eso hace que sea necesaria una mayor aireación y por ende y mayor consumo energético. Aunque los mecanismos exactos del ensuciamiento de membranas aún no se comprenden completamente, lo que dificulta su control mediante un modelo determinista o una ley matemática pura, se ha propuesto un sistema de detección inteligente para evaluar el rendimiento del MBR prediciendo la permeabilidad de las membranas. Este sistema pretende reducir el ensuciamiento de las membranas y mantener niveles de eficacia comparables a los sistemas convencionales basados en características de tiempo y frecuencia. (Han et al. 2018)

El sistema MBR puede considerarse una solución avanzada y fiable para el tratamiento de aguas residuales, siendo uno de sus puntos fuertes la capacidad de generar efluentes de alta calidad haciendo viable la reutilización de este efluente. La integración de la filtración por membranas con el tratamiento biológico mejora significativamente la calidad del efluente mientras ofrece ventajas en términos de eficiencia operativa y espacio requerido.

2.2.2.2. Historia

Este sistema ha ido evolucionando de manera significativa desde sus comienzos, combinando la biodegradación con la filtración por membranas para tratar aguas residuales. Los sistemas MBR primarios utilizaban módulos de membrana de microfiltración (MF) o ultrafiltración (UF) en flujo cruzado, pero esto conllevaba un alto consumo energético, ocasionado su no tan fácil uso en localizaciones con aguas muy contaminadas. En la década de 1980, el desarrollo con tecnología de membranas sumergidas redujo el consumo energético utilizando aireación para inducir un flujo cruzado y extraer agua purificada mediante un ligero vacío, lo que permitió la adopción de la tecnología MBR para aplicaciones en poblaciones de diferentes tipos de aguas residuales. (Buer y Cumin 2010)

Desde mediados de los años noventa, la tecnología MBR se introdujo en el tratamiento de aguas residuales municipales en Europa. Las primeras plantas de tratamiento de aguas residuales comenzaron realizando un tratamiento mecánico convencional sin ninguna unidad avanzada de pretratamiento mecánico. Después de un corto período de operación, se observó la formación de madejas entre las membranas, lo que llevó a la actualización del pretratamiento mecánico introduciendo tamices principalmente para reducir cabellos y sustancias fibrosas. (Kjeldsen et al. 2002)

Se ha comprobado la eficacia de las membranas de microfiltración de fibra hueca sumergidas en un biorreactor para la eliminación de demanda química de oxígeno (DQO), sólidos en suspensión totales (SS) y turbidez de aguas residuales municipales que contienen aguas residuales industriales, lo que muestra las altas eficiencias de tratamiento y un gran futuro de esta tecnología para diversas aplicaciones en la reutilización de efluentes de aguas residuales. (Naghizadeh et al. 2011)

2.2.2.3. *Funcionamiento*

El sistema de biorreactor de membrana (MBR) une el tratamiento biológico con la filtración por membranas para el tratamiento de aguas residuales, como ya hemos comentado. Este proceso se inicia con la fase biológica, donde las aguas residuales se introducen en el reactor y la biomasa existente que está compuesta principalmente por microorganismo, descompone los contaminantes orgánicos. (Naghizadeh et al. 2011)

En este sistema en vez de utilizar decantadores secundarios tradicionales para separar los sólidos biológicos del agua tratada, el MBR emplea membranas de microfiltración o ultrafiltración sumergidas directamente en el reactor biológico. Estas membranas sirven como barreras físicas que retienen la biomasa y permiten el paso del agua tratada. Gracias a este proceso la calidad del efluente mejora notablemente gracias a la capacidad de las membranas de retener sólidos suspensión y microorganismos, resultando en agua de salida de baja turbidez y alta calidad para su reutilización. (Buer y Cumin 2010)

Este esquema tipo de un sistema MBR lo podemos ver fácilmente de manera esquemática en la Ilustración 6:



Ilustración 6. Esquema tipo de un sistema MBR («Bioreactor de membrana MBR» 2024)

Para optimizar la eficiencia y reducir el consumo energético, se han desarrollado estrategias para el manejo del ensuciamiento de membranas, incluyendo la aireación intensiva cerca de la superficie de las membranas. Esta técnica es ventajosa porque mantiene en buen estado y limpias las membranas, además proporciona oxígeno necesario para el proceso biológico, favoreciendo la actividad microbiana y la descomposición de los contaminantes, siendo muy eficiente. (Kjeldsen et al. 2002)

Este sistema es muy interesante ya que combina un tratamiento biológico junto con la filtración por membranas, y además sigue en continua evolución en el diseño y en la operación de las membranas que refuerzan su eficacia y sostenibilidad junto con tecnología avanzada para el tratamiento y reutilización de aguas residuales.

2.2.2.4. Eliminación Fosforo y Nitrógeno

La eliminación de fósforo y nitrógeno en los sistemas de depuración MBR es un proceso crucial y muy importante para un correcto tratamiento de aguas residuales, cuyo objetivo principal es poder cumplir con los valores de descarga al medio natural y además promover la reutilización del agua. A continuación, se detalla cómo se aborda la eliminación de estos nutrientes en los sistemas MBR.

Gracias a la realización de varios estudios relacionados con este sistema de depuración se pudo demostrar la capacidad de eliminar simultáneamente nitrógeno (N) y fósforo (P) al alimentar el sistema con aguas residuales con diferentes cargas. La modificación de la alimentación teniendo aguas residuales débiles hizo al sistema más eficaz en la eliminación de nitrógeno y fósforo, indicando que la asignación de DQO para la desnitrificación en la zona anóxica era clave para aumentar la eliminación biológica de fósforo. Además, se observó que los organismos que acumulan fósforo y desnitrifican jugaban un papel crucial llegando a conseguir una eliminación de hasta el 40% de P junto con N. (Lee, Han y Yun 2009)

Se ha comprobado que para la eliminación simultánea de fósforo y nitrógeno en las aguas residuales se podría combinar un sistema de reactor de lecho fluidizado y el biorreactor de membrana (FBR-MBR). La recuperación previa de fósforo como estruvita en el reactor de lecho fluidizado (FBR) mejoró la eficiencia de eliminación de nitrógeno y la DQO en el MBR. Bajo condiciones óptimas de operación, se alcanzaron eficiencias de eliminación de $PO_4(3-)-P$, $NH_4(+)-N$, y DQO de $92.6 \pm 4.2\%$, $98.7 \pm 1.2\%$, y $99.3 \pm 0.5\%$, respectivamente. Para conseguir estos valores de eliminación es muy importante controlar las condiciones de operación, es decir, comprobar varios valores como el pH y los ciclos de aireación intermitente, para maximizar la eficiencia de eliminación de nutrientes. (Guadie et al. 2013)

La eliminación de nitrógeno y fósforo utilizando este proceso hace un importante hincapié en que, aunque esta tecnología es capaz de tratar aguas residuales urbanas consiguiendo una baja concentración de sólidos en suspensión en el efluente final, no es capaz de eliminar correctamente nitrógeno y fósforo para cumplir con la normativa actual. Debido a ellos es muy necesario mejorar la capacidad de eliminación de nitrógeno y fósforo en la unidad biológica del MBR. Es un tema a la orden del día que se sigue investigando. (Sun, Wang y Li 2013)

2.2.2.5. *Ventajas y desventajas del sistema*

Ventajas

Los sistemas de biorreactores de membrana (MBR) han conseguido ser un sistema con una innovación significativa en el campo del tratamiento de aguas residuales, ya que con este sistema se han juntado la eficiencia del tratamiento biológico con la precisión de la filtración por membranas haciendo que el agua obtenida tenga una alta calidad. Entre las ventajas que tiene este sistema destaca lo ya comentado anteriormente, la calidad del efluente es excepcionalmente alta, lo que permite su reutilización de una forma más sencilla. Entre las posibles opciones de reutilización destaca su aplicación en sistemas que requieren altos estándares de calidad del agua, como la agricultura, la recarga de acuíferos, e incluso se ha llegado a usar en industrias. Además, los sistemas MBR son compactos, ocupan un espacio significativamente menor que los sistemas de tratamiento convencionales, lo que los hace ideales para instalaciones en áreas urbanas densamente pobladas o en sitios donde el espacio es un recurso valioso. (Buer y Cumin 2010)

La operación de los sistemas MBR también se caracteriza por su gran flexibilidad, permitiendo ajustes eficientes ante variaciones en las cargas de contaminación y flujos de entrada, lo cual es especialmente útil en entornos con demandas fluctuantes. (Gil et al. 2010)

Desventajas

Este sistema también tiene desventajas que hay que tener en cuenta. El coste inicial y los gastos de operación y mantenimiento pueden llegar a ser muy elevados, principalmente debido a la necesidad de membranas especializadas y sistemas de control avanzados para prevenir y mantener en buen estado membranas, sobre todo debido a la acumulación de fango, un fenómeno que puede reducir la eficacia del tratamiento y aumentar los requisitos de mantenimiento. Este ensuciamiento

es quizás el desafío más persistente asociado con la tecnología MBR, ya que puede comprometer el rendimiento del sistema y requiere mucho mantenimiento especializado. En la Ilustración 7 se observa las diferencias entre un sistema MBR y un sistema convencional, donde la mayor diferencia se aprecia en las membranas especializadas de este sistema. Además, los sistemas MBR tienen un consumo energético mayor en comparación con los métodos tradicionales de tratamiento de aguas residuales. Este aumento se debe en gran parte a la alta necesidad de aireación necesaria para realizar la biodegradación y para mantener en buen estado las membranas. (Fenu et al. 2010)

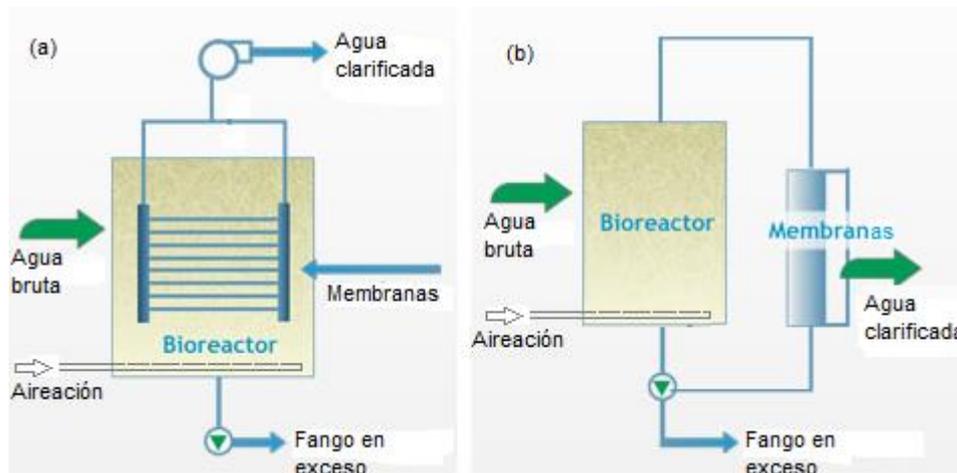


Ilustración 7. Diferencias entre un sistema biológico convencional y un sistema MBR («Bioreactor de membrana MBR» 2024)

2.2.3. Contactores biológicos rotativos (CBR)

2.2.3.1. Introducción

Los Contactores Biológicos Rotativos (CBR) son una tecnología usada para el tratamiento de aguas residuales que combina eficiencia en la remoción de contaminantes orgánicos con costes operativos y de mantenimiento relativamente bajos. Destacan por su simplicidad operativa, baja producción de lodos, requerimientos reducidos de espacio y mantenimiento bajo. Una de las características más atractivas de los CBR es su capacidad para lograr una nitrificación/desnitrificación completa variando el nivel de inmersión de los discos y operando bajo condiciones anaeróbicas/anóxicas en una sola unidad. Los CBR han demostrado resultados prometedores en la eliminación de materia biodegradable, nitrógeno y fósforo, convirtiéndolos en una opción viable para el tratamiento de aguas residuales municipales y de pequeñas comunidades. (Waqas y Bilad 2019)

Los CBR funcionan mediante un proceso de crecimiento adherido, donde una serie de medios plásticos giratorios están revestidos con una capa de biofilm. Este biofilm aeróbicamente reacciona con las sustancias en un flujo de desechos para la bio-oxidación y nitrificación, o reacciona anaeróbicamente para la desnitrificación. (Patwardhan 2003)

En sus primeros comienzos, los CBR han tenido una gran variedad de problemas, sobre todo relacionados con su diseño ingenieril. Principalmente era afectados por corrosión y la corrosión influenciada microbiológicamente. Con el paso de los años se ha realizado un nuevo enfoque en el diseño de los CBR, resultando en una nueva generación de diseños de CBR con una vida útil más elevada junto con unos costes de operación y mantenimiento bajos. (Mba, Bannister y Findlay 1999)

Con el paso de los años este sistema ha conseguido tener un gran potencial como tecnología alternativa al proceso convencional de lodos activos, ofreciendo una solución eficiente para el tratamiento de aguas residuales con requerimientos energéticos y de espacio reducidos, y una operación simple. (Patwardhan 2003)

Este sistema de depuración suele tener varias etapas, como se ve en la Ilustración 8, consiguiendo así una mejor eficacia en el tratamiento de las aguas residuales.

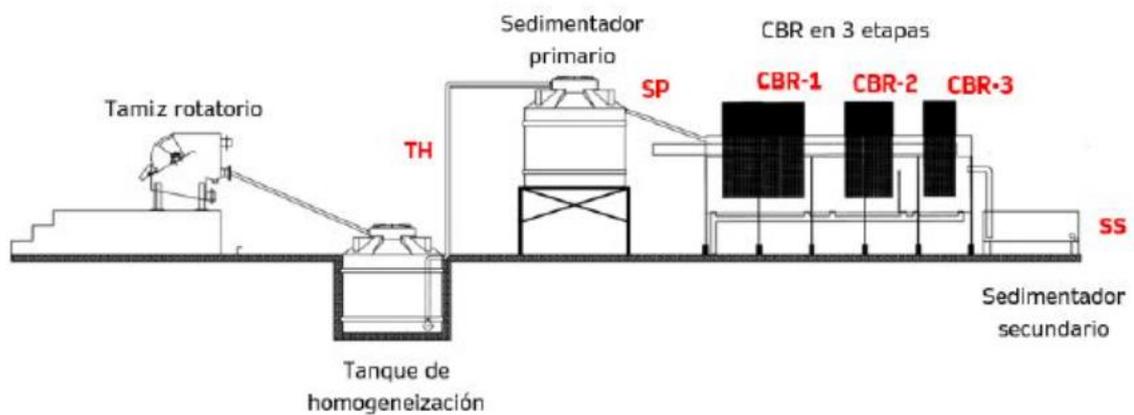


Ilustración 8. Esquema tipo de un CBR (Echeverría et al. 2020)

Los CBR ofrecen una solución prometedora para el tratamiento de aguas residuales, aprovechando la simplicidad de su diseño y operación para ofrecer un tratamiento eficaz con beneficios adicionales en términos de sostenibilidad y eficiencia energética.

2.2.3.2. Historia

La evolución de los Contactores Biológicos Rotativos (CBR) desde sus comienzos hasta la actualidad es un claro ejemplo de progreso continuo para el tratamiento de aguas residuales. Este sistema, que combina la eficiencia en la eliminación de contaminantes orgánicos con costes operativos bajos, ha ganado reconocimiento por su simplicidad de operación, producción limitada de lodos, y requerimientos reducidos de espacio y mantenimiento. Los CBR han demostrado ser particularmente efectivos en la remoción de materia biodegradable, nitrógeno y fósforo, convirtiéndose en una solución viable para el tratamiento de aguas residuales tanto municipales como de pequeñas comunidades. Esta tecnología ha evolucionado para incluir diseños mecánicos

mejorados, superando desafíos iniciales relacionados con la durabilidad y eficiencia del sistema. (Waqas y Bilad 2019)

Desde sus comienzos en la década de 1960, los CBR han sido sometidos a una serie de mejoras destinadas a optimizar su rendimiento, extender su vida útil y disminuir los costes de operación y mantenimiento. El entendimiento detallado de los procesos biológicos involucrados y las innovaciones en el diseño mecánico han permitido abordar eficazmente los fallos mecánicos y mejorar la eficacia de la eliminación de contaminantes. Como resultado, los diseños actuales de CBR ofrecen una operación confiable con una vida operativa garantizada, marcando un antes y un después en la historia de esta tecnología. (Mba, Bannister y Findlay 1999)

Ya en los años 2000 este sistema de depuración de aguas destaca por sus avances en la comprensión de su funcionamiento, incluyendo la importancia de parámetros como la velocidad de rotación, las cargas orgánicas e hidráulicas, y el tiempo de retención hidráulica. Este enfoque integral ha facilitado el desarrollo de modelos para el diseño de sistemas CBR más eficientes y adaptados a las necesidades específicas del tratamiento de aguas residuales. (Patwardhan 2003)

La historia de los CBR refleja un camino de innovación continua, donde la investigación y el desarrollo han jugado roles clave en la mejora de esta tecnología de tratamiento de aguas residuales. Desde sus inicios hasta la actualidad, los CBR se han establecido como una opción eficiente y sostenible, ofreciendo soluciones adaptadas a los desafíos del tratamiento de aguas en diversas aplicaciones.

2.2.3.3. *Funcionamiento*

El funcionamiento de los Contactores Biológicos Rotativos (CBR) se basa en un proceso de tratamiento biológico donde los microorganismos adheridos a medios rotativos descomponen la materia orgánica y otros contaminantes presentes en las aguas residuales. Estos sistemas utilizan discos de plástico o de otro material que giran lentamente, sumergidos parcialmente en el agua residual. El movimiento rotativo facilita la oxigenación del biofilm, permitiendo que los procesos aeróbicos y anaeróbicos ocurran eficientemente.

La eficacia de los CBR en la eliminación de materia orgánica, nitrógeno y fósforo se destaca por su simplicidad de operación y mantenimiento, su baja producción de lodos y la pequeña huella que requieren. El proceso de tratamiento en los CBR puede ser optimizado ajustando variables como el nivel de inmersión de los discos, la velocidad de rotación, y el tiempo de retención hidráulica, lo cual permite lograr la nitrificación y desnitrificación en una sola unidad. (Waqas y Bilad 2019)

Los discos giratorios proporcionan una superficie extensa para el crecimiento de biofilm, donde ocurren la bio-oxidación y la nitrificación. Para el correcto funcionamiento de este sistema de tratamiento de aguas residuales se destaca la importancia de la selección adecuada de los medios, la velocidad de rotación, y el manejo del flujo de aguas residuales para optimizar el tratamiento. (Patwardhan 2003)

A lo largo de los años, los CBR han sido objeto de mejoras continuas para superar desafíos operativos y mecánicos, tales como la corrosión y el desgaste de los medios rotativos. La

introducción de diseños mecánicos más robustos y materiales resistentes ha mejorado la durabilidad y el rendimiento de estos sistemas, resultando en una tecnología de tratamiento más confiable y eficiente. Estos avances han extendido la vida útil de los CBR y reducido la necesidad de mantenimiento, haciéndolos aún más atractivos para una amplia gama de aplicaciones de tratamiento de aguas residuales (Mba, Bannister y Findlay 1999)

2.2.3.4. Eliminación Fosforo y Nitrógeno

La eliminación de nitrógeno y fósforo en los Contactores Biológicos Rotativos (CBR) se logra a través de una combinación de procesos biológicos que aprovechan las capacidades naturales del biofilm que se desarrolla en los discos rotativos. Estos sistemas se han utilizado con éxito para la remoción de materia orgánica y la nitrificación completa bajo condiciones de proceso adecuadas. La adaptabilidad de los CBR para la desnitrificación también ha sido documentada, con tasas de eliminación elevadas en aguas residuales ricas en nitrógeno. Aunque los CBR han tenido un éxito limitado en la remoción biológica mejorada de fósforo, se ha logrado hasta un 70% de eliminación de fósforo total en ciertas configuraciones. Comparados con otros procesos de biofilm, los CBR tienen costes energéticos un 35% inferiores a los de los filtros percoladores, aunque demandan más energía que los sistemas de humedales. Sin embargo, su huella de tierra para el mismo nivel de tratamiento es menor que estas alternativas. Los sistemas CBR también han sido utilizados para la eliminación de contaminantes prioritarios como fármacos y productos de cuidado personal, logrando eliminar el 99% de coliformes fecales y la mayoría de otros patógenos en aguas residuales. (Hassard et al. 2015)

En cuanto a la eliminación de fósforo, los CBR han mostrado resultados variados. Aunque el sistema ha sido adaptado con éxito limitado para la remoción biológica mejorada de fósforo, algunos estudios han logrado hasta un 70% de eliminación de fósforo total. La eliminación de fósforo en los CBR se atribuye a la adsorción por parte del biofilm y la precipitación con medios del sistema. Sin embargo, es importante señalar que, aunque los CBR son eficaces para la eliminación de nitrógeno, la eliminación de fósforo puede requerir condiciones específicas o modificaciones operativas para alcanzar eficiencias de remoción más altas. Los sistemas CBR destacan por su bajo coste operativo y su simplicidad, pero la optimización de estos sistemas para la eliminación de fósforo y nitrógeno puede requerir una consideración cuidadosa de las condiciones de operación y posiblemente la integración con otras tecnologías de tratamiento para mejorar la remoción de estos nutrientes. (Hassard et al. 2015)

2.2.3.5. Ventajas y desventajas del sistema

Los Contactores Biológicos Rotativos (CBR) ofrecen una tecnología alternativa para el tratamiento de aguas residuales, superando a los procesos convencionales de lodos activos en varios aspectos.

Ventajas:

Una de las principales ventajas de los CBR es su alta eficiencia en la transferencia de oxígeno. El diseño de los discos rotativos permite una óptima oxigenación del biofilm, lo cual es fundamental

para procesos aeróbicos de tratamiento como la nitrificación. Esta eficiencia se traduce en una alta tasa de eliminación de contaminantes orgánicos y nutrientes, como el nitrógeno amoniacal, incluso en flujos de agua residuales con variaciones significativas en su composición. (Patwardhan 2003)

Otra ventaja importante de los CBR es su simplicidad operativa y el bajo mantenimiento que requieren. A diferencia de los sistemas de lodos activos, que pueden ser complejos y laboriosos de operar, los CBR tienen un diseño mecánico sencillo sin partes móviles sumergidas, lo que reduce significativamente la necesidad de intervenciones de mantenimiento y, por tanto, los costes operativos asociados. Los CBR también se destacan por su baja producción de lodos y su compacta huella de espacio. Dado que el tratamiento se lleva a cabo por microorganismos adheridos a los discos rotativos, la cantidad de biomasa excesiva y lodo que necesita ser manejado es menor en comparación con otros procesos biológicos. Esto simplifica la gestión de residuos y reduce la necesidad de áreas extensas para el tratamiento, lo que los hace especialmente útiles en áreas donde el espacio es limitado. (Waqas y Bilad 2019)

Desventajas:

Una de las principales desventajas de los CBR es la necesidad de optimización continua para mantener la eficacia del tratamiento. Los parámetros operativos, como la velocidad de rotación de los discos, la carga orgánica e hidráulica, y el nivel de inmersión de los discos, deben monitorearse y ajustarse regularmente para asegurar la máxima eficiencia del sistema. Esto puede requerir un conocimiento especializado y aumentar la complejidad de la operación del sistema. Otra limitación significativa es su capacidad relativamente limitada para la remoción de fósforo. Aunque los CBR son efectivos para la eliminación de materia orgánica y pueden ser optimizados para la nitrificación y la desnitrificación, la remoción de fósforo puede ser menos eficiente. Esto significa que, en algunos casos, pueden ser necesarios tratamientos adicionales o procesos complementarios para alcanzar los niveles deseados de eliminación de fósforo, lo que puede aumentar los costes y la complejidad del tratamiento general de aguas residuales. La vulnerabilidad a las fluctuaciones en la calidad del agua de entrada es otra desventaja de los CBR. Cambios significativos en la composición o la carga contaminante del agua residual pueden afectar la eficiencia del sistema y requerir ajustes operativos rápidos para evitar la disminución del rendimiento del tratamiento. Esto hace que los CBR sean menos flexibles en comparación con otros sistemas de tratamiento que pueden manejar variaciones más amplias en la calidad del agua de entrada sin una disminución significativa en el rendimiento. (Waqas y Bilad 2019)

2.2.4. Humedales artificiales de flujo superficial H y V

2.2.4.1. *Introducción*

Los humedales artificiales de flujo superficial se han convertido en una tecnología muy usada para el tratamiento de aguas residuales ya que ofrece varias ventajas al imitar los procesos naturales de depuración de los humedales naturales. Este sistema de depuración aprovecha los procesos naturales que se dan con la vegetación de los humedales, los suelos de los propios humedales y las comunidades microbianas asociadas, con el fin de tratar el agua residual. Los humedales artificiales de flujo superficial pueden clasificarse, según el régimen de flujo, en sistemas de flujo superficial (SF o free water surface, FWS) y de flujo subsuperficial (SSF). Los sistemas de flujo superficial son particularmente interesantes por su capacidad para tratar una amplia gama de aguas residuales, entre estas están las aguas residuales municipales y domésticas, así como las industriales y las agrícolas. En las últimas décadas, los sistemas de flujo superficial han ido evolucionando y se han empleado además de para los contaminantes comunes también para parámetros especiales como fármacos, químicos disruptores endocrinos o sulfonatos de alquilbenceno lineal..(Vymazal 2005)

Esta tecnología se caracteriza por su facilidad de operación y por sus ventajas en términos de costes de mantenimiento y operación, lo que la hace especialmente adecuada para el tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Los humedales artificiales de flujo superficial aprovechan los procesos naturales que involucran la vegetación, los suelos y las comunidades microbianas para tratar eficazmente el agua. A lo largo de los años, se han desarrollado para tratar no solo contaminantes convencionales, sino también compuestos emergentes como fármacos, químicos disruptores endocrinos y sulfonatos de alquilbenceno lineal (LAS), demostrando su capacidad para adaptarse y mejorar continuamente frente a nuevos desafíos ambientales.(Jian 2010)

La implementación de estos sistemas ofrece varios beneficios, entre ellos la eliminación efectiva de nutrientes, sólidos suspendidos, contaminantes orgánicos y patógenos, lo que resulta en un efluente de alta calidad adecuado para diversos usos, incluida la recarga de acuíferos y la irrigación. Además, los humedales artificiales ofrecen ventajas ambientales significativas, como la creación de hábitats para la vida silvestre y la mejora del paisaje, contribuyendo así a la conservación de la biodiversidad y al embellecimiento de las áreas donde se instalan. Sin embargo, la eficacia este sistema depende de varios factores, incluido u adecuado diseño del sistema, la selección correcta de plantas, la gestión del flujo de agua y el mantenimiento del sistema

2.2.4.2. *Historia*

Los humedales artificiales de flujo superficial han ido creciendo en gran medida desde sus comienzos alrededor de los años 50 del siglo pasado, cuando la Dra. Käthe Seidel en Alemania comenzó a experimentar con el uso de plantas de humedales para tratar aguas residuales. La primera implementación a gran escala de estos sistemas ocurrió a finales de los años 60, marcando el inicio de esta nueva tecnología que imitando los procesos naturales trataba de forma eficaz las aguas residuales. Durante las décadas siguientes, los humedales de flujo subsuperficial se hicieron populares en Europa, mientras que, en Norteamérica y Australia, los sistemas de flujo superficial

(FWS) fueron los más usados. La tecnología de humedales artificiales se estancó durante las décadas de 1970 y 1980, pero desde la década de 1990, se ha comenzado a investigar más gracias al intercambio de conocimientos entre científicos e investigadores de todo el mundo. Este intercambio fue crucial para adaptar la tecnología a la necesidad de eliminar más efectivamente el amoníaco y el nitrógeno total, combinando humedales de flujo vertical y horizontal para lograr una mayor eficiencia de tratamiento. (Vymazal 2005)

La historia de este sistema de depuración refleja una trayectoria de innovación y adaptación, desde su concepción a mediados del siglo pasado hasta su reconocimiento actual como una solución sostenible y eficaz para la gestión del agua residual. Su evolución subraya la importancia de la investigación y el desarrollo continuos para enfrentar los desafíos del tratamiento de aguas residuales de manera ecológica y económica. En la actualidad, los humedales artificiales son reconocidos como una tecnología de tratamiento de aguas residuales confiable y versátil, adecuada para una amplia gama de aplicaciones.

2.2.4.3. *Funcionamiento*

Los humedales artificiales de flujo superficial imitan los procesos de depuración de los humedales que se encuentran en la naturaleza para tratar las aguas residuales. El agua fluye sobre la superficie de estos humedales artificiales o justo por debajo de los mismos, exponiendo al agua a una interacción directa con las plantas y microorganismos presentes en el sistema. Esta interacción desencadena una serie de procesos biológicos, químicos y físicos esenciales para la eliminación de contaminantes. Entre estos procesos se encuentran la filtración física, que retiene partículas y sedimentos; la absorción de nutrientes por las plantas; y diversas reacciones químicas y biológicas que transforman y degradan los contaminantes presentes en el agua. Además, la presencia de vegetación no solo contribuye al tratamiento del agua, sino que también crea hábitats para la vida silvestre y mejora el paisaje, ofreciendo así beneficios ambientales adicionales. A pesar de los desafíos operativos y de diseño, como la obstrucción por sedimentos y el crecimiento excesivo de vegetación, los humedales artificiales de flujo superficial representan una solución efectiva y sostenible para el tratamiento de aguas residuales, combinando la eficacia en la eliminación de contaminantes con ventajas ecológicas y estéticas. (Lavrníć et al. 2020)

La Ilustración 9 presenta de manera esquemática el funcionamiento de los humedales artificiales de flujo superficial horizontal y vertical.

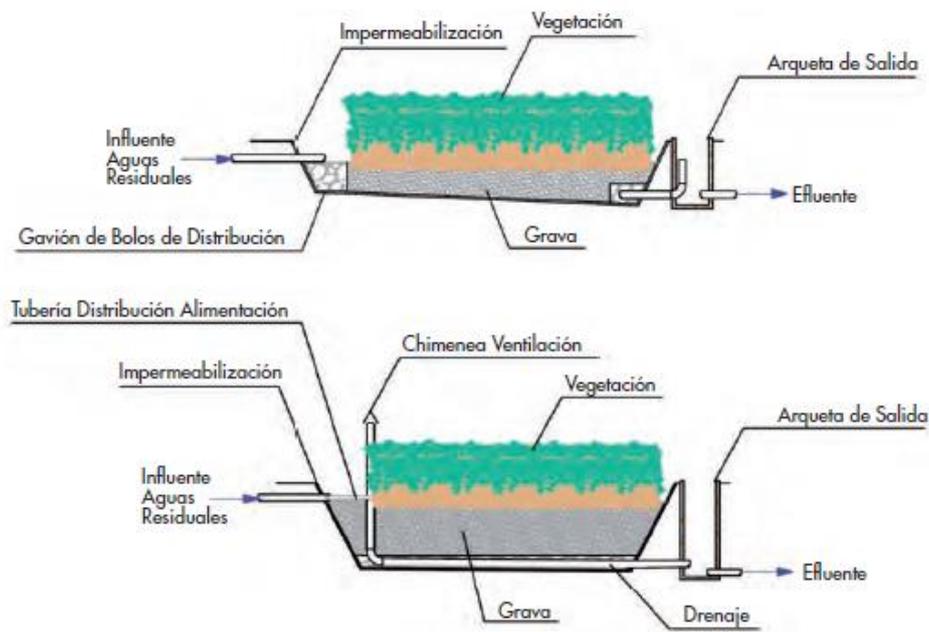


Ilustración 9. Esquema tipo de humedales artificiales de flujo superficial H y V (de Miguel et al. 2010)

Además, estos sistemas han demostrado ser muy eficaces en la eliminación de fosforo nitrógeno, algo muy importante en la actualidad. La eliminación se lleva a cabo a través de procesos como la nitrificación y la desnitrificación para el nitrógeno, y la absorción por las plantas y la precipitación en el sustrato para el fósforo. Estos mecanismos dependen en gran medida de la interacción entre las plantas acuáticas y los microorganismos en el humedal, así como de las condiciones físicas y químicas del sistema. Aunque la eficiencia puede variar en función de la carga de contaminantes, las condiciones climáticas y las características específicas del diseño del humedal, la optimización de estos factores puede mejorar significativamente la capacidad del sistema para tratar eficientemente estos nutrientes. (Li et al. 2018)

Por lo tanto, los humedales artificiales de flujo superficial se presentan como una tecnología de tratamiento de aguas residuales altamente versátil y ambientalmente beneficiosa, capaz de abordar una amplia gama de contaminantes a través de procesos naturales mejorados. La investigación continua y el desarrollo de estos sistemas son esenciales para maximizar su eficacia y aplicabilidad en diferentes contextos y para una variedad de aguas residuales.

2.2.4.4. Eliminación Fosforo y Nitrógeno

La eliminación de nitrógeno y fósforo en los humedales artificiales de flujo superficial es un proceso complejo, como ya hemos indicado anteriormente. Este proceso es complejo debido a que involucra varios mecanismos biológicos, químicos y físicos. Estos sistemas están diseñados para imitar las funciones de los humedales naturales, proporcionando un entorno favorable para la

depuración del agua a través de la interacción del agua con una matriz de plantas, microorganismos y sustratos.

Gracias a la realización de un estudio a escala real sobre un humedal de flujo superficial de 900 m² se ha podido comprobar que la remoción de nitrógeno (N) y fósforo (P) aumentó del 47.1% y el 17.6%, respectivamente, en el primer año, al 52.3% y el 32.4%, respectivamente, en el segundo año. Este incremento en la eliminación de nutrientes se atribuyó en gran medida al aumento de la biomasa de las plantas, lo que mejoró las condiciones redox en la capa del sustrato, contribuyendo así a la eficiencia de la eliminación de N. Se observó que, en comparación con *Typha orientalis*, *Phragmites australis* fue más competitiva y se adaptó mejor a las condiciones del humedal, contribuyendo significativamente a la eliminación de nutrientes (Dzakpasu et al. 2015)

En otro estudio sobre humedales subsuperficiales de flujo horizontal evaluados para la eliminación de N y P en el agua de escorrentía de un vivero de plantas, se encontró que los humedales plantados lograron una eliminación de más del 96% de N y P durante la mayor parte del período de estudio de 19 meses, mientras que los humedales no plantados fueron ineficientes, mostrando menos del 16% de eliminación de N y menos del 45% de eliminación de P. La duplicación del tiempo de reacción a 7 días no tuvo efecto en la eliminación de nutrientes. La absorción de nutrientes por las plantas representó la mayor parte del N (76%) y P (86%) eliminados, siendo las raíces y rizomas los principales sumideros (N 58%, P 67%). La adición de metanol a los humedales no plantados logró una eliminación de N del 81-98%. (Boelee et al. 2011)

2.2.4.5. *Ventajas y desventajas del sistema*

Ventajas

Una de las principales ventajas de estos sistemas de depuración es que son capaces de eliminar una amplia gama de contaminantes, incluyendo nutrientes como nitrógeno y fósforo, difíciles de eliminar en muchos casos, materia orgánica, sólidos en suspensión y patógenos. Esto hace este sistema adecuado para el tratamiento de diferentes tipos de aguas residuales, desde municipales hasta industriales y agrícolas. (Vymazal 2009)

Además de tratar las aguas residuales, los humedales artificiales contribuyen a la biodiversidad y pueden mejorar el paisaje. Crean hábitats valiosos para diversas especies de flora y fauna, y pueden ser diseñados como espacios recreativos para las comunidades locales. (Kadlec 1995)

También destaca este sistema gracias a que su operación y mantenimiento generalmente cuesta menos en comparación con las tecnologías de tratamiento convencionales. Estos sistemas no requieren energía adicional para la depuración del agua, lo que reduce significativamente los costes operativos. (Greenway 2005)

Desventajas

Para el caso de estudio, este sistema, a pesar de su eficiencia, necesitan áreas relativamente grandes para ser efectivos, lo que puede limitar su aplicación en zonas urbanas densamente pobladas o en lugares donde el terreno es escaso. (Van de Moortel et al. 2009)

Otra desventaja de este sistema es que la eficacia suele variar debido a los cambios en la calidad del agua de entrada, las condiciones climáticas y estacionales, y el propio desarrollo de la vegetación. Esto requiere un monitoreo constante y ajustes en el manejo para mantener la eficiencia del tratamiento (Díaz, O'Geen y Dahlgren 2012)

Así mismo la acumulación de sedimentos y la proliferación de raíces pueden llevar a la obstrucción de los flujos dentro del humedal, afectando la eficiencia hidráulica y la capacidad de tratamiento. Esto puede requerir intervenciones de mantenimiento para asegurar el flujo adecuado y la distribución del agua a través del sistema. (Lavrnić et al. 2020)

2.2.5. Lagunas artificiales

2.2.5.1. *Introducción*

Las lagunas artificiales representan una de las técnicas más antiguas y efectivas para el tratamiento de aguas residuales. Desde los sistemas iniciales de flujo subsuperficial las lagunas han demostrado ser soluciones versátiles y eficaces para la depuración del agua. Esta técnica de depuración ha ido adaptándose a la eliminación más eficiente de amoníaco y nitrógeno total mediante la integración de humedales de flujo vertical y horizontal.(Vymazal 2011)

El funcionamiento de las lagunas artificiales se centra en procesos biológicos y físicos naturales, tales como la sedimentación, la descomposición biológica por microorganismos, y la filtración a través de la vegetación acuática.(Steinmann, Weinhart y Melzer 2003)

Uno de los principales retos en el tratamiento de aguas residuales es la eliminación eficaz de nitrógeno y fósforo, nutrientes que, si no se gestionan adecuadamente, pueden provocar la eutrofización de cuerpos de agua receptores. Las investigaciones han demostrado que las lagunas artificiales pueden lograr una eliminación significativa de estos nutrientes a través de procesos biológicos de nitrificación y desnitrificación, así como la asimilación de fósforo por la biomasa y la precipitación química. (Vendramelli, Vijay y Yuan 2016)

Sin embargo, a pesar de sus ventajas, como el bajo coste y la alta tasa de purificación, las lagunas artificiales también presentan desafíos, como la necesidad de extensas áreas de terreno y la gestión de olores. Estas consideraciones subrayan la importancia de un diseño cuidadoso y una operación adecuada para maximizar la eficacia del tratamiento y minimizar los impactos negativos.(Zhang et al. 2013)

2.2.5.2. *Historia*

La historia de las lagunas artificiales para el tratamiento de aguas residuales comenzó ya entrados los años 50 del siglo pasado, cuando unos primeros estudios en Europa comenzaron a explorar el uso de plantas de humedales para tratar las aguas residuales. Este enfoque innovador marcó el inicio del desarrollo de los sistemas de lagunas artificiales, que combinan procesos naturales con ingeniería para depurar aguas residuales de manera efectiva y sostenible. Durante las décadas

siguientes, especialmente a finales de los años 60, estos sistemas se pusieron en operación a gran escala, demostrando su eficacia en el tratamiento de aguas residuales municipales y de pequeñas comunidades.

Mientras que en Europa se preferían los sistemas de flujo subsuperficial, en Norteamérica y Australia se adoptaron más ampliamente los sistemas de flujo superficial. Esta divergencia reflejaba las diferentes necesidades y contextos ambientales de las regiones. A lo largo de las décadas de 1970 y 1980, la información y el conocimiento sobre la tecnología de las lagunas artificiales comenzaron a difundirse lentamente, pero fue desde la década de 1990 cuando la tecnología se globalizó. Este cambio fue facilitado por el intercambio de conocimientos entre científicos e investigadores de todo el mundo, lo que permitió una comprensión más profunda de los procesos de tratamiento y la optimización de los sistemas de lagunas. (Vymazal 2011)

La necesidad de lograr una eliminación más efectiva de amoníaco y nitrógeno impulsó la innovación en el diseño y operación de las lagunas artificiales durante las décadas de 1990 y 2000. Esto llevó a la combinación de humedales de flujo vertical y horizontal, complementándose entre sí para alcanzar una mayor eficiencia en el tratamiento. Estos avances demostraron la flexibilidad y adaptabilidad de las lagunas artificiales para cumplir con los crecientes estándares de tratamiento y las expectativas ambientales. Hoy en día, las lagunas artificiales son reconocidas como una tecnología confiable de tratamiento de aguas residuales, capaces de proporcionar soluciones adecuadas para una amplia gama de necesidades de tratamiento, desde aguas residuales municipales hasta industriales y agrícolas. (Vymazal 2011)

El éxito y la evolución de las lagunas artificiales se deben en gran medida a su capacidad para integrar de manera eficiente los procesos naturales de depuración con intervenciones técnicas mínimas, ofreciendo así un tratamiento de aguas residuales sostenible y de bajo coste. La continua investigación y desarrollo en este campo es esencial para avanzar en la eficacia, eficiencia y sostenibilidad de las lagunas artificiales, asegurando que sigan siendo una solución vital para los desafíos actuales y futuros del tratamiento de aguas residuales.

2.2.5.3. *Funcionamiento*

Las lagunas artificiales para el tratamiento de aguas residuales operan a través de varias fases que se aprovechan de los procesos naturales para eliminar contaminantes. Cada fase se centra en diferentes aspectos del tratamiento y juntas conforman un sistema eficaz para la purificación del agua.

- Fase de sedimentación: Al inicio del proceso de tratamiento en las lagunas artificiales, ocurre la sedimentación, donde las partículas más pesadas presentes en las aguas residuales se asientan por gravedad en el fondo de la laguna. Este proceso ayuda a reducir la turbiedad del agua y prepara el líquido para las siguientes fases de tratamiento. La eficacia de esta fase depende de factores como el tiempo de retención hidráulica y la configuración de la laguna. (Steinmann, Weinhart y Melzer 2003)
- Fase de descomposición biológica: Después de la sedimentación, las aguas residuales entran en una fase donde predominan los procesos biológicos. En esta etapa, microorganismos como bacterias y algas descomponen la materia orgánica soluble y los

contaminantes. En lagunas aeróbicas, este proceso es facilitado por el oxígeno disuelto en el agua, mientras que en lagunas anaeróbicas, se realizan procesos de descomposición en ausencia de oxígeno.(Godini et al. 2021)

- Fase de filtración y absorción: En esta fase, el agua se mueve a través de zonas de la laguna donde puede ocurrir filtración adicional y absorción por parte de plantas acuáticas. Esta etapa ayuda a remover partículas finas restantes y puede contribuir a la eliminación de ciertos nutrientes y metales pesados a través de procesos de absorción y asimilación por las plantas. (Ewing et al. 2014)

La ilustración 10 muestra el diagrama de flujo tipo para el sistema de depuración Lagunaje donde se percibe la elevada cantidad de terreno necesaria para poder realizar la depuración de las aguas residuales.

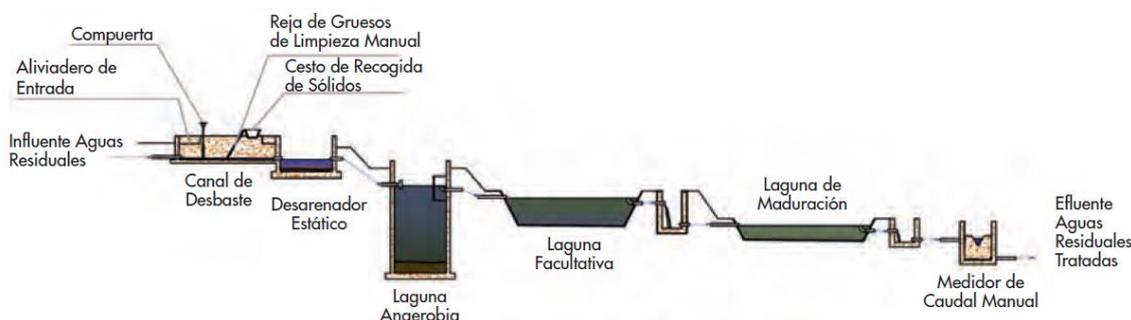


Ilustración 10. Diagramas de flujo de instalaciones de Lagunaje para 20-200 h-e (de Miguel et al. 2010)

Estas fases de operación de las lagunas artificiales demuestran cómo los sistemas pueden utilizar procesos naturales y biológicos para tratar eficazmente las aguas residuales. La simplicidad del diseño y el bajo coste de operación hacen de las lagunas una opción atractiva para el tratamiento de aguas residuales en muchas partes del mundo, especialmente en áreas rurales y comunidades pequeñas. La investigación continua y la optimización de estos sistemas son cruciales para mejorar su eficiencia y capacidad para tratar una gama más amplia de contaminantes.

2.2.5.4. Eliminación Fosforo y Nitrógeno

La eliminación de nitrógeno y fósforo en las lagunas artificiales para el tratamiento de aguas residuales implica una serie de procesos que aprovechan la actividad natural de los microorganismos y las plantas acuáticas, así como las reacciones químicas para reducir los niveles de estos nutrientes, cruciales para prevenir la eutrofización en cuerpos de agua receptores.

Gracias al estudio realizado por Vendramelli et al. Se sabe que en una laguna de estabilización facultativa el fósforo se elimina principalmente por asimilación en la biomasa y por precipitación a un pH alcalino. Esto sugiere que el control del pH y la promoción de condiciones que favorezcan la asimilación de fósforo por parte de la biomasa microbiana son cruciales para maximizar la

eliminación de fósforo. La investigación indicó que la adición de nitrógeno podría ser necesaria para mejorar la asimilación de fósforo, señalando la importancia de un equilibrio nutricional adecuado en el sistema. (Vendramelli, Vijay y Yuan 2016)

Los procesos de nitrificación y desnitrificación son fundamentales para la eliminación de nitrógeno. La nitrificación convierte el amoníaco en nitritos y nitratos, que luego pueden ser convertidos en nitrógeno gaseoso y eliminados del sistema por desnitrificación. Boelee et al. (2011) investigaron el uso de biofilms microalgales como tratamiento post-primario para el efluente de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, demostrando que estos biofilms son efectivos para la remoción de nitrógeno y fósforo, lo que subraya el potencial de los sistemas biológicos para mejorar la calidad del efluente. (Boelee et al. 2011)

La combinación de diferentes métodos y procesos puede mejorar significativamente la eliminación de nitrógeno y fósforo. Por ejemplo, el uso de sustratos específicos en las lagunas o la integración de lagunas con humedales construidos pueden proporcionar condiciones adicionales para la nitrificación, desnitrificación y la precipitación o adsorción de fósforo, optimizando la eliminación de estos nutrientes.

La eficiencia de eliminación de nitrógeno y fósforo depende de varios factores, incluyendo el diseño de la laguna, la carga orgánica, la temperatura, el pH, y la presencia de plantas acuáticas que pueden tomar activamente estos nutrientes. Es crucial un diseño y manejo cuidadoso de las lagunas para crear condiciones óptimas para estos procesos naturales, permitiendo así la máxima eficiencia en la eliminación de nutrientes.

Estos principios subrayan la importancia de un enfoque integrado y el conocimiento detallado de los procesos biológicos y químicos involucrados en las lagunas artificiales. La selección adecuada de tecnologías y prácticas de manejo es esencial para el éxito en la eliminación de nitrógeno y fósforo, lo cual es fundamental para prevenir la eutrofización y proteger la calidad del agua en los ecosistemas acuáticos receptores.

2.2.5.5. Ventajas y desventajas del sistema

Las lagunas artificiales para el tratamiento de aguas residuales ofrecen una serie de ventajas y también presentan algunos inconvenientes, los cuales son fundamentales a considerar al evaluar su implementación para proyectos específicos.

Ventajas

Una de las principales ventajas de las lagunas es que son conocidas por sus bajos costes operativos y altas tasas de purificación, haciendo de ellas una solución efectiva especialmente en áreas rurales. Sin embargo, la presencia de algas en las lagunas puede causar una polución secundaria en los cuerpos de agua receptores. Para abordar este problema, se han llevado a cabo investigaciones que combinan lagunas con sistemas de filtrado, demostrando una alta retención continua de algas,

amortiguación del pH, y una reducción adicional en los parámetros generales de las aguas residuales. (Steinmann, Weinhart y Melzer 2003)

Es importante destacar que las lagunas son capaces de tratar eficientemente una amplia gama de contaminantes, incluyendo materia orgánica, nutrientes (nitrógeno y fósforo), y patógenos, aprovechando los procesos biológicos naturales. (Crini y Lichtfouse 2019)

Desventajas

Una desventaja importante de las lagunas es la necesidad de extensas áreas de terreno para su implementación, lo cual puede ser un limitante en áreas densamente pobladas o donde el valor del terreno es alto. (Maynard, Ouki y Williams 1999)

Aunque las lagunas son una opción popular de tratamiento, especialmente en países en desarrollo, el problema de los olores puede limitar su aplicación. Identificar la causa de las emisiones de olores y proporcionar estrategias adecuadas es clave para controlar este problema. (Zhang et al. 2013)

Estas ventajas y desventajas destacan la importancia de considerar cuidadosamente los aspectos operativos, ambientales y económicos al diseñar y operar sistemas de lagunas artificiales para el tratamiento de aguas residuales. La elección de implementar lagunas artificiales debe basarse en una evaluación detallada de las necesidades específicas del proyecto, los objetivos de tratamiento y los recursos disponibles.

2.3. USO DE ENERGÍA RENOVABLE EN SISTEMAS DE DEPURACIÓN

El incremento sostenido en la demanda global de agua, incrementándose por factores como el cambio climático, la expansión urbana, entre otros, ha evidenciado la insuficiencia de los recursos hídricos convencionales para cubrir las necesidades de abastecimiento de agua a las poblaciones. Esta situación subraya la urgencia de recurrir a fuentes de agua no convencionales, tales como aguas de lluvia, manantiales de bajo caudal, escorrentías, pozos, aguas pluviales y residuales, para complementar la demanda existente. No obstante, para alcanzar un desarrollo equilibrado y sostenible, se vuelve imperativo fomentar una cultura de recuperación y reutilización del agua dentro de la sociedad, lo cual, a su vez, promoverá beneficios tangibles en las esferas económica, social y ambiental.

El sector hídrico en España se caracteriza por su intensiva movilización de recursos, implicando procesos industriales de significativa envergadura. Se calcula que el suministro urbano de agua asciende a aproximadamente 3.700 hectómetros cúbicos (hm³) anuales, mientras que la cifra correspondiente al tratamiento de aguas residuales excede los 4.000 hm³ anuales. Estas operaciones conllevan, igualmente, un elevado consumo energético, estimado en unos 4.000

gigavatios-hora (GWh) al año. En la Ilustración 11, al final del párrafo, se tienen los datos de potencia requerida por unidad de tratamiento y población equivalente. Esto representa cerca del 1,5% del consumo energético total del país y contribuye con aproximadamente el 0,5% al total de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) liberadas a la atmósfera en España, subrayando la importancia de la eficiencia y sostenibilidad en la gestión del agua. (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico 2024)

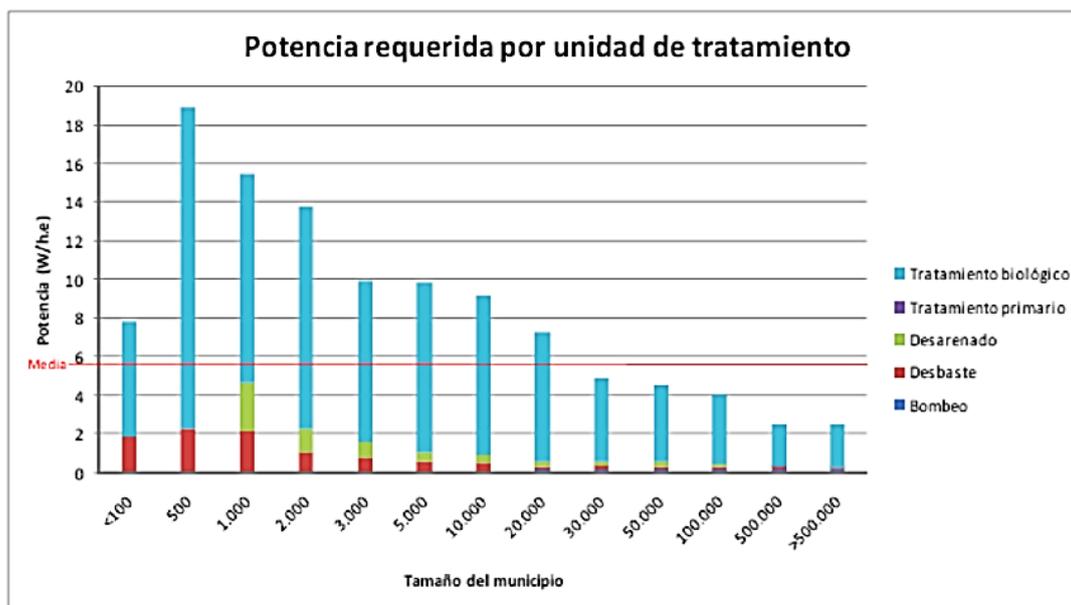


Ilustración 11. Potencia requerida por unidad de tratamiento (Bolinches 2023)

La promoción de la eficiencia energética en el sector del agua abarca dos dimensiones fundamentales. En primer lugar, se enfoca en fomentar el ahorro energético en los variados procesos industriales implicados en el tratamiento, la distribución y la depuración del agua. Esta faceta busca optimizar el uso de la energía, reduciendo así el consumo y los costes operativos asociados. En segundo lugar, apoya activamente la generación de energía renovable, aprovechando infraestructuras y terrenos vinculados a la depuración, el saneamiento y la reutilización de aguas residuales. Dentro de esta vertiente, se incluyen iniciativas para la producción de energía hidroeléctrica, solar y eólica, así como la generación de energía a partir del biogás obtenido en el tratamiento de los lodos producidos en las plantas depuradoras. Este enfoque dual no solo contribuye a la sostenibilidad ambiental del sector, sino que también promueve la autosuficiencia energética y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico 2024) En este trabajo nos centramos en tratamientos secundarios, donde buscamos su ampliación y/o optimización, siendo, además, la parte de una depuradora que mayor consumo energético tiene, como se ve en la Ilustración 12.

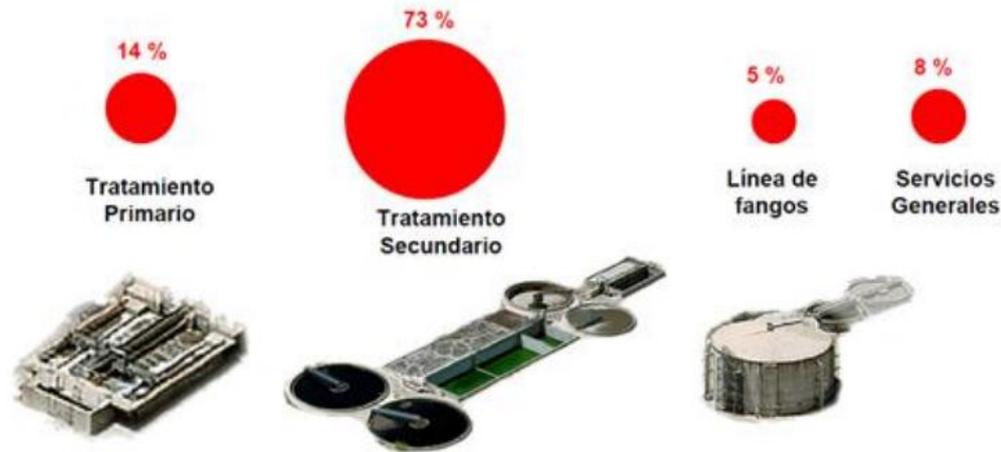


Ilustración 12. Consumo energético según tratamiento (González Martínez y Moreno Mora 2009)

Con base en la información recabada, se identifica una oportunidad significativa para aprovechar las plantas de tratamiento de aguas residuales como centros de generación de energía. Esta energía generada podría ser empleada posteriormente dentro de las mismas instalaciones, con el objetivo de acercarse a una operación con coste energético nulo. Esta estrategia se fundamenta en la capacidad de transformar los procesos de depuración en fuentes de energía renovable:

- Producción de biogás a partir del tratamiento de lodos, que puede ser convertido en energía térmica o eléctrica

El biogás producido con la digestión anaeróbica de los lodos generado, compuesto principalmente por metano, puede ser utilizado para generar electricidad y calor a través de sistemas de cogeneración. Esta energía producida puede satisfacer una parte significativa, si no la totalidad, de las necesidades energéticas de la planta de tratamiento, acercándose al ideal de operación con coste energético nulo.

- Instalación de sistemas solares fotovoltaicos

Las plantas de tratamiento de aguas residuales, con su amplio conjunto de edificaciones, presentan una oportunidad única para la instalación de paneles solares en sus cubiertas. Esta estrategia aprovecha eficientemente el espacio disponible para generar energía renovable. La energía solar capturada puede utilizarse para alimentar las operaciones diarias de la planta, contribuyendo significativamente a reducir el consumo de energía de fuentes no renovables

- Turbinas eólicas en terrenos asociados

La instalación de turbinas eólicas en terrenos adyacentes a las plantas de tratamiento de aguas residuales ofrece otra oportunidad significativa para la producción de energía renovable. Aprovechar la energía del viento en estas áreas puede proporcionar una fuente constante y

sostenible de electricidad, contribuyendo a reducir la dependencia de fuentes de energía convencionales y minimizando el impacto ambiental de las operaciones de la planta.

Aunque la transición hacia plantas de tratamiento de aguas residuales energéticamente neutras presenta desafíos, como la inversión inicial necesaria y la necesidad de expertos técnicos especializados, las oportunidades que ofrece en términos de sostenibilidad ambiental, reducción de costes operativos y contribución a la transición energética son inmensas. La implementación exitosa de estos sistemas no solo transformará el papel de las plantas de tratamiento dentro del ciclo urbano del agua, sino que también las establecerá como actores clave en el panorama energético renovable.

3. OBJETIVOS

En el contexto actual, el "Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones", publicado por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, constituye un recurso de referencia para la selección e implementación de sistemas de depuración de aguas residuales en pequeñas comunidades. Sin embargo, dado que este manual vio la luz en el año 2010 y su investigación nace de un período aún anterior, es evidente que el paso del tiempo ha hecho que disminuya su relevancia. Los avances tecnológicos, los nuevos retos ambientales y los cambios en la normativa hacen necesaria una revisión y actualización de esta guía para adaptarla a las circunstancias y necesidades actuales.

Así mismo, nos enfocaremos en la necesidad de optimizar y ampliar las depuradoras existentes antes de considerar la construcción de nuevas infraestructuras. Esta perspectiva resalta la importancia de la sostenibilidad, la eficiencia de recursos y la planificación urbana responsable. Se incluirán recomendaciones técnicas para mejorar la capacidad y rendimiento de los sistemas de depuración actuales, mediante la implementación de tecnologías avanzadas y la integración de soluciones sostenibles.

Con la realización de este trabajo se adoptará y continuará el proceso metodológico establecido por Ortega de Miguel et al. para la selección del sistema de depuración más adecuado para pequeñas poblaciones. Esta base nos ayudara a conseguir realizar una herramienta multicriterio adecuada y actualizada con varios niveles de criterios para escoger la mejor alternativa en cada caso.

3.1. OBJETIVOS PRINCIPALES

Una vez hemos detectado que debemos actualizar el "Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones" necesitamos poner en marcha la creación de esta herramienta que se basará en el desarrollo y aplicación de una metodología de análisis multicriterio, la cual se adaptará y mejorará a partir de los procesos establecidos por investigaciones previas realizadas por Ortega de Miguel et al. Este enfoque multicriterio permite incorporar una amplia gama de factores en la evaluación, incluyendo aspectos técnicos, económicos, ambientales y sociales, asegurando así una selección equilibrada y sostenible de sistemas de depuración.

Por tanto, el objetivo principal de este trabajo se centra en el refinamiento y la mejora de los criterios para la elección del proceso de depuración más eficiente y adecuado para poder optimizar y ampliar depuradoras existentes. Este enfoque incluirá la integración de las últimas tendencias en sostenibilidad y optimización del uso de recursos.

Buscamos proporcionar a las administraciones una herramienta eficaz y rigurosa para la selección entre diferentes alternativas de sistemas de depuración. Este instrumento busca facilitar el proceso de decisión, permitiendo a las autoridades y gestores de recursos hídricos evaluar de manera integral y objetiva las opciones disponibles, con el fin de determinar la más adecuada para sus

necesidades específicas y contextos locales. Así mismo con el desarrollo de este trabajo incluimos el desarrollo de criterios de selección robustos, claros y cuantificables, diseñados para facilitar su aplicación específica a cada contexto.

Este trabajo se enfoca principalmente en comunidades cuya población oscila entre 200 y 10.000 habitantes equivalentes. Esta delimitación ofrece una base sobre la cual en un futuro otros investigadores y firmas de ingeniería pueden expandir, permitiéndoles explorar y abordar las necesidades de tratamiento de aguas residuales en poblaciones de pequeña escala.

3.1. OBJETIVOS SECUNDARIOS

Como parte de los objetivos secundarios, este trabajo también se propone validar la metodología de análisis propuesta mediante la aplicación a una serie de casos prácticos. El propósito de este enfoque es verificar la eficacia de los resultados obtenidos y examinar detenidamente las potenciales limitaciones de la metodología empleada, incluyendo, entre otros aspectos, el rango de población considerado.

La realización de este trabajo permitirá también abordar y ofrecer respuestas a diversos puntos críticos que son fundamentales en el contexto del tratamiento y gestión de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Estos puntos incluyen:

- Eliminación de Nutrientes:

La eliminación eficiente de nutrientes, como nitrógeno y fósforo, es esencial para abordar la contaminación del agua y prevenir problemas ambientales como la eutrofización. En la Ilustración 13 se puede ver como sigue habiendo un gran número de poblaciones cuyas depuradoras necesitan mejoras para la eliminación de nutrientes.

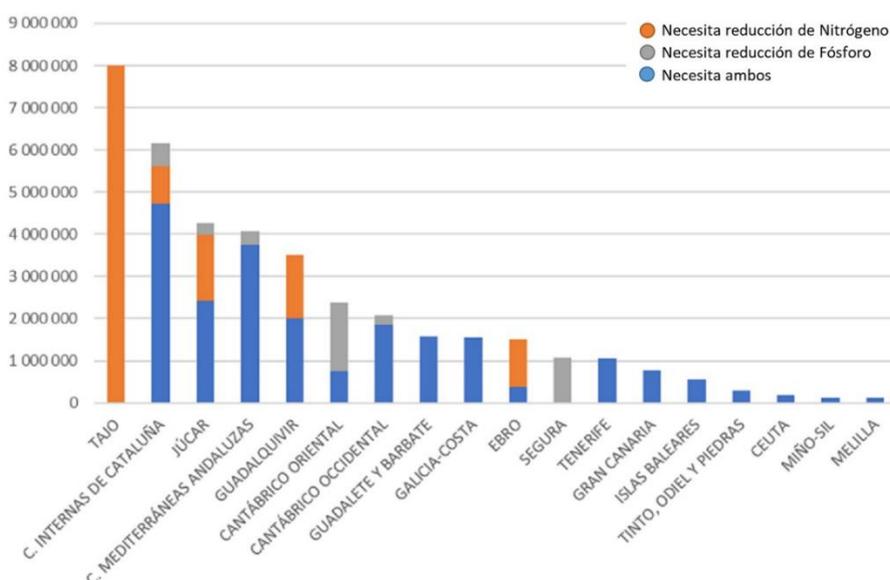


Ilustración 13. Estaciones depuradoras que en la actualidad necesitan eliminación de Fosforo y/o Nitrógeno (Bolínches 2023)

- Neutralidad Energética:

La búsqueda de la neutralidad energética en los sistemas de tratamiento de aguas refleja un enfoque sostenible y eficiente desde el punto de vista energético. La optimización de los procesos, la implementación de tecnologías de bajo consumo y la posible integración de fuentes de energía renovable son consideraciones clave para lograr la neutralidad energética en sistemas de tratamiento

- Variación de la Población:

La capacidad de adaptarse a variaciones en la población es un aspecto muy importante a tener en cuenta, especialmente en entornos con poblaciones pequeñas que experimentan fluctuaciones durante las diferentes épocas del año. Los sistemas de tratamiento deben ser flexibles y capaces de manejar cambios en la carga contaminante, ajustando su rendimiento según las necesidades cambiantes.

- Aplicabilidad Internacional

La posibilidad de utilización en diferentes países, especialmente en regiones con déficits hídricos en el sur de Europa, destaca la importancia de soluciones que sean adaptables a diversas condiciones climáticas y normativas. La estandarización y la compatibilidad con regulaciones internacionales son factores clave para garantizar la aplicabilidad global de los sistemas de tratamiento de aguas.

- Sostenibilidad

El acceso al agua potable, el saneamiento y la higiene representan la necesidad humana más básica para el cuidado de la salud y el bienestar. Miles de millones de personas no tendrán acceso a estos servicios básicos en 2030 a menos que se cuadrupliquen los avances. El rápido crecimiento de la población, la urbanización y las crecientes necesidades en materia de agua de los sectores agrícola, industrial y energético están provocando un aumento de la demanda de agua. De no mejorarse las infraestructuras y la gestión del agua, millones de personas seguirán muriendo cada año a causa de enfermedades relacionadas con el agua, como la malaria y la diarrea, y la pérdida de biodiversidad y el deterioro de la resistencia de los ecosistemas seguirán socavando la prosperidad de los países y los esfuerzos por lograr una sociedad más sostenible.

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible que cubriríamos con este trabajo serían (<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>) (Gamez 2024):



ODS 6: AGUA LIMPIA Y SANEAMIENTO

6.1 De aquí a 2030, lograr el acceso universal y equitativo al agua potable a un precio asequible para todos

6.2 De aquí a 2030, lograr el acceso a servicios de saneamiento e higiene adecuados y equitativos para todos y poner fin a la defecación al aire libre, prestando especial atención a las necesidades de las mujeres y las niñas y las personas en situaciones de vulnerabilidad

6.3 De aquí a 2030, mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial

6.4 De aquí a 2030, aumentar considerablemente el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce para hacer frente a la escasez de agua y reducir considerablemente el número de personas que sufren falta de agua

6.5 De aquí a 2030, implementar la gestión integrada de los recursos hídricos a todos los niveles, incluso mediante la cooperación transfronteriza, según proceda

6.6 De aquí a 2020, proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua, incluidos los bosques, las montañas, los humedales, los ríos, los acuíferos y los lagos

6.a De aquí a 2030, ampliar la cooperación internacional y el apoyo prestado a los países en desarrollo para la creación de capacidad en actividades y programas relativos al agua y el saneamiento, como los de captación de agua, desalinización, uso eficiente de los recursos hídricos, tratamiento de aguas residuales, reciclado y tecnologías de reutilización

6.b Apoyar y fortalecer la participación de las comunidades locales en la mejora de la gestión del agua y el saneamiento



ODS 13: ACCIÓN POR EL CLIMA

13.2 Incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales

13.3 Mejorar la educación, la sensibilización y la capacidad humana e institucional respecto de la mitigación del cambio climático, la adaptación a él, la reducción de sus efectos y la alerta temprana

Para poder conseguir estos objetivos es muy importante la aplicación del PERTE (Proyecto Estratégico para la Recuperación y Transformación Económica) enfocado en la digitalización del ciclo del agua se presenta como una medida estratégica esencial. Esta iniciativa posibilitará la modernización tecnológica de las plantas de tratamiento, incluidas las de menor tamaño, a través de la digitalización. Esta transformación no solo promete mejorar la eficiencia operativa de estas instalaciones, sino que también se espera que incremente la calidad del agua tratada. Además, la implementación del PERTE relacionado con la Economía Circular desempeña un papel crucial en el manejo eficiente de los residuos producidos por las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR). La adopción de este enfoque permitirá la conversión de subproductos, como los fangos y las aguas regeneradas, en recursos reutilizables, aplicables en actividades como la limpieza urbana y el riego de áreas verdes, potenciando así la sostenibilidad y la circularidad en la gestión del agua.

3.2. INNOVACIÓN

Como se ha destacado previamente, buscamos avanzar hacia la mejora de las estaciones de tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones, incrementando su eficiencia mediante la incorporación de tecnologías avanzadas y la implementación de nuevos métodos que integren la digitalización de procesos. Esta transformación digital tiene como finalidad hacer los sistemas de tratamiento más confiables y minimizar los costes de operación que no agregan valor. La digitalización permite una gestión más inteligente y adaptativa de las operaciones de tratamiento, facilitando la monitorización en tiempo real, el análisis predictivo para el mantenimiento preventivo y la optimización continua de los procesos.

También se persigue el objetivo de alcanzar la neutralidad energética en las estaciones de tratamiento de aguas residuales. Este enfoque sostenible implica optimizar el consumo de energía y maximizar la generación de energía renovable dentro de las propias instalaciones, con el fin de igualar o superar el consumo energético con la producción de energía limpia. La neutralidad energética no solo reduce la dependencia de fuentes de energía no renovables y disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también promueve la autosuficiencia y la resiliencia operativa de las plantas de tratamiento. Para lograr la neutralidad energética, se pueden adoptar diversas estrategias, como la mejora de la eficiencia energética de los equipos y procesos, la instalación de sistemas de energía solar fotovoltaica, la utilización de la energía hidráulica en plantas situadas en corrientes de agua, y la producción de biogás a partir de los lodos de depuración que pueden ser convertidos en energía mediante procesos de digestión anaerobia.

Implementar estas innovaciones no solo contribuye a mejorar la sostenibilidad y la eficiencia económica de las plantas de tratamiento, sino que también asegura una mayor protección ambiental y un suministro de agua de calidad superior para comunidades y ecosistemas.

Con la finalidad de implementar estos objetivos e innovaciones, pretendemos desarrollar una herramienta multicriterio basada en el método Pattern. Esta herramienta está diseñada para facilitar la toma de decisiones, permitiéndonos elegir entre diferentes métodos de acuerdo con sus características específicas. Esta estrategia nos permite evaluar de manera eficiente y objetiva las opciones disponibles, asegurando que la selección final se alinee óptimamente con los requisitos y objetivos del proyecto.

4. METODOLOGÍA

Durante el Estado del Arte hemos ido comentado varios sistemas de depuración, algunos de ellos convencionales, también llamados intensivos y otros de ellos menos convencionales, también llamados extensivos ya que son compactos. Los sistemas escogidos han sido:

- LAGUNAJE (LA)
- HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL VERTICAL-HORIZONTAL (HFSV-HFSH)
- CONTACTOR BIOLÓGICO ROTATIVO (CBR)
- REACTOR SECUENCIAL (SBR)
- REACTOR BIOPELICULA SOBRE LECHO MOVIL (MBBR)

Se han elegido estos sistemas gracias a que son sistemas que han sido muy usados a lo largo de la historia, pero también son sistemas que se usan en la actualidad para la depuración de aguas residuales para un variado tipo de poblaciones, contaminantes, etc. Estos sistemas vienen, parte de ellos, explicados en el “Manual para la implantación de Sistemas de Depuración en pequeñas poblaciones de Ortega de Miguel et al. (2010)”, pero para la realización de este trabajo se ha querido buscar más información acerca de estos sistemas y a su vez actualizar la información obtenida en el manual.

El manual tiene sus criterios para evaluar varios tipos de sistema de depuración y con este trabajo vamos a actualizar las puntuaciones que da a cada sistema y a su vez escogeremos nuevos criterios no considerados en el manual que nos ayudarán a escoger el sistema más adecuado en cada caso.

4.1. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

Como se ha tratado de explicar en los capítulos anteriores, hay dos tecnologías principales para el tratamiento de las aguas residuales en la ampliación y optimización depuradoras de pequeño tamaño, las tecnologías convencionales (intensivas) y las llamadas no convencionales, que pueden ser sistemas compactos o sistemas verdes o blandos, también llamados extensivos, en los que, con un menor requerimiento energético y una mayor superficie, entre otros factores, se puede alcanzar el mismo nivel de depuración que se obtiene con los sistemas convencionales.

Para poder escoger la tecnología de tratamiento de aguas residuales más adecuada para ampliar y optimizar depuradoras existentes, es necesario priorizar soluciones técnicas que cumplan con los requisitos de vertido necesarios, e imponer los requisitos mínimos en términos de consumo de energía y en términos de tiempo de operación y mantenimiento de equipos, que funcionen de manera eficiente en una amplia gama de caudales y cargas, con un bajo riesgo de fallo y avería, y que provoquen el menor deterioro posible en la calidad de las aguas residuales en caso de producirse un fallo (de Miguel et al. 2010).

Es importante conocer el destino final del agua depurada, ya que esta puede ser enviada de nuevo al medio natural o, por otro lado, se puede depurar para su reutilización, ya sea en el riego de

cultivos, el regado de zonas verdes o el baldeo de calle, entre otras. Según su destino final habrá que analizar que parámetros son los necesarios, siempre siguiendo la legislación vigente.

Con todo esto debemos conocer las condiciones de contorno para las cuales son válidas la metodología:

- El aumento de población ha de estar comprendido entre 200 y 2.000 habitantes equivalentes.
- Las aguas que se van a tratar han pasado ya por un pretratamiento y mejor si han pasado por un tratamiento primario, por ejemplo, un tanque Imhoff.
- Algunas de las tecnologías escogidas están compuestas principalmente por plantas, que son seres vivos, por lo que necesitamos un aporte continuo de agua ya que si no se morirían.
- Los criterios escogidos para el método están basados para el caso concreto de la situación actual de España, por lo que no contempla otros países y otros criterios que pudieran llegar a ser interesantes fuera del territorio español.
- Para los criterios escogidos, a cada sistema de depuración se les ha dado una puntuación comprendida entre 1 y 10, siendo esta puntuación subjetiva dada siguiendo la información obtenida en el Estado del Arte y actualizando el "Manual para la implantación de Sistemas de Depuración en pequeñas poblaciones de Ortega de Miguel et al. (2010)". Estos valores pueden cambiar según la experiencia de un grupo de expertos, siendo cómodo de cambiar.

4.2. ESTRATEGIA PLANTEADA

Tal y como hemos ido comentando en la introducción y en los objetivos, con la elaboración de este trabajo fin de máster pretendemos desarrollar una herramienta multicriterio destinada a escoger que método de depuración, de los explicados anteriormente, es más adecuado según el caso de estudio. Con la elaboración de esta herramienta daremos un valor comprendido entre el 1 y el 10 donde un valor de 1 indicaría que este método no es adecuado siguiendo el criterio escogido, y, por el contrario, un valor de 10 indicaría que este sistema de depuración sería óptimo para el criterio escogido.

Realizar un análisis multicriterio nos va a resultar muy cómodo para proceder a la toma de decisiones cuando tenemos varios criterios, como es nuestro caso de estudio. Gracias a la realización de análisis multicriterio vamos a poder valorar varias alternativas basándonos en los criterios que explicaremos más adelante. Existen un gran número de análisis multicriterio, entre los que destacan:

- **Análisis Jerárquico de Procesos (AHP):** Este sistema de análisis multicriterio se basa en descomponer un problema, que puede tener una alta complejidad, en pequeños subgrupos que se puedan analizar de forma individual para finalmente obtener una puntuación al problema principal.
- **Método ELECTRE:** Los Métodos ELECTRE (*ELimination et Choix Traduisant la Réalité*) nacieron en la segunda mitad del siglo XX en la Universidad de París IX. Este sistema se basa en comenzar reduciendo el tamaño del conjunto de soluciones partiendo de un subgrupo de alternativas más favorables y menos favorables dentro del núcleo.
- **Método PROMETHEE** (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*): Este Sistema es muy parecido al método ELECTRO explicado anteriormente ya que se basa en comparar pares ofreciendo finalmente un ranking completo de todas las alternativas.
- **Método PATTERN** (*Planning Assistance through Technical Evaluation of Relevance Numbers*): Es un sistema de elección multicriterio menos conocido pero muy interesante a la hora de realizar un análisis multicriterio ya que permite sintetizar las puntuaciones obtenidas por cada criterio mediante la aplicación de coeficientes de ponderación.

Para la realización de este estudio se va a escoger el método PATTERN como sistema multicriterio ya que es un sistema muy sencillo de entender y aplicar sin necesidad de tener un alto conocimiento técnico. Además, este método nos ayuda a tomar decisiones bien informadas e individuales para cada caso de estudio ya que el coeficiente de ponderación variará para cada caso y obtendremos una adaptabilidad elevada en comparación con los otros métodos explicados anteriormente. Aun así, en la Ilustración 14 realizamos una matriz DAFO del Método PATTERN para así poder conocer mejor las fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas de este método.



Ilustración 14. Matriz DAFO del Método PATTERN (elaboración propia)

4.3. LIMITACIONES

Con esta metodología queremos obtener una herramienta intuitiva y fácil de usar para dar solución a aquellos problemas que suelen ocurrir cuando se empieza a realizar un proyecto de ampliación y/o optimización de depuradoras.

Sin embargo, esta metodología también tiene varias limitaciones que hemos ido conociendo a la hora de realizar el método:

- Es necesario una inversión inicial de tiempo importante para conocer el entorno y analizar los datos necesarios para usar el método.
- El máximo aumento de habitantes equivalentes para esta metodología es de 2.000 hab/eq.
- Esta metodología está pensada para vertidos de aguas residuales domésticas, no está planteado para el caso de vertidos industriales.
- Las aguas residuales que se van a tratar han de haber pasado por un pretratamiento y, a ser posible, un tratamiento primario, como por ejemplo un tanque imhoff.

- Esta metodología para ampliar estaciones de aguas residuales tiene en cuenta 5 sistemas de depuración, por lo que estamos limitados a usar uno de estos 5 sistemas.
- Los valores que se han fijado para cada uno de los criterios y cada sistema de depuración estudiado, valores comprendidos entre 1 y 10, son valores subjetivos que se han tomado gracias a la información obtenida en el Estado del Arte y la actualización del “Manual para la implantación de Sistemas de Depuración en pequeñas poblaciones de Ortega de Miguel et al. (2010)”. Sin embargo, un conjunto de profesionales en depuración de aguas residuales puede determinar un valor diferente.
- Es posible que una vez realizada la metodología haya varios sistemas de depuración que tengan puntuaciones muy parecidas por lo que habría que realizar un nuevo estudio para conocer cuál es la más adecuada para el caso de estudio.

4.4. FASES DEL SISTEMA

Para el desarrollo de la metodología, lo primero que se deberá realizar es una recopilación de datos, es decir, tenemos que estudiar cómo se encuentra en la actualidad la estación de aguas residuales que queremos ampliar y/o optimizar y cuál es el futuro que queremos obtener. Para ello deberemos recopilar una serie de datos:

- Población actual o población horizonte prevista
- Estado actual de las instalaciones
- Características de los terrenos y disponibilidad de estos para realizar las obras
- Clima en la zona de estudio
- Tipología de las aguas residuales que se van a tratar
- Calidad exigida en el efluente
- Posibilidad de reutilización de las aguas una vez tratadas
- Posibilidad de automatización

Con toda esta información previa, obtendremos una visión general del problema y a lo largo de las distintas etapas se podrán ir tomando decisiones determinantes en el método.

Una vez realizada la primera fase del método se procede a escoger los criterios de selección que se consideran más relevantes para ampliar y/o optimizar estaciones de aguas residuales. Estos criterios se dividen en 3 grandes grupos más un grupo que llamamos de desempate, para cuando, una vez realizada la investigación se obtengan dos o más sistemas con puntuaciones similares.

1. CRITERIOS TÉCNICOS
2. CRITERIOS AMBIENTALES
3. CRITERIOS ECONÓMICOS
4. CRITERIOS DESEMPATE

Dentro de estos grupos tenemos subgrupos de criterios donde algunos de ellos son de elaboración propia, siguiendo la innovación en la depuración a lo largo de los años, y otros son criterios actualizados del “Manual para la implantación de Sistemas de Depuración en pequeñas poblaciones de Ortega de Miguel et al. (2010)”:

CRITERIOS TÉCNICOS

- Calidad requerida del efluente según el medio receptor. (adaptación Manual CEDEX)
- Tamaño de la población a tratar. (adaptación Manual CEDEX)
- Superficie y características del terreno disponible para la ampliación de la EDAR. (adaptación Manual CEDEX)
- Origen y concentración de la contaminación en el agua residual. (adaptación Manual CEDEX)
- Versatilidad del tratamiento. (adaptación Manual CEDEX)
- Climatología y otros factores. (adaptación Manual CEDEX)
- Producción y estabilización de los fangos generados. (adaptación Manual CEDEX)
- Complejidad en la explotación y mantenimiento. (adaptación Manual CEDEX)
- Capacidad de automatización. (criterio nuevo)

CRITERIOS AMBIENTALES

- Producción de malos olores. (adaptación Manual CEDEX)
- Generación de ruidos. (adaptación Manual CEDEX)
- Integración paisajística. (adaptación Manual CEDEX)

- Posibilidad de actuar como cobijo de especies animales. (criterio nuevo)
- Huella de carbono generada. (criterio nuevo)

CRITERIOS ECONÓMICOS

- Costes de explotación. (adaptación Manual CEDEX)
- Costes de implantación. (adaptación Manual CEDEX)
- Capacidad de adopción de energías renovables. (criterio nuevo)

CRITERIOS DESEMPATE

- Plazo de ejecución. (criterio nuevo)
- Posibilidad de financiación. (criterio nuevo)

En la Ilustración 15 presentamos todos estos criterios de manera esquemática para un mejor entendimiento de estos.

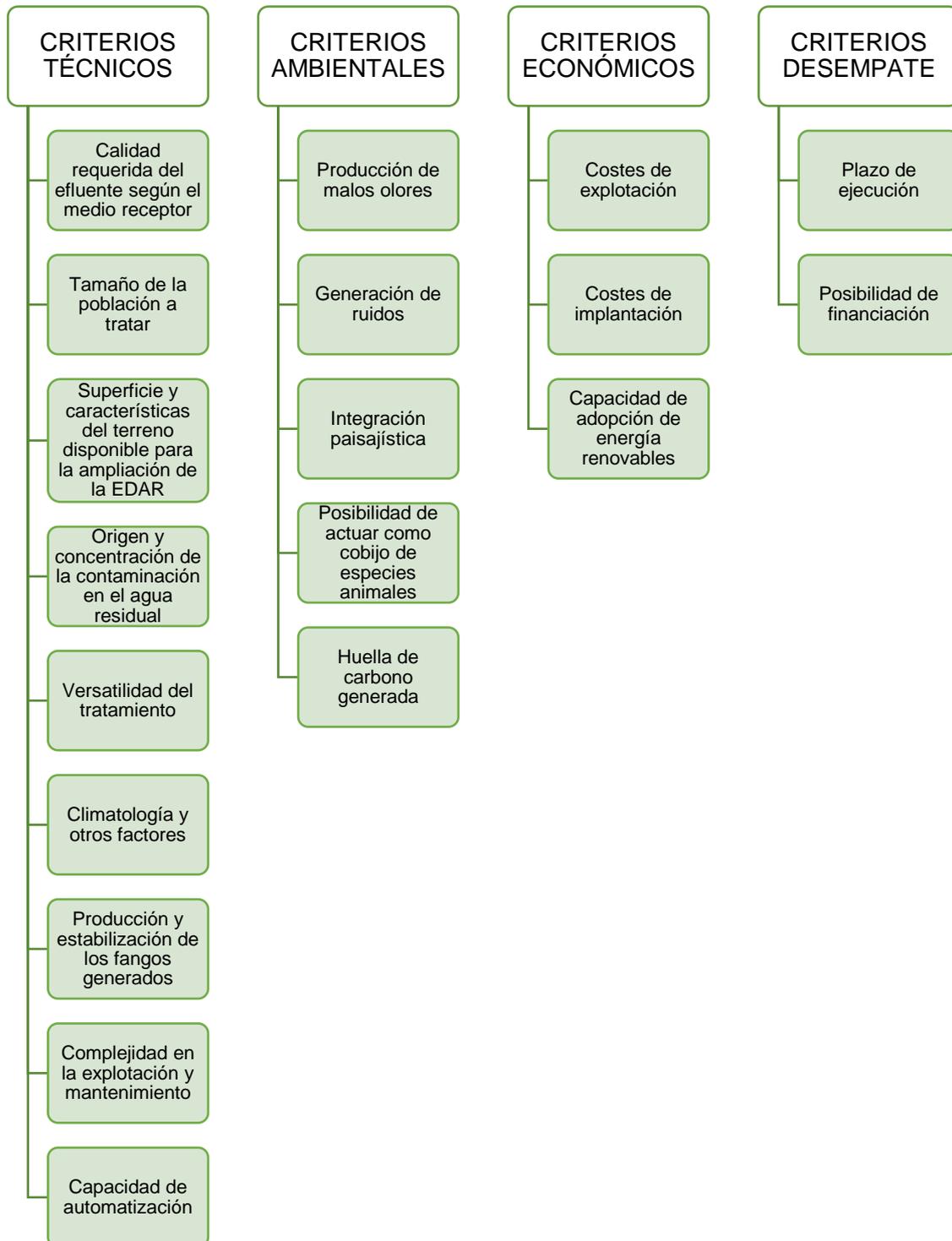


Ilustración 15. Criterios escogidos para la elaboración de la metodología (elaboración propia)

Continuando con los criterios escogidos para la elaboración de esta metodología, tal y como se ha comentado en las limitaciones, hay criterios que pueden necesitar de valoración por grupos de

expertos debido a su complejidad y también criterios que son más objetivos y otro más subjetivos. A continuación, explicamos mejor como identificarlos:

4.4.1. Criterios que deberían ser revisados por expertos

- Calidad requerida del efluente según el medio receptor.
Es un criterio más objetivo, basado en normativas con estándares cuantificables para el cual es necesario tener conocimientos en la normativa actual para poder asegurar su cumplimiento y la correcta depuración de las aguas.
- Origen y concentración de la contaminación en el agua residual.
Es necesario tener conocimientos en depuración para elegir de manera correcta que tratamiento es más adecuado según las características del agua residual que entra en la EDAR. Este criterio se considera objetivo al poder cuantificar la concentración mediante análisis químicos.
- Versatilidad del tratamiento.
Es recomendable tener conocimientos sobre diferentes sistemas de depuración y su adaptabilidad según las condiciones de cada caso de estudio. Esta hace también que dependa de la opinión de cada experto su clasificación, haciéndolo un criterio subjetivo.
- Climatología y otros factores ambientales.
Es necesaria conocer como las condiciones climáticas y ambientales afectan en la operación de las estaciones de aguas residuales, pudiendo afectar a la eficacia de estas, pero esto hace que sea un criterio subjetivo al depender de cada experto su valoración.
- Producción y estabilización de los fangos generados.
Estamos ante un criterio cuya interpretación puede ser subjetiva puesto que su valoración depende de la experiencia de cada experto y para su clasificación es necesario conocer cómo se gestionan y se tratan los fangos debido a que para una correcta depuración de las aguas residuales es crucial la correcta gestión de los fangos.
- Complejidad en la explotación y mantenimiento.
Es necesario conocer cómo se opera y se mantienen los diferentes sistemas de depuración haciéndolo un criterio subjetivo al depender de cada operador la complejidad considerada en el sistema de depuración.
- Capacidad de automatización.
Es necesario conocer cómo se puede automatizar y como es un funcionamiento correcto de la planta automatizada, sin embargo, se considera como un criterio más bien objetivo ya que se puede evaluar mediante las fichas técnicas de los sistemas de control.
- Costes de explotación y Costes de implantación.

Son dos criterios que se pueden cuantificar mediante la comparación de presupuestos y los análisis financieros, haciéndolos criterios objetivos, pero son necesarios conocimientos para realizar un análisis económico detallado y como obtener financiación.

- Capacidad de adopción de energías renovables.
Para su clasificación es necesario conocimientos técnicos de los diferentes métodos de energía renovable que se pueden usar y su capacidad de generar energía en infraestructuras existentes. Gracias a estos conocimientos podemos evaluar de forma cuantitativa la energía que se puede llegar a producir y su ahorro potencial, haciéndolo un criterio más bien objetivo.
- Posibilidad de financiación
Uno de los criterios de desempate considerados es el de posibilidad de financiación, un criterio que debería ser revisado por expertos en la materia que conozca los sistemas de depuración, la legislación actual y la mejores opciones de financiación ya sea mediante subvenciones o incentivos fiscales, entre otros.

4.4.2. Criterios que no requieren revisión por expertos

- Tamaño de la población a tratar.
Estos datos se basan en proyecciones de población estadísticas que son fácilmente accesibles por todo el público, haciéndole un criterio objetivo gracias a la posibilidad de cuantificar la población futura de forma fácil.
- Superficie y características del terreno disponible para la ampliación de la EDAR.
Este criterio objetivo fácilmente cuantificable y fácil de evaluar con una inspección en campo o con herramientas de imágenes por satélite fácilmente accesibles.
- Producción de malos olores y Generación de ruidos.
Podemos considerarlos como dos criterios a evaluar por expertos, pero su evaluación se considera más subjetiva y menos técnica.
- Integración paisajística.
Estamos ante un criterio subjetivo que se basa en consideraciones estéticas y de planificación urbanística que no es necesario depender de expertos en la materia, sino que cada persona puede tener su opinión y, por ende, clasificación.
- Posibilidad de actuar como cobijo de especies animales.
Es un criterio que está altamente ligado con aspectos de biodiversidad y ecología y puede ser evaluado siguiendo criterios de sostenibilidad generales fácilmente accesibles. Sin embargo, estamos ante un criterio altamente subjetivo donde cada individuo puede tener un grado de interpretación.
- Huella de carbono generada.

Para la evaluación de este criterio, en la actualidad existen diversas herramientas para el cálculo de la huella de carbono fácilmente accesibles y de manejar. Esto hace que sea un criterio cuantificable pero su valoración es subjetiva, dependiendo de cada persona su valoración.

- Plazo de ejecución.

Nos encontramos ante un criterio de los que hemos llamado comodín y se considera un criterio objetivo que no es necesario ser evaluado por expertos ya que siendo sistemas de depuración muy utilizados se podría obtener estos plazos de forma rápida por personal no cualificado, preguntando a diferentes organizaciones, como ayuntamientos o empresas constructoras.

Gracias a esta evaluación podemos, a continuación, realizar un gráfico (Ilustración 16) donde indicamos, de más importante a menos, que criterios consideramos más importantes a la hora de realizar una ampliación o una optimización de una depuradora existente. Para ello se ha tenido en cuenta su relevancia tanto técnicamente, como económica y ambientalmente, así como la necesidad de ser revisado por expertos y su objetividad y subjetividad:



Ilustración 16. Ranking de relevancia (elaboración propia)

Con la ayuda de la información obtenida hasta ahora, tanto en el Estado del Arte como con la valoración por nuestra parte, se procederá a realizar la tabla indicada con las valoraciones en cada criterio para cada sistema de depuración se darán valores de importancia a cada criterio según el caso concreto de estudio. Con esto conseguiremos conocer que sistema es el más adecuado para nuestro caso de estudio.

Durante el desarrollo de la metodología se ira justificando la puntuación que se otorga a cada sistema de depuración. De esta forma pretendemos crear una herramienta precisa y adaptable al futuro.

4.5. RESULTADOS ESPERADOS

Con la elaboración de esta metodología pretendemos que la alternativa finalmente escogida sea colaborante con el medio ambiente, pudiendo llegar a tener un coste energético nulo, produciendo su propia energía, ya sea con material propio, como fangos, o mediante la implantación de sistemas productores de energía en sus inmediaciones. Así mismo, se busca que la opción escogida tenga capacidad de automatización para así reducir los costes de mantenimiento y operación, pudiendo llegar a operarse de forma remota.

5. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

5.1. CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE SISTEMAS DE DEPURACIÓN EN AMPLIACIONES DE DEPURADORAS EN PEQUEÑAS POBLACIONES

Para la realización de este trabajo hemos tomado como base el “Manual para la implantación de Sistemas de Depuración en pequeñas poblaciones de Ortega de Miguel et al. (2010)”. Sin embargo, ese manual se ha ido quedando escaso con el paso de los años ya que como se indica, fue publicado en el año 2010 y fue realizado durante los años anteriores. Con el desarrollo de esta metodología queremos usar criterios de este manual, que mejoraremos, pero también usaremos criterios nuevos que no aparecen en este manual.

5.1.1. Criterios técnicos

5.1.1.1. Calidad requerida del efluente según el medio receptor.

Para este primer criterio que vamos a desarrollar nos centramos en lo que busca la Directiva 2000/60CE, un correcto tratamiento de las aguas residuales para prevenir el deterioro del medio natural, así como un correcto estado de las masas de agua. Para poblaciones pequeñas, el RD 509/1996 nos exige un tratamiento adecuado de las aguas residuales diferencia entre si la zona de vertido es sensible o menos sensible. En zonas con especial exigencia de calidad se puede llegar a incluir tratamientos para la eliminación de nutrientes e incluso desnitrificación. (de Miguel et al. 2010)

A continuación, se exponen dos tablas, la primera de ellas, Tabla 5, con el nivel de tratamiento exigido y rendimiento requerido según la fase de depuración y en la segunda tabla, Tabla 6, se indica el nivel de tratamiento alcanzado según la tecnología implantada.

Tabla 5. Nivel de tratamiento exigido y rendimiento requerido según la fase de depuración. (de Miguel et al. 2010)

Parámetros	Características					
	SS	DBO5	DQO	N-NH4+	OT	PT
Primario	Rto > 50%	Rto > 20%				
Secundario	<35 mg/l ó Rto > 90%	<25 mg/l ó Rto > 70%	<125 mg/l ó Rto > 75%			
Secundario con nitrificación	<35 mg/l ó Rto > 90%	<25 mg/l ó Rto > 70%	<125 mg/l ó Rto > 75%	<15 mg/l ó Rto > 70%		
Secundario con eliminación de nitrógeno	<35 mg/l ó Rto > 90%	<25 mg/l ó Rto > 70%	<125 mg/l ó Rto > 75%		<15 mg/l ó Rto > 70%	
Secundario con eliminación de fósforo	<35 mg/l ó Rto > 90%	<25 mg/l ó Rto > 70%	<125 mg/l ó Rto > 75%			<2 mg/l ó Rto > 85%

Tabla 6. Nivel de tratamiento alcanzado según la tecnología implantada. (de Miguel et al. 2010)

Tecnología	Nivel de tratamiento	Características					
		SS (%)	DBO ₅ (%)	DQO (%)	N-NH ₄ ⁺ (%)	N _T (%)	P _T (%)
FS o TI	Primario	50-60	20-30	20-30	–	–	–
DP	Primario	60-65	30-35	–	–	–	–
LA	Secundario (a excepción de los SS) 1	40-80	75-85	70-80	30-70	40-80	30-60
HFSH	Secundario	90-95	85-90	80-90	20-25	20-30	20-30
HFSV	Secundario con nitrificación	90-95	90-95	80-90	60-70	60-70	20-30
FT _m	Secundario con nitrificación	85-95	90-95	80-90	85-95	15-20	70-80
FIA	Secundario con nitrificación	90-95	90-95	80-90	70-80	40-50	15-30
FIA _r	Secundario con nitrificación	90-95	90-95	80-90	70-80	40-50	15-30
IP	Secundario con nitrificación	90-95	90-95	80-90	70-80	40-50	15-30
CBR	Secundario o Secundario con nitrificación ²	85-95	85-95	80-90	60-80	20-35	10-35
LB	Secundario o Secundario con nitrificación ²	85-95	85-95	80-90	60-80	20-35	10-35
AP	Secundario con nitrificación o Secundario con eliminación de N _T ²	85-95	85-95	80-90	90-95	80-85	20-30
SBR	Secundario con nitrificación o Secundario con eliminación de N _T ²	>90	>90	80-90	90-95	80-85	55-65
MBBR	Secundario o Secundario con nitrificación o Secundario con eliminación de N _T ²	85-95	85-95	80-90	90-95	70-80	20-30

1. El Lagunaje no cumple el requisito de los SS, si no es en una muestra filtrada, debido a la presencia de microalgas en el efluente.

2. Según como se diseñe el proceso se alcanza uno u otro nivel de tratamiento.

En la tabla 7, que tenemos a continuación, se indica la puntuación para los sistemas depuración escogidos, puntuándolos con valores comprendidos entre el 1 y el 10. Podemos ver que el sistema de Reactor biopelícula sobre lecho móvil (MBBR) tiene la puntuación más elevada ya que es el sistema que ofrece mejores niveles de tratamiento de las aguas residuales por lo que el agua

devuelta al medio receptor tendrá una calidad superior. Por el contrario, el sistema de Lagunaje (LA) ofrece unos niveles de tratamiento más bajos.

Tabla 7. Puntuación sistemas de depuración según calidad de depuración de las aguas (elaboración propia)

SISTEMA DE DEPURACIÓN	PUNTUACIÓN
LAGUNAJE (LA)	3
HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL VERTICAL-HORIZONTAL (HFSV-HFSH)	6
CONTACTOR BIOLÓGICO ROTATIVO (CBR)	6
REACTOR SECUENCIAL (SBR)	7
REACTOR BIOPELICULA SOBRE LECHO MOVIL (MBBR)	9

5.1.1.2. Tamaño de la población a tratar.

Continuado con el criterio de la población a tratar, a continuación, se muestra la Tabla 8, donde se aprecia la mejor tecnología según el rango de población que estemos tratando. Un color más oscuro significaría que este tratamiento es adecuado para esta población y los colores más claros no serían recomendables para ese rango de población. Como se ha ido comentando, el Manual para la implantación de Sistemas de Depuración en pequeñas poblaciones de Ortega de Miguel et al. (2010) que estamos usando como base se ha quedado anticuado y con esta herramienta aprovechamos para actualizarlo introduciendo, en este caso, nuevos rangos de población para cada sistema.

Tabla 8. Sistema de depuración adecuado según el rango de población a tratar. (de Miguel et al. 2010)

Tecnología	Rango de población (h-e)			
	250-1.000	1.000-2.500	2.500-5.000	5.000-10.000
FS				
TI				
DP				
Laguna Anaerobia ₁				
LA				
HFSV y HFSH				
FT _m				
FIA				
FIAr				
IP				
CBR				
LB				

AP				
SBR ₂				
MBBR				

1. Las Lagunas Anaerobias se pueden emplear como tratamiento primario en depuradoras con tratamiento secundario posterior.
2. Existen pocas experiencias de ambas tecnologías en España en este rango de población, además la tecnología del MBBR está aún en fase de desarrollo.

Como la información obtenida en la tabla que tenemos justo encima generamos la Tabla 9, con la puntuación para cada sistema de depuración estudiado. Podemos apreciar que los sistemas de Reactor Secuencial (SBR) y el sistema de Reactor biopelícula sobre lecho móvil (MBBR) tiene las puntuaciones más altas al ser estos sistemas recomendables para un mayor número de habitantes equivalentes. Los demás sistemas, a pesar de tener un mayor rango, no son recomendables para un rango de población alto.

Tabla 9. Puntuación sistemas de depuración según tamaño de población a tratar (elaboración propia)

SISTEMA DE DEPURACIÓN	PUNTUACIÓN
LAGUNAJE (LA)	6
HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL VERTICAL-HORIZONTAL (HFSV-HFSH)	6
CONTACTOR BIOLÓGICO ROTATIVO (CBR)	6
REACTOR SECUENCIAL (SBR)	7
REACTOR BIOPELICULA SOBRE LECHO MOVIL (MBBR)	8

5.1.1.3. Superficie y características del terreno disponible para la ampliación de la EDAR.

Para conocer la superficie de terreno necesaria, así como las características de estos, nos ayudamos del Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones. En terrenos de alta resistencia, de difícil excavación, o en los que sea necesario realizar una amplia excavación la implementación de sistemas de depuración extensivos no suele ser viable debido al coste de estos. Algo muy parecido pasa con los terrenos con una pendiente pronunciada ya que para el correcto funcionamiento de los sistemas extensivos estos deben tener unas pendientes muy pequeñas. (de Miguel et al. 2010)

Por el contrario, en caso de que en el terreno de implantación se tenga un nivel freático cercano a la superficie, este no afectará a los sistemas de humedales, pero sí a los sistemas que requieren una excavación importante. Con esta información y la ayuda proporcionada por el Manual para la implantación de Sistemas de Depuración en pequeñas poblaciones de Ortega de Miguel et al, actualizamos los datos y creamos la Tabla 10.

Tabla 10. Sistema de depuración adecuado según la superficie necesaria para su implementación (de Miguel et al. 2010).

Requerimientos de superficie	Tecnologías
------------------------------	-------------

Muy Bajo (< 1 m ² /habitantes equivalente)	AP
	LB
	CBR
	MBBR
Bajo (1-3 m ² /habitantes equivalente)	SBR
	FIA
Medio (3-5 m ² /habitantes equivalente)	FIA
	FT _m
	HFSV
Alto (5-7 m ² /habitantes equivalente)	I-P
Muy Alto (> 7 m ² /habitantes equivalente)	LA
	HFSH

Con la información obtenida en la tabla anterior podemos puntuamos en la Tabla 11 los sistemas que estamos estudiando, obteniendo el lagunaje una puntuación muy baja debido a que necesita una gran superficie para su implementación. Sin embargo, los sistemas como el CBR, SBR y MBBR obtienen puntuaciones más elevadas gracias a que, aunque pueden ser más cotosos en un primer momento, con menor superficie son capaces de dar servicio a un mayor número de habitantes equivalentes.

Tabla 11. Puntuación sistemas de depuración según la superficie necesaria para su implementación (elaboración propia)

SISTEMA DE DEPURACIÓN	PUNTUACIÓN
LAGUNAJE (LA)	2
HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL VERTICAL-HORIZONTAL (HFSV-HFSH)	3
CONTACTOR BIOLÓGICO ROTATIVO (CBR)	9
REACTOR SECUENCIAL (SBR)	8
REACTOR BIOPELICULA SOBRE LECHO MOVIL (MBBR)	9

5.1.1.4. Origen y concentración de la contaminación en el agua residual.

Podemos apreciar en la Tabla 12 como es el comportamiento de los sistemas de tratamiento de aguas residuales que estamos estudiando según la contaminación de las aguas residuales. Es muy importante poder atajar de forma adecuada posibles vertidos no esperados para evitar daños al proceso y al medio de natural donde se vierten las aguas.

Tabla 12. Sistema de depuración adecuado según el origen y la contaminación en el agua residual. (de Miguel et al. 2010)

Tipo de agua residual	Tecnologías		
	Muy adecuado	Adecuado	Menos adecuado

De contaminación fuerte	AP	HFSV	LA
		FT _m	
	FIA		
	FIA _r		
	IP		
SBR	CBR	HFSH	
	LB		
	MBBR		
De contaminación media	Todos los tratamientos son adecuados		
De contaminación débil	LA	FT _m	AP
	HFSV		
	HFSH		
	FIA		SBR ₁
	FIA _r		
	IP		
	LB		
CBR			
MBBR			

Las tecnologías AP y SBR pueden presentar problemas de operación cuando la concentración de DBO5 es inferior a 100 mg/l.

Para poder obtener un criterio de evaluación adecuado se ha dado un valor de 5 cuando el tratamiento es *Muy adecuado*, un valor de 3 cuando es *Adecuado* y valor de 1 cuando el tratamiento es *Menos adecuado*. Con este criterio se genera la Tabla 13, donde se le da un valor a cada uno de los tratamientos que estamos estudiando.

Tabla 13. Puntuación sistemas de depuración según el origen y la contaminación en el agua residual. (elaboración propia)

SISTEMA DE DEPURACIÓN	PUNTUACIÓN
LAGUNAJE (LA)	7
HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL VERTICAL-HORIZONTAL (HFSV-HFSH)	8
CONTACTOR BIOLÓGICO ROTATIVO (CBR)	8
REACTOR SECUENCIAL (SBR)	7
REACTOR BIOPELICULA SOBRE LECHO MOVIL (MBBR)	8

5.1.1.5. Versatilidad del tratamiento.

Para poder conocer de la mejor forma que sistema de tratamiento de aguas residuales tiene una mayor versatilidad vamos a estudiar varios criterios dentro de este.

En la Tabla 14 se aprecia que tratamientos son mejores cuando existen variaciones de caudal y carga contaminante comprobando que los tratamientos extensivos son los que mejor se adaptan al tener un tiempo de retención hidráulica alto. (de Miguel et al. 2010)

Es muy importante que en estos sistemas el tratamiento que les precede ya sea fosa séptica, decantación primaria o tanque Imhoff, este correctamente dimensionado para poder absorber de forma correcta las variaciones de caudal.

Tabla 14. Clasificación del sistema de depuración adecuado según su capacidad para adaptarse a las variaciones diarias de caudal y carga contaminante. (de Miguel et al. 2010)

Capacidad de adaptación de las diferentes tecnologías a las variaciones diarias de caudal y carga contaminante				
AP	CBR LB MBBR	SBR HFSV FTm FIA FIAr IP	HFSH	LA

Continuando con el estudio de la versatilidad, en la Tabla 15 se aprecia la capacidad de adaptación a las sobrecargas hidráulicas de cada uno de los tratamientos que estamos estudiando.

Tabla 15. Clasificación del sistema de depuración adecuado según su capacidad para adaptarse a las sobrecargas hidráulicas. (de Miguel et al. 2010)

Capacidad de adaptación a las sobrecargas hidráulicas			
AP	HFSV FIA FTm FIAr IP	SBR CBR MBBR LB HFSH	LA

Como último criterio, en la Tabla 16 se ve la capacidad que tienen estos sistemas de depuración de adaptarse a las sobrecargas orgánicas.

Tabla 16. Clasificación del sistema de depuración adecuado según su capacidad para adaptarse a las sobrecargas orgánicas. (de Miguel et al. 2010)

Capacidad de adaptación a las sobrecargas orgánicas			
HFSH	CBR	LA	AP
HFSV			AP
FTm	LB		SBR
FIA			
FIAr	MBBR		
IP			

Con la información obtenida las 3 tablas anteriores se genera la Tabla 17, donde podemos conocer la puntuación de cada sistema de tratamiento de aguas residuales. Vemos que, como hemos explicado anteriormente, los sistemas extensivos obtienen una puntuación más alta al tener un tiempo de retención hidráulico más elevado que los demás sistemas.

Tabla 17. Puntuación sistemas de depuración según la versatilidad del tratamiento. (elaboración propia)

SISTEMA DE DEPURACIÓN	PUNTUACIÓN
LAGUNAJE (LA)	9
HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL VERTICAL-HORIZONTAL (HFSV-HFSH)	4
CONTACTOR BIOLÓGICO ROTATIVO (CBR)	4,5
REACTOR SECUENCIAL (SBR)	7
REACTOR BIOPELICULA SOBRE LECHO MOVIL (MBBR)	4

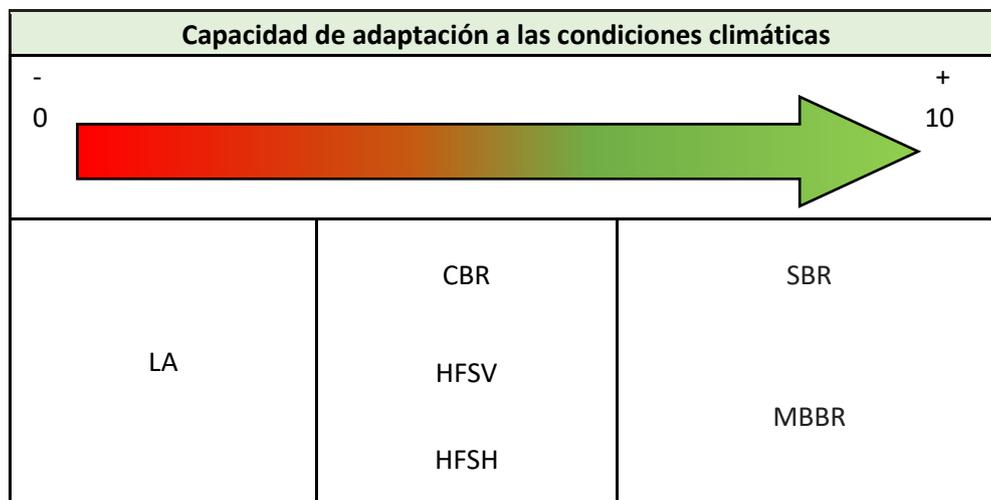
5.1.1.6. Climatología y otros factores.

Como se ha explicado en el *Estado del Arte*, la temperatura ambiente es un factor clave para tratar las aguas residuales. Si el clima es muy frío, la actividad microbiana que se da en estos procesos puede llegar a reducirse drásticamente y puede llegar a congelarse parte de la superficie de las aguas que este en contacto con el aire e incluso tuberías que forman parte del proceso, como las de recirculación interna o dosificación.

En los casos donde se prevean temperaturas bajas destacan aquellos sistemas de depuración que pueden trabajar enterrados o que se puedan cubrir de una forma fácil siempre que se mantenga de forma correcta el tratamiento biológico. Esto lleva también consigo un coste asociado que dado el caso habría que estudiarlo en el proceso de selección. (de Miguel et al. 2010)

Con toda esta información obtenida del Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones generamos Tabla 18, donde podemos ver una primera clasificación de los sistemas de depuración según sean capaces de adaptarse a las condiciones climáticas.

Tabla 18. Clasificación del sistema de depuración adecuado según su capacidad para adaptarse a las condiciones climáticas. (elaboración propia)



Una vez hemos generado la tabla con una primera clasificación de los sistemas, procedemos a dar valores numéricos a cada sistema para poder introducirlo en nuestro sistema de selección (Tabla 19). Podemos comprobar como aquellos sistemas que son fáciles de cubrir tienen una valoración elevada, pero, por el contrario, el sistema de Lagunaje, al ser un sistema que no es fácil de cubrir, obtiene una puntuación muy baja.

Tabla 19. Puntuación sistemas de depuración según su capacidad para adaptarse a las condiciones climáticas. (elaboración propia)

SISTEMA DE DEPURACIÓN	PUNTUACIÓN
LAGUNAJE (LA)	1
HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL VERTICAL-HORIZONTAL (HFSV-HFSH)	5
CONTACTOR BIOLÓGICO ROTATIVO (CBR)	5
REACTOR SECUENCIAL (SBR)	9
REACTOR BIOPELICULA SOBRE LECHO MOVIL (MBBR)	9

5.1.1.7. Producción y estabilización de los fangos generados

Para el estudio de este criterio es muy importante conocer que la producción de fangos es un aspecto crucial a la hora de escoger que sistema de depuración escoger ya que, dependiendo de la cantidad de fango generada, el grado de estabilización de los fangos y la frecuencia con la que es necesario su retirada, nos puede ayudar a decantarnos por un sistema u otro. Para el caso de los humedales, estos no generan fango como tal, sino que generan biomasa vegetal debido a la poda que hay que realizar a las plantas para que estas tengan un crecimiento más fuerte. Esta producción de biomasa es del orden de 40Tn/ha año. En la Tabla 20 tenemos la clasificación para cada uno de los sistemas que estamos estudiando. (de Miguel et al. 2010)

Tabla 20. Clasificación del sistema de depuración adecuado según la cantidad de fangos generada y estabilización de los fangos.(de Miguel et al. 2010)

Cantidad de fangos generada y estabilización de los fangos				
-				+
0				10
LA (si)	FTm FIA FIAr IP HSFV HSFH	LB1 (no) CBR1 (no)	MBBR2 (no) SBR (si)	AP (si)

Cantidad de fangos generada y estabilización de los fangos				
-				+
0				10
LA (si)	FTm FIA FIAr IP HSFV HSFH	LB1 (no) CBR1 (no)	MBBR2 (no)	AP (si) SBR (si)

1. En caso de emplear decantador primario en lugar de Tanque Imhoff, la cantidad de fango generada sería equiparable a la de un proceso de Aireación Prolongada o SBR.

2. En caso de emplear decantador primario en lugar de Tanque Imhoff, la cantidad de fango generada sería superior a la de un proceso de Aireación Prolongada o SBR.

Con la información proporcionada somos capaces de dar un valor numérico a cada sistema de depuración de aguas que estamos estudiando (Tabla 21). Este caso producir una menor cantidad de fangos nos da un valor bajo debido a que los sistemas de depuración requieren de fango para poder realizar el tratamiento de las aguas residuales. El lagunaje obtiene una puntuación de un 0 ya que es el sistema que menos fango genera y por el contrario el sistema SBR obtiene la puntuación mayor al ser el sistema que más fango genera y también consigue la estabilización de estos.

Tabla 21. Puntuación sistemas de depuración según la cantidad de fangos generadas y la estabilización de estos. (elaboración propia)

SISTEMA DE DEPURACIÓN	PUNTUACIÓN
LAGUNAJE (LA)	3
HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL VERTICAL-HORIZONTAL (HFSV-HFSH)	3
CONTACTOR BIOLÓGICO ROTATIVO (CBR)	5
REACTOR SECUENCIAL (SBR)	7
REACTOR BIOPELICULA SOBRE LECHO MOVIL (MBBR)	7

5.1.1.8. Complejidad en la explotación y mantenimiento.

En la actualidad, los sistemas con tratamiento biológico necesitan mano de obra más especializada y mayor dedicación de tiempo al ser estos sistemas más complejos. Sin embargo, los sistemas naturales, como los humedales, son sistemas más básicos y simples de operar, siendo el trabajo de poda el trabajo más importante que se ha de realizar en estos sistemas. Esta información se observa de manera gráfica en la Tabla 22.

Tabla 22. Clasificación del sistema de depuración adecuado según la complejidad en la explotación y mantenimiento. (de Miguel et al. 2010)

Complejidad en la explotación y mantenimiento					
+ 10				- 0	
LA	HFSH	HSFV FTm FIA FIAr IP	SBR MBBR	CBR	LB AP

Para puntuar este criterio el sistema, es al contrario de como lo hemos ido realizando hasta ahora, ya que una complejidad más elevada da una puntuación más baja debido a los costes que esto lleva asociado. Se genera la Tabla 23 con las puntuaciones donde, los sistemas naturales, como el lagunaje, obtienen una puntuación bastante elevada y, por el contrario, los sistemas como el MBBR obtienen puntuación más baja debido a la mayor complejidad de operación, siendo necesario mano de obra especializada y personal casi de continuo.

Tabla 23. Puntuación sistemas de depuración según la complejidad en la explotación y mantenimiento. (elaboración propia)

SISTEMA DE DEPURACIÓN	PUNTUACIÓN
LAGUNAJE (LA)	9
HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL VERTICAL-HORIZONTAL (HFSV-HFSH)	8
CONTACTOR BIOLÓGICO ROTATIVO (CBR)	5
REACTOR SECUENCIAL (SBR)	7
REACTOR BIOPELICULA SOBRE LECHO MOVIL (MBBR)	7

5.1.1.9. Capacidad de automatización

Un criterio que no se ha encontrado en el Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones es la capacidad de automatización para cada sistema de depuración. Es un criterio que con los años ha ido cobrando mayor importancia ya que, gracias a la automatización de parte de los sistemas, se va a poder ahorrar en costes y aumentar en fiabilidad, al no depender del factor humano. Así mismo esto ayudara a simplificar la explotación y el mantenimiento. En la Tabla 24 se clasifica este criterio según el sistema de depuración.

Tabla 24. Clasificación del sistema de depuración adecuado según la capacidad de automatización (elaboración propia)

Capacidad de automatización							
-					+		
0							10
LA	HSFH	HSFV FT _m FIA FIA _r IP	LB	CBR	SBR AP	MBBR	

Los sistemas extensivos, como puede ser el SBR, presenta una mayor complejidad a la hora de su operación al contar, en parte, con mayor número de equipos, pero es más fácil de poder automatizar parte del proceso. Por el contrario, los sistemas intensivos son menos complejos al no disponer de muchos equipos, pero no es posible la automatización del proceso. A continuación, se presenta la Tabla 25 con el valor dado a cada sistema de depuración que estamos estudiando.

Tabla 25. Puntuación sistemas de depuración según la capacidad de automatización (elaboración propia)

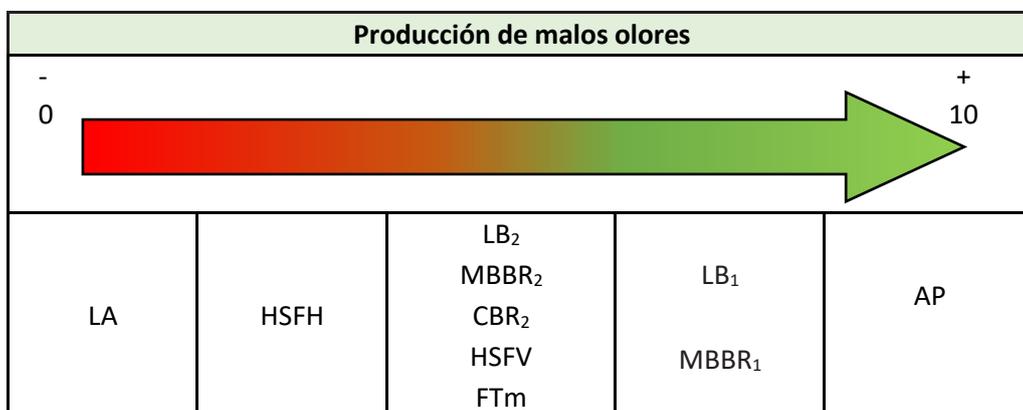
SISTEMA DE DEPURACIÓN	PUNTUACIÓN
LAGUNAJE (LA)	1
HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL VERTICAL-HORIZONTAL (HFSV-HFSH)	3
CONTACTOR BIOLÓGICO ROTATIVO (CBR)	6,5
REACTOR SECUENCIAL (SBR)	8
REACTOR BIOPELICULA SOBRE LECHO MOVIL (MBBR)	9

5.1.2. Criterios ambientales

5.1.2.1. Producción de malos olores.

La normativa actual nos indica que las depuradas han de estar lo más alejadas de los núcleos urbanos posible, con un mínimo de 2 km, ya que una de las principales quejas de la población es la mala generación de olores. Esto se ha podido cumplir durante muchas décadas, sin embargo, con el crecimiento de las poblaciones éstas están cada vez más cerca de la población. Como hemos ido explicando en el estado del arte de este trabajo, los tratamientos que más olores generan son aquellos tratamientos anaeróbicos, es decir, tratamientos en ausencia de oxígeno. Los tratamientos aeróbicos no han de producir malos olores y si producen malos olores suele ser un síntoma de fallo en el tratamiento. (de Miguel et al. 2010) En la Tabla 26 se clasifica este criterio según el sistema de depuración.

Tabla 26. Clasificación del sistema de depuración adecuado según la producción de malos olores. (de Miguel et al. 2010)



		FIA FIAr IP	SBR CBR ₁	
--	--	-------------------	-------------------------	--

Para los tratamientos que estamos estudiando, el lagunaje es el sistema que más olores produce debido a su fase anaeróbica, por eso en este criterio la puntuación más baja. Los demás tratamientos, aunque también pueden tener fases anaeróbicas, no deberían producir malos olores al ser estas zonas muy localizadas. En caso de que este criterio sea limitante se podría realizar la cubrición de parte de los tratamientos, tal y como se ha comentado en el criterio de *climatología y otros factores*. Las puntuaciones para los sistemas de depuración estudiados se presentan en la Tabla 27.

Tabla 27. Puntuación sistemas de depuración según la producción de malos olores. (elaboración propia)

SISTEMA DE DEPURACIÓN	PUNTUACIÓN
LAGUNAJE (LA)	1
HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL VERTICAL-HORIZONTAL (HFSV-HFSH)	7
CONTACTOR BIOLÓGICO ROTATIVO (CBR)	7
REACTOR SECUENCIAL (SBR)	8
REACTOR BIOPELICULA SOBRE LECHO MOVIL (MBBR)	7

5.1.2.2. Generación de ruidos.

Dentro de una EDAR, los elementos que producen más ruido son los equipos electromecánicos, sobre todo las soplantes, siendo necesario un edificio con un buen sistema de aislamiento para su ubicación, lo que conlleva mayor coste económico. En la Tabla 28 se clasifica este criterio según el sistema de depuración.

Tabla 28. Clasificación del sistema de depuración adecuado según la generación de ruidos. (de Miguel et al. 2010)

Generación de ruidos		
-		+
0		10
AP	CBR	LA
SBR		HFSV
		HFSH
		FTm
		FIA
MBBR	LB	FIAr



Para nuestros casos de estudio, los sistemas con menores equipos son los que obtiene mayor puntuación al no generar ruidos que puedan molestar a la población cercana o a los animales de la zona. A continuación, generamos la Tabla 29 con las puntuaciones para cada sistema de depuración estudiado.

Tabla 29. Puntuación sistemas de depuración según la producción de malos olores. (elaboración propia)

SISTEMA DE DEPURACIÓN	PUNTUACIÓN
LAGUNAJE (LA)	10
HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL VERTICAL-HORIZONTAL (HFSV-HFSH)	9
CONTACTOR BIOLÓGICO ROTATIVO (CBR)	5
REACTOR SECUENCIAL (SBR)	2
REACTOR BIOPELICULA SOBRE LECHO MOVIL (MBBR)	2

5.1.2.3. Integración paisajística.

La integración paisajística puede ser un criterio con gran valor en aquellas poblaciones que se encuentran ubicadas en zonas con alto valor ecológico, poblaciones pequeñas alejadas de las grandes urbes. Para este criterio los sistemas naturales tienen ventaja en la integración paisajística al tener mucha vegetación. En la Tabla 30 se clasifica este criterio según el sistema de depuración.

Tabla 30. Clasificación del sistema de depuración adecuado según la integración paisajística. (de Miguel et al. 2010)

Integración paisajística			
-			+
0			10
LB	CBR AP SBR MBBR	FTm FIA FIAr IP	LA HFSV HFSH

Para este criterio los sistemas como Lagunaje o los Humedales van a tener una mejor integración paisajística gracias a la posibilidad de integrarse de mejor forma en entornos naturales. En los demás sistemas se podría aumentar la vegetación en su entorno e incluso intentar cubrir parte de

estos con vegetación, pero esto conlleva un coste económico que no siempre es posible afrontar. Las puntuaciones se generan para cada sistema de depuración y lo podemos ver en la Tabla 31.

Tabla 31. Puntuación sistemas de depuración según la integración paisajística. (elaboración propia)

SISTEMA DE DEPURACIÓN	PUNTUACIÓN
LAGUNAJE (LA)	9
HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL VERTICAL-HORIZONTAL (HFSV-HFSH)	9
CONTACTOR BIOLÓGICO ROTATIVO (CBR)	3
REACTOR SECUENCIAL (SBR)	3
REACTOR BIOPELICULA SOBRE LECHO MOVIL (MBBR)	3

5.1.2.4. Posibilidad de actuar como cobijo de especies animales.

Este criterio podría incluirse junto con el de *integración paisajística*, pero se ha querido considerar un criterio a parte ya que gracias a la experiencia obtenida lo largo de los años se ha podido comprobar que los sistemas naturales, como los humedales y lagunajes, sirven como cobijo a muchas especies animales. Con este criterio se puede contribuir a aumentar la biodiversidad en la zona, en contra de las construcciones que tienden a disminuir las especies animales. En la Tabla 32 se clasifica este criterio según el sistema de depuración.

Tabla 32. Clasificación del sistema de depuración adecuado según la posibilidad de actuar como cobijo de especies animales. (elaboración propia)

Posibilidad de actuar como cobijo de especies animales		
-	0	+
CBR	MBBR	LA
SBR		HFSV
		HFSH

Para este criterio, al igual que con el de integración paisajística, los sistemas como el Lagunaje o los Humedales van a tener una mejor valoración al ser sistemas con alta concentración de vegetación que puede ayudar a ser cobijo de especies animales. En los demás sistemas, al ser construcciones propensas a disminuir la presencia de especies animales, se podría aumentar la vegetación en su entorno. La Tabla 33 presenta la puntuación de cada sistema de depuración para este criterio.

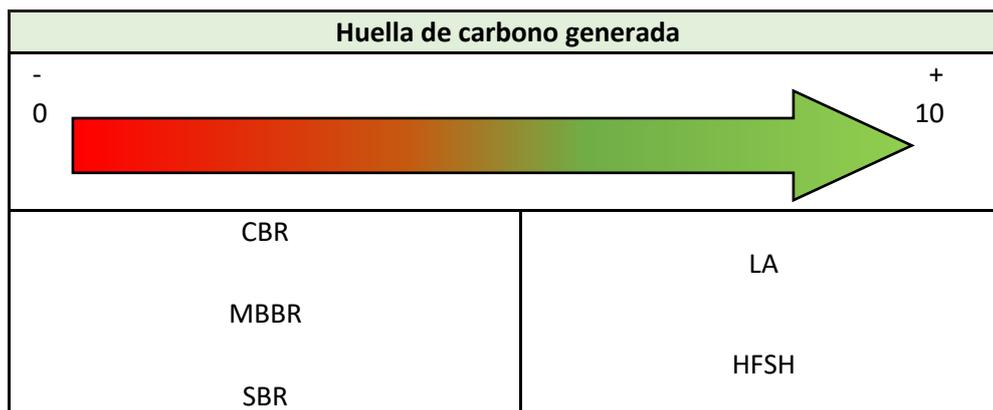
Tabla 33. Puntuación sistemas de depuración según la posibilidad de actuar como cobijo de especies animales. (elaboración propia)

SISTEMA DE DEPURACIÓN	PUNTUACIÓN
LAGUNAJE (LA)	9
HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL VERTICAL-HORIZONTAL (HFSV-HFSH)	9
CONTACTOR BIOLÓGICO ROTATIVO (CBR)	1
REACTOR SECUENCIAL (SBR)	1
REACTOR BIOPELICULA SOBRE LECHO MOVIL (MBBR)	2

5.1.2.5. Huella de carbono generada

Como hemos podido comprobar en el *Estado del Arte*, los sistemas de depuración extensivos requieren de un mayor aporte energético que las tecnologías intensivas, por lo que la huella de carbono de estos sistemas es más elevada. Los sistemas extensivos suelen requerir obras civiles más grandes que generan una mayor huella de carbono en su construcción. En los sistemas intensivos ocurre lo contrario, gracias a que son sistemas de depuración naturales, con vegetación, la energía necesaria para realizar el tratamiento es mucho menor y la obra civil necesaria para su creación es mucho menor. En la Tabla 34 se clasifica la *Huella de carbono generada* según el sistema de depuración estudiado.

Tabla 34. Clasificación del sistema de depuración adecuado según la huella de carbono generada. (elaboración propia)



Como se ha comentado en criterios anteriores, las EDAR son potenciales generadores de energía, sobre todo los sistemas extensivos, pero se necesita una inversión económica elevada. Debido a

esto, la huella de carbono generada por los sistemas intensivos, siendo estos más sostenibles en la depuración de aguas residuales, tal y como se puede ver en la puntuación obtenida en la Tabla 35.

Tabla 35. Puntuación sistemas de depuración según la huella de carbono generada. (elaboración propia)

SISTEMA DE DEPURACIÓN	PUNTUACIÓN
LAGUNAJE (LA)	9
HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL VERTICAL-HORIZONTAL (HFSV-HFSH)	9
CONTACTOR BIOLÓGICO ROTATIVO (CBR)	2
REACTOR SECUENCIAL (SBR)	2
REACTOR BIOPELICULA SOBRE LECHO MOVIL (MBBR)	2

5.1.3. Criterios económicos

Para los rangos de poblaciones que estamos tratando para ampliar estaciones de aguas residuales, los criterios económicos pueden ser muy importantes al no disponer de un presupuesto elevado dedicado para la depuración de las aguas.

En el Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones tenemos varios criterios con unos precios un tanto anticuados. Desde la publicación de este, 2011, hasta la actualidad, 2024, el IPC ha variado por lo que con la base de datos del INE podemos obtener una estimación para actualizar el Manual, obteniéndose un valor de 28.9%. (Tabla 36)

Tabla 36. Incremento del IPC entre enero de 2011 y marzo 2024. («Cálculo de variaciones del Índice de Precios de Consumo» 2024)

Índice	Porcentaje (%)
Nacional	28,9

5.1.3.1. Costes de explotación

Un primer criterio económico es el derivado de los costes de explotar estas infraestructuras. Como hemos comentado, es muy probable que la ampliación de este tipo de depuradoras se de en poblaciones pequeñas o medianas que no disponen de un elevado presupuesto. Con la ayuda del Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones y los datos obtenidos del INE se presentan en la Tabla 37 los costes de explotación para cada sistema de depuración que estamos estudiando.

Tabla 37. Clasificación del sistema de depuración adecuado según los costes de explotación adaptada de (de Miguel et al. 2010)

Tecnología	Rango de población (h-e)	Costes de explotación (€/h-e.año)
LA	100-5.000	43,83 - 10,31
HFSV	100-5.000	51,87 - 23,20
HFSH	100-5.000	51,87 - 23,20
FT _m	100-5.000	56,72 - 18,05
FIA	100-5.000	56,72 - 19,34
FIA _r	100-5.000	56,72 - 19,34
IP	100-5.000	52,85 - 18,05
CBR	500-10.000	30,94 - 20,62
SBR	500-10.000	31,10 - 21,03
LB	500-10.000	32,23 - 21,91
MBBR	500-10.000	43,83 - 28,36

Con la información actualizada, en Tabla 39, podemos dar los valores a cada sistema de depuración estudiado, siendo los sistemas de Contactor Biológico Rotativo y el Reactor Secuencial los tratamientos más económicos de explotar, de ahí que obtengan una puntuación de 9. Por el contrario, los Humedales obtienen la menor puntuación al ser los tratamientos más caros de explotar.

Tabla 38. Puntuación sistemas de depuración según los costes de explotación. (elaboración propia)

SISTEMA DE DEPURACIÓN	PUNTUACIÓN
LAGUNAJE (LA)	5
HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL VERTICAL-HORIZONTAL (HFSV-HFSH)	2
CONTACTOR BIOLÓGICO ROTATIVO (CBR)	9
REACTOR SECUENCIAL (SBR)	9
REACTOR BIOPELICULA SOBRE LECHO MOVIL (MBBR)	7

5.1.3.2. Costes de implantación.

Continuando con criterios económicos, el coste de implantación es un coste para tener en cuenta debido a que suele ser un coste elevado que se da en poco tiempo, durante la fase de construcción de esta. Para obtener estos costes seguimos el criterio anterior donde actualizamos el Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones con los datos de IPC obtenidos del INE, obteniendo los datos de la Tabla 39.

Tabla 39. Clasificación del sistema de depuración adecuado según los costes de implantación adaptada de (de Miguel et al. 2010)

Tecnología	Rango de población (h-e)	Costes de explotación (€/h-e.año)
LA	100-5.000	1031,20 322,25
HFSV	100-5.000	580,05 322,25
HFSH	100-5.000	580,05 348,03
FT _m	100-5.000	567,16 283,58
FIA	100-5.000	541,38 283,58
FIA _r	100-5.000	515,60 206,24
IP	100-5.000	502,71 335,14
CBR	500-10.000	631,61 438,26
SBR	500-10.000	902,30 257,80
LB	500-10.000	386,70 128,90
MBBR	500-10.000	591,45 322,25

Con la información actualizada, en la Tabla 40 damos valores a cada sistema de depuración estudiado, siendo el sistema de Reactor Secuencial el tratamiento más económico a la hora de su implantación, de ahí que obtengan una puntuación mayor. Por el contrario, el Lagunaje obtienen la menor puntuación al ser el tratamiento con un coste de implementación más elevado.

Tabla 40. Puntuación sistemas de depuración según los costes de implantación. (elaboración propia)

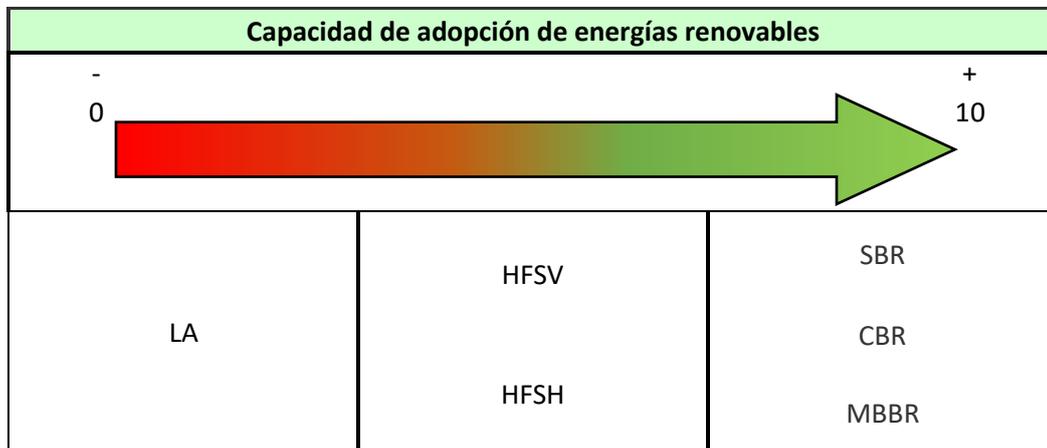
SISTEMA DE DEPURACIÓN	PUNTUACIÓN
LAGUNAJE (LA)	2
HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL VERTICAL-HORIZONTAL (HFSV-HFSH)	5
CONTACTOR BIOLÓGICO ROTATIVO (CBR)	4
REACTOR SECUENCIAL (SBR)	8
REACTOR BIOPELICULA SOBRE LECHO MOVIL (MBBR)	6

5.1.3.3. Capacidad de adopción de energías renovables

Como se ha indicado en el Estado del Arte de este trabajo, para poder ahorrar durante la explotación de las Estaciones de Aguas Residuales se busca el uso de energías renovables, ya sea con la instalación de paneles fotovoltaicos en los edificios dentro de la depuradora, la gestión de los fangos para la producción de biogás o incluso el uso de terrenos propios de la depuradora para la implantación de turbinas eólicas. Con la información obtenida en el Estado del Arte junto con los

criterios ya descritos podemos clasificar, en la Tabla 41, cada uno de nuestros sistemas según la capacidad que tiene para generar energías renovables.

Tabla 41. Clasificación del sistema de depuración adecuado según la capacidad de adopción de energías renovables. (elaboración propia)



En la Tabla 42 se observan como los sistemas de depuración como el SBR, CBR y MBBE obtienen puntuaciones más altas gracias a que son procesos de depuración que producen fangos que puede ser usado para la producción de biogás, así como disponen de instalaciones cuyo cubierta se puede usar para la generación de energía renovable con paneles fotovoltaicos.

Tabla 42. Puntuación sistemas de depuración según la capacidad de adopción de energías renovables. (elaboración propia)

SISTEMA DE DEPURACIÓN	PUNTUACIÓN
LAGUNAJE (LA)	2
HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL VERTICAL-HORIZONTAL (HFSV-HFSH)	5
CONTACTOR BIOLÓGICO ROTATIVO (CBR)	5
REACTOR SECUENCIAL (SBR)	8
REACTOR BIOPELICULA SOBRE LECHO MOVIL (MBBR)	9

5.1.4. Criterios de Desempate

A continuación, se explican y puntúan dos criterios más cuya función es corregir la matriz, si tras su elaboración para el caso de estudio, se obtienen dos o más sistemas de depuración con puntuaciones similares.

5.1.4.1. Plazo de ejecución

Como un primer criterio de desempate tenemos el plazo de ejecución, el cual evalúa el tiempo que se necesita para poner en marcha cada sistema de depuración, desde sus primeros compases en la construcción hasta finalmente la puesta en marcha. Unos plazos de ejecución más elevados suelen acarrear unos costes de implementación más elevados y a su vez, a mayores plazos, mayores posibilidades de demora, ocasionando más costes. En la Tabla 43 presentamos la clasificación para los sistemas de depuración estudiados.

Tabla 43. Clasificación del sistema de depuración adecuado según su plazo de ejecución. (elaboración propia)

Plazo de ejecución			
-			+
0			10
LA	HFSV	MBBR	CBR
	HFSH		SBR

Con toda la información que hemos ido obteniendo se llega a la conclusión de que aquellos sistemas de depuración prefabricados, capaces de llegar a su destino final en módulos, como el sistema de Reactor de Biopelícula sobre Lecho Móvil (MBBR), tienen unos plazos de ejecución mucho menores que por el contrario aquellos sistemas basados en plantaciones donde es necesario su correcta adaptación al medio. Las puntuaciones para este criterio se presentan en la Tabla 44.

Tabla 44. Puntuación sistemas de depuración según su plazo de ejecución. (elaboración propia)

SISTEMA DE DEPURACIÓN	PUNTUACIÓN
LAGUNAJE (LA)	3
HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL VERTICAL-HORIZONTAL (HFSV-HFSH)	4
CONTACTOR BIOLÓGICO ROTATIVO (CBR)	7
REACTOR SECUENCIAL (SBR)	7
REACTOR BIOPELICULA SOBRE LECHO MOVIL (MBBR)	6

5.1.4.2. Posibilidad de financiación

Este otro criterio de desempate nos ayuda a buscar que sistemas son mejores a la hora de obtener financiación, algo muy importante en estos casos de estudio donde nos encontramos con poblaciones pequeñas, pequeños ayuntamientos, con poco presupuesto destinado a la depuración de las aguas residuales. En la Tabla 45 presentamos la clasificación para los sistemas de depuración estudiados.

Tabla 45. Clasificación del sistema de depuración adecuado según su posibilidad de financiación. (elaboración propia)

Posibilidad de financiación		
-		+
0		
CBR	SBR	LA
	MBBR	HFSV
		HFSH

Aquellos sistemas de depuración basados en plantas, sistemas naturales, son sistemas sostenibles que buscan, entre otros, la regeneración de la biodiversidad a la vez que se realiza la depuración de las aguas residuales. Esto hace que los sistemas de humedales sean factibles de obtener financiación mediante subvenciones por parte de la Unión Europea. Las puntuaciones para este criterio se presentan en la Tabla 46.

Tabla 46. Puntuación sistemas de depuración según su posibilidad de financiación. (elaboración propia)

SISTEMA DE DEPURACIÓN	PUNTUACIÓN
LAGUNAJE (LA)	8
HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL VERTICAL-HORIZONTAL (HFSV-HFSH)	8
CONTACTOR BIOLÓGICO ROTATIVO (CBR)	4
REACTOR SECUENCIAL (SBR)	5
REACTOR BIOPELICULA SOBRE LECHO MOVIL (MBBR)	5

6. DESARROLLO

6.1. MATRIZ DE PUNTUACIÓN

Una vez que hemos recopilado toda la información relevante para cada sistema de tratamiento de aguas residuales y para cada criterio evaluado, se procede a elaborar de una primera matriz de puntuación (Tabla 47). Esta matriz muestra las puntuaciones asignadas a cada sistema según los diferentes criterios considerados. Es importante destacar que estas puntuaciones son valores numéricos que se obtienen de manera subjetiva, tal y como se ha indicado anteriormente.

Dado que estos valores son subjetivos, es fundamental reconocer que pueden variar dependiendo de las perspectivas y experiencias de diferentes grupos de profesionales en el campo de la depuración de aguas residuales. Por lo tanto, la matriz de puntuación inicial no debe considerarse definitiva, sino más bien como un punto de partida que puede ser ajustado y refinado. Esta flexibilidad permite incorporar nuevas perspectivas y actualizaciones basadas en el avance de la tecnología o cambios en las prioridades ambientales y regulatorias.

Al permitir ajustes en las puntuaciones, se facilita la adaptación del análisis a contextos específicos y a las necesidades cambiantes de los proyectos de tratamiento de aguas residuales. Esta adaptabilidad es crucial para desarrollar soluciones que sean tanto efectivas como sostenibles en el manejo de aguas residuales.

Tabla 47. Matriz de puntuación TIPO (elaboración propia)

	LAGUNAJE (LA)	HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL VERTICAL-HORIZONTAL (HFSV-HFSH)	CONTACTOR BIOLÓGICO ROTATIVO (CBR)	REACTOR SECUENCIAL (SBR)	REACTOR BIOPELICULA SOBRE LECHO MOVIL (MBBR)
CRITERIOS TÉCNICOS					
Calidad requerida del efluente según el medio receptor	3	6	6	7	9
Tamaño de la población a tratar	6	6	6	7	8
Superficie y características del terreno disponible para la ampliación de la EDAR	2	3	9	8	9
Origen y concentración de la contaminación en el agua residual	7	8	8	7	8
Versatilidad del tratamiento.	9	4	4,5	7	4
Capacidad de adaptación a las condiciones climáticas	1	5	5	9	9
Cantidad de fangos generada y estabilización de los fangos	3	3	5	7	7
Complejidad en la explotación y mantenimiento	9	8	5	7	7
Capacidad de automatización	1	3	6,5	8	9
CRITERIOS AMBIENTALES					
Producción de malos olores	1	7	7	8	7
Generación de ruidos.	10	9	5	2	2
Integración paisajística	9	9	3	3	3
Posibilidad de actuar como cobijo de especies animales	9	9	1	1	2
Huella de carbono generada	9	9	2	2	2
CRITERIOS DE EXPLOTACIÓN					
Costes de explotación	5	2	9	9	7
Costes de implantación	2	5	4	8	6
Capacidad de adopción de energías renovables	2	5	5	8	9
SUMATORIO	88	101	91	108	108
CRITERIOS DE DESEMPATE					
Plazo de ejecución	3	4	7	7	6
Posibilidad de financiación	8	8	4	5	5
SUMATORIO DESEMPATE	11	12	11	12	11
SUMATORIO TOTAL	99	113	102	120	119

Al analizar la matriz de puntuación inicial, observamos que, si todos los criterios evaluados tuvieran el mismo peso, el sistema de depuración más adecuado sería el Reactor Secuencial (SBR). No obstante, es poco práctico asignar igual importancia a todos los criterios dado que algunos pueden ser más relevantes que otros dependiendo de cada caso de estudio. Por esta razón, se asignará a cada criterio un valor numérico, como se observa en la Tabla 48, que oscilará entre 1 y 5, donde 1 indica que el criterio es de menor relevancia y 5 señala una alta relevancia para el caso de estudio en cuestión.

Tabla 48. Escala para la evaluación de criterios (elaboración propia)

PUNTUACIÓN	PESO
1	MUY POCO REVELANTE
2	POCO REVELANTE
3	MEDIANAMENTE RELEVANTE
4	RELEVANTE
5	MUY RELEVANTE

Una vez establecidos estos valores, la herramienta empleada calcula automáticamente el porcentaje que corresponde a cada criterio. Este cálculo se realiza multiplicando el valor asignado a cada criterio por 100 y dividiendo el resultado entre la suma total de todos los valores asignados. Este porcentaje representa el peso específico de cada criterio dentro del análisis global.

Posteriormente, en conformidad con el método PATTERN, estos porcentajes se utilizan para ajustar los valores originales en la matriz de puntuación. Cada puntuación inicial de los sistemas de depuración se multiplica por el porcentaje correspondiente a su criterio asociado. Este proceso refina la evaluación inicial y proporciona una comparación más matizada y precisa de las opciones disponibles.

El sistema de depuración que acumule la puntuación más alta tras este ajuste será considerado como el más adecuado para el estudio en cuestión. Esto permite una toma de decisiones basada en una evaluación detallada y ponderada de múltiples factores, reflejando un enfoque holístico y bien informado.

En la Tabla 49 se explica de forma esquemática el funcionamiento de la herramienta multicriterio creada para la selección del sistema de depuración más adecuado para ampliar y/o optimizar depuradoras existentes.

Tabla 49. Explicación sistema de puntuación (elaboración propia)

CRITERIO	VALOR ASIGNADO	PORCENTAJE OBTENIDO	SISTEMA DE DEPURACIÓN 1		SISTEMA DE DEPURACIÓN 2		SISTEMA DE DEPURACIÓN X	
			DATOS MATRIZ DE PUNTUACIÓN	VALOR OBTENIDO	DATOS MATRIZ DE PUNTUACIÓN	VALOR OBTENIDO	DATOS MATRIZ DE PUNTUACIÓN	VALOR OBTENIDO
critero 1	n1	$n1/\sum nn$	C11	$(n1/\sum nn)*C11$	C21	$(n1/\sum nn)*C21$	CX1	$(n1/\sum nn)*CX1$
critero 2	n2	$n2/\sum nn$	C12	$(n2/\sum nn)*C12$	C22	$(n2/\sum nn)*C22$	CX2	$(n1/\sum nn)*CX2$
critero 3	n3	$n3/\sum nn$	C13	$(n3/\sum nn)*C13$	C23	$(n3/\sum nn)*C23$	CX3	$(n1/\sum nn)*CX3$
.
.
.
.
critero n	nn	$nn/\sum nn$	C1n	$(nN/\sum nn)*C1n$	C2n	$(nN/\sum nn)*C2n$	Cxn	$(n1/\sum nn)*Cxn$
$\sum nn$			Σ SISTEMA DE DEPURACIÓN 1		Σ SISTEMA DE DEPURACIÓN 2		Σ SISTEMA DE DEPURACIÓN X	

- El VALOR ASIGNADO corresponde a un valor entre 1 y 5, explicado anteriormente, donde se dará este valor según el caso de estudio. La Ilustración 17 presenta el desplegable para asignar el valor.



Ilustración 17. Desplegable para escoger valor asignado a cada criterio (elaboración propia)

- A la hora de escoger el valor n para cada criterio, en la matriz nos sale un desplegable donde se deberá seleccionar el valor que se considera adecuado.
- El PORCENTAJE OBTENIDO se da de forma automática una vez completados todos los valores en la columna VALOR ASIGNADO
- Los DATOS MATRIZ DE PUNTUACIÓN son los datos obtenidos anteriormente para cada sistema de depuración de estudio para cada criterio.
- El VALOR OBTENIDO nos los da de forma automática la MATRIZ multiplicando el PORCENTAJE OBTENIDO por los DATOS MATRIZ DE PUNTUACIÓN.
- La suma de la columna VALOR OBTENIDO nos da la puntuación obtenida por el sistema de depuración en el caso de estudio. El sistema de depuración que obtenga mayor puntuación sería el sistema más adecuado. En caso de que dos o más sistemas de depuración obtengan puntuaciones similares se tienen dos criterios de desempate.
- Los CRITERIOS DE DESEMPATE funcionan igual que los demás criterios, siendo estos dos criterios nuevos que se pueden usar en caso de obtener dos o más sistemas de depuración con puntuaciones similares o se tengan dudas sobre el sistema ganador.

A continuación, presentamos un ejemplo, Tabla 50, de cómo se aplicaría esta metodología utilizando una matriz con valores aleatorios para ilustrar el proceso de asignación y cálculo. Esta matriz ejemplifica cómo se distribuyen y recalculan los valores basados en la importancia relativa de cada criterio, proporcionando una herramienta analítica robusta para guiar las decisiones en el tratamiento de aguas residuales.

Tabla 50. Ejemplo de matriz de decisión para un caso teórico (elaboración propia)

	VALOR ASIGNADO	PORCENTAJE OBTENIDO	LAGUNAJE (LA)		HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL VERTICAL-HORIZONTAL (HFSV-HFSH)		CONTACTOR BIOLÓGICO ROTATIVO (CBR)		REACTOR SECUENCIAL (SBR)		REACTOR BIOPELÍCULA SOBRE LECHO MOVIL (MBBR)	
			Datos matriz de puntuación	VALOR OBTENIDO	Datos matriz de puntuación	VALOR OBTENIDO	Datos matriz de puntuación	VALOR OBTENIDO	Datos matriz de puntuación	VALOR OBTENIDO	Datos matriz de puntuación	VALOR OBTENIDO
CRITERIOS TÉCNICOS												
Calidad requerida del efluente según el medio receptor	5 (muy relevante)	8%	3	0,23	6	0,46	6	0,46	7	0,54	9	0,69
Tamaño de la población a tratar	4 (relevante)	6%	6	0,37	6	0,37	6	0,37	7	0,43	8	0,49
Superficie y características del terreno disponible para la ampliación de la EDAR	1 (muy poco relevante)	2%	2	0,03	3	0,05	9	0,14	8	0,12	9	0,14
Origen y concentración de la contaminación en el agua residual	4 (relevante)	6%	7	0,43	8	0,49	8	0,49	7	0,43	8	0,49
Versatilidad del tratamiento.	5 (muy relevante)	8%	9	0,69	4	0,31	4,5	0,35	7	0,54	4	0,31
Capacidad de adaptación a las condiciones climáticas	3 (medianamente relevante)	5%	1	0,05	5	0,23	5	0,23	9	0,42	9	0,42
Cantidad de fangos generada y estabilización de los fangos	1 (muy poco relevante)	2%	3	0,05	3	0,05	5	0,08	7	0,11	7	0,11
Complejidad en la explotación y mantenimiento	4 (relevante)	6%	9	0,55	8	0,49	5	0,31	7	0,43	7	0,43
Capacidad de automatización	1 (muy poco relevante)	2%	1	0,02	3	0,05	6,5	0,10	8	0,12	9	0,14
CRITERIOS AMBIENTALES												
Producción de malos olores	1 (muy poco relevante)	2%	1	0,02	7	0,11	7	0,11	8	0,12	7	0,11
Generación de ruidos.	4 (relevante)	6%	10	0,62	9	0,55	5	0,31	2	0,12	2	0,12
Integración paisajística	4 (relevante)	6%	9	0,55	9	0,55	3	0,18	3	0,18	3	0,18
Posibilidad de actuar como cobijo de especies animales	3 (medianamente relevante)	5%	9	0,42	9	0,42	1	0,05	1	0,05	2	0,09
Huella de carbono generada	5 (muy relevante)	8%	9	0,69	9	0,69	2	0,15	2	0,15	2	0,15
CRITERIOS DE EXPLOTACIÓN												
Costes de explotación	4 (relevante)	6%	5	0,31	2	0,12	9	0,55	9	0,55	7	0,43
Costes de implantación	4 (relevante)	6%	2	0,12	5	0,31	4	0,25	8	0,49	6	0,37
Capacidad de adopción de energías renovables	4 (relevante)	6%	2	0,12	5	0,31	5	0,31	8	0,49	9	0,55
SUMATORIO		88%	5,26		5,55		4,43		5,31		5,23	
CRITERIOS DE DESEMPATE												

Plazo de ejecución	5 (muy relevante)	8%	3	0,18	4	0,25	7	0,43	7	0,43	6	0,37
Posibilidad de financiación	3 (medianamente relevante)	5%	8	0,49	8	0,49	4	0,25	5	0,31	5	0,31
SUMATORIO		12%		0,68		0,74		0,68		0,74		0,68
SUMATORIO TOTAL		100%		5,94		6,29		5,11		6,05		5,91

7. RESULTADOS

Una vez que hemos desarrollado la matriz de evaluación para cada uno de los criterios y cada uno de los sistemas de depuración estudiados y, además, comprendemos su funcionamiento, comenzamos con la siguiente etapa de este trabajo que consiste en aplicar esta matriz de evaluación a casos reales de estudio para observar los resultados que nos proporciona y ver si estos resultados son correctos. Esta aplicación práctica nos permitirá validar la efectividad de la matriz para los diferentes casos de estudio.

7.1. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA A CASOS PRÁCTICOS

El siguiente paso de este trabajo se centrará en analizar casos particulares para evaluar la funcionalidad del método PATTERN en la selección del sistema de depuración más adecuado para la ampliación y/o optimización de depuradoras existentes. Este análisis permitirá verificar que sistema de depuración es más adecuado para cada caso de estudio usando los diversos criterios de selección que se han ido estudiando.

Para realizar este análisis, se utilizará información detallada y actualizada de varias Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales de las cuales se han recopilado datos muy importantes para la realización de este trabajo. Además, se han realizado visitas a ambas instalaciones para observar de primera mano su funcionamiento y comprobar cómo se lleva a cabo la explotación y el mantenimiento. El poder visitar las EDAR hace que se pueda recopilar la información de forma actualizada y de primera mano al poder pasar tiempo con las personas encargadas del funcionamiento correcto de la misma.

Este enfoque asegura que las recomendaciones basadas en el método PATTERN no solo se fundamenten en datos teóricos, sino también en observaciones en campo, proporcionando que las puntuaciones a los criterios sean lo más correctas posibles y consiguiendo así un correcto uso de la matriz para obtener el mejor sistema de tratamiento de aguas residuales para el caso de estudio.

Como este trabajo fin de máster está enfocado, tanto para poder ampliar como para poder optimizar depuradoras existentes, los casos prácticos para validar la metodología están formados por una depuradora que ha de ser optimizada y una depuradora que necesita ser ampliada. La depuradora que necesita optimizarse es la que da servicio a los municipios de El Barraco y San Juan de la Nava, en Ávila, ya que esta sobredimensionada. La depuradora que necesitaba ser ampliada es la depuradora ubicada en un municipio a las afueras de la ciudad de Barcelona, Viladecavalls, que necesitaba una ampliación debido a que las instalaciones actuales no son capaces de realizar una correcta depuración de las aguas debido al aumento de habitantes equivalentes.

7.1.1. El Barraco y San Juan de la Nava

Como primer caso de estudio nos encontramos en la vertiente sureste de la provincia de Ávila, donde tenemos el municipio de El Barraco y el de San Juan de la Nava. En la actualidad en el municipio de el Barraco nos encontramos con una Estación de Aguas Residuales que recoge las aguas de ambos municipios. Durante los próximos puntos estudiaremos la depuradora que hay en la actualidad, que problemática tiene y el porqué de la necesidad de optimización de esta.

7.1.1.1. Antecedentes

Los municipios de El Barraco y San Juan de la Nava están situado al sureste de la provincia de Ávila, en la comarca natural del Valle del Alberche, a los pies del puerto de la Paramera, desde donde otea los pinares del Valle Iruelas, el Valle del Alberche y la Sierra de Gredos. (Ilustración 18)



Ilustración 18. Ubicación de los municipios de El Barraco y San Juan de la Nava («Ayuntamiento de El Barraco» [sin fecha])

Respecto a la depuración de aguas de ambos municipios, en la actualidad, nos encontramos con una Estación de Aguas Residuales ubicada a las afueras del municipio de El Barraco que recoge las aguas residuales tanto de El Barraco como de San Juan de la Nava, al encontrarse estos dos municipios a una distancia menor de 3 km entre sí. Esta depuradora se encuentra eficientemente ubicada a las afuera del municipio de El Barraco, como se aprecia en la Ilustración 19, donde para acceder se dispone de una calzada hormigonada de 4 metros de ancho. Esta ubicación a las afuera hace que esta depuradora no tenga una importante afección a la población al estar alejada del

núcleo urbano y estar rodeada de tierra de cultivos, zona de monte bajo con abundantes encinares y a los pies de esta nos encontramos con el Arroyo de los Charquillos.

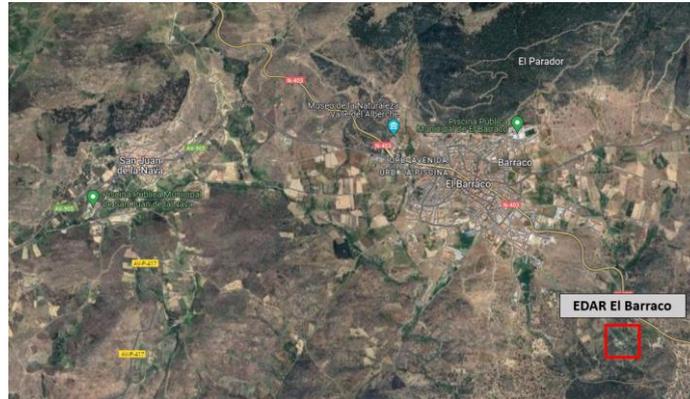


Ilustración 19. Ubicación EDAR El Barraco (elaboración propia)

Tras una primera visita a la Estación Depuradora de Aguas Residuales de El Barraco nos encontramos que tiene los siguientes elementos principales (Ilustración 20):

- Pretratamiento
- Desarenado – Desengrasado
- Reactor Biológico de fangos activos
- Decantadores Secundarios (tanques de tormenta en invierno)
- Línea de Fangos



Ilustración 20. Esquema EDAR El Barraco (elaboración propia)

7.1.1.2. Introducción

Disponemos de una depuradora diseñada para una capacidad de 22.500 habitantes equivalentes. Sin embargo, tras realizar una visita a la instalación y conversar con el personal encargado de su explotación y mantenimiento, se nos ha indicado que la depuradora es excesivamente grande en relación con la cantidad de agua residual que recibe actualmente.

Primero, vamos a definir que son los habitantes equivalentes. La definición oficial de habitante equivalente se refiere a la carga orgánica biodegradable que tiene una demanda bioquímica de oxígeno de cinco días (DBO5) de 60 gramos de oxígeno por día, según el Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, que establece las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas. Es importante destacar que la relación entre habitantes reales y equivalentes no es de uno a uno; es decir, un habitante equivalente no equivale directamente a un habitante real. En cualquier población, el número de habitantes equivalentes siempre es mayor que el de habitantes reales. Esto se debe a que, además de la contaminación resultante de las viviendas, procedente de los fregaderos, inodoros, etc, existe contaminación adicional procedente de industrias, negocios y otras fuentes. La estimación de la cantidad de habitantes equivalentes es un factor crucial en el dimensionamiento de las instalaciones de depuración, ya que determina la capacidad necesaria para tratar eficientemente las aguas residuales generadas por una comunidad. («Confederación Hidrográfica del Júcar - Servicio de Atención al Ciudadano - FAQ» 2024)

A continuación, procederemos a verificar si efectivamente esta depuradora está sobredimensionada para las necesidades reales de tratamiento de los municipios a los que sirve. Comenzaremos estudiando la población de ambos municipios

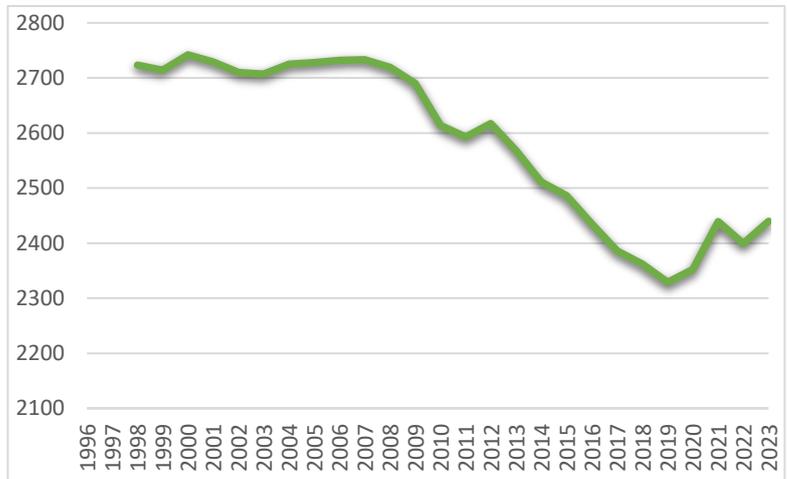
- Población

En la Tabla 51, exponemos los datos de población obtenidos en la página web del Instituto Nacional de Estadística para ambos municipios.

Tabla 51. Evolución población en ambos municipios («Ávila» [sin fecha])

	El Barraco	San Juan de la Nava	Totales
1996	2010	704	2714
1997			
1998	2025	698	2723
1999	2019	695	2714
2000	2047	695	2742
2001	2046	683	2729
2002	2053	657	2710
2003	2064	643	2707
2004	2090	635	2725
2005	2109	619	2728

2006	2129	603	2732
2007	2156	577	2733
2008	2165	554	2719
2009	2152	538	2690
2010	2101	513	2614
2011	2077	516	2593
2012	2085	532	2617
2013	2033	535	2568
2014	1989	522	2511
2015	1968	518	2486
2016	1923	512	2435
2017	1886	500	2386
2018	1889	473	2362
2019	1861	468	2329
2020	1893	459	2352
2021	1973	466	2439
2022	1956	443	2399
2023	2005	435	2440



Revisando la tabla de población vemos como la población de El Barraco se mantiene con una población más o menos estable durante los últimos 15 años, sin embargo, en el municipio de San Juan de la Nava la población ha ido disminuyendo desde que se tienen datos. Conociendo la zona y tras conversar con gente de ambas poblaciones, no se prevé que estas tendencias de población varíen. Aunque no disponemos de datos suficientes para conocer la población futura, las previsiones que se estiman son un población muy similar a la actual.

- Caudales

Gracias a la visita realizada a la EDAR se pudieron obtener los datos de consumo, en m³, para cada mes del año 2023. (Tabla 52)

Tabla 52. Consumos en la entrada de la EDAR (elaboración propia)

AÑO 2023	CONSUMO (m3)
ENERO	32028,00
FEBRERO	31461,00
MARZO	29165,00
ABRIL	20782,00
MAYO	23241,00
JUNIO	34935,00
JULIO	21582,00
AGOSTO	20782,00
SEPTIEMBRE	19916,00
OCTUBRE	29646,00
NOVIEMBRE	8226,00
DICIEMBRE	19637,00

Al analizar la tabla de consumo, observamos que durante los meses de invierno se registra un aumento en el consumo de agua, atribuible principalmente a las precipitaciones, abundantes en la zona de estudio. En el mes de junio, se observa un pico en el consumo, provocado por el vaciado y la limpieza de las piscinas municipales y privadas presentes en ambos municipios. Durante los meses de verano, aunque los niveles de consumo no alcanzan los picos observados en invierno, sí se experimenta un incremento debido a la afluencia de población estacional que estos municipios reciben durante este periodo.

- *Industria*

Algo importante que hemos de analizar son las industrias de ambos municipios. En el municipio de San Juan de la Nava disponemos de alguna pequeña construcción para el cuidado de ganado, pero poco importante. En el municipio de El Barraco sí que localizamos más industrialización con la presencia de la Cooperativa de Ganaderos de Caprino del Alberche, la cervecería artesanal Cervezas Raíz Cuadrada y la Granja Avícola Redondo.

- *Habitantes equivalentes*

Con estos tres datos vamos a poder decidir el número de habitantes equivalentes:

Población: La población en San Juan de la Nava es cada año menor y en El Barraco se mantiene estable pero las previsiones a corto y largo plazo es que este número disminuya.

Caudales: Los caudales más importantes de entrada a la EDAR son los procedentes de las precipitaciones y del vaciado de las piscinas una vez al año.

Industria: La industria se concentra en El Barraco, sin embargo, a lo largo de los últimos años, hablando con la gente de ambas poblaciones cuentan que cada vez hay menos industria y menos población ganadera, por lo que la industria es cada vez menor y las previsiones indican que no va a crecer.

Con todos estos datos podemos hacer una estimación de los habitantes equivalentes. Para este caso consideramos que los habitantes equivalentes actuales son 3.000 hab-eq y las previsiones futuras es que este número descienda debido a la continua disminución de habitantes y fábricas.

Vemos que lo comentado inicialmente por el personal que se dedica a la explotación de esta EDAR es correcto, tenemos en la actualidad una depuradora para 22.500 habitante equivalente que solo está depurando las aguas para 3.000 hab-eq.

La instalación sobredimensionada también genera varios problemas importantes entre los que destacan unos gastos de operación y mantenimiento muy elevados. Esta sobredimensión no solo incrementa los gastos, sino que también hace que la depuración de las aguas no sea eficiente. El que entren 7 veces menos cantidad de agua de la que se esperaba hace que la proporción entre la capacidad de la planta y el volumen real de aguas residuales tratadas dificulta el funcionamiento correcto y eficiente lo que se traduce en una mala calidad del agua tratada. No se dan los parámetros necesarios en la salida de la planta. En resumen, los costes elevados, el intenso mantenimiento requerido y la ineficacia en la depuración son consecuencias directas de tener una instalación que excede en gran medida las necesidades reales de tratamiento.

Por todo lo anterior, se considera necesario usar la herramienta creada anteriormente para optimizar la Estación de Aguas Residuales que da servicio a San Juan de la Nava y El Barraco. El objetivo es seleccionar un sistema de tratamiento biológico más adecuado que minimice los costes de explotación y mantenimiento, al mismo tiempo que asegure una depuración eficaz de las aguas residuales de ambas localidades.

7.1.1.3. *Aplicación de la Herramienta*

A continuación, evaluaremos cada uno de los criterios de la herramienta, anteriormente creada, al caso de estudio. Con este análisis, buscamos identificar el sistema de depuración más adecuado para optimizar la estación depuradora en cuestión.

CRITERIOS TÉCNICOS

- *Calidad requerida del efluente según el medio receptor*

La calidad requerida del efluente tiene una importancia enorme, ya que debe cumplir con las normativas ambientales para proteger el medio receptor. El vertido de aguas con una depuración insuficiente puede causar graves daños ambientales, como la eutrofización y la contaminación de recursos hídricos, afectando negativamente la biodiversidad y la salud pública.

Además, dado que la estación depuradora actual está sobredimensionada, la eficiencia de la depuración es un desafío que no se está realizando correctamente. Optimizar la planta para asegurar una depuración efectiva es crucial no solo para cumplir con los estándares legales, sino también para garantizar la sostenibilidad ambiental a largo plazo.

Por todo ello, se le da una puntuación a este criterio de: **5 (muy relevante)**

- *Tamaño de la población a tratar*

El tamaño de la población a tratar es un factor crucial. Conocer los habitantes equivalentes permite dimensionar adecuadamente la capacidad de la planta, asegurando que pueda manejar los volúmenes de agua residual generados sin comprometer la calidad del tratamiento. En nuestro caso, la planta está sobredimensionada, lo que indica una diferencia significativa entre la capacidad diseñada, 22.500 hab-eq y las necesidades actuales, 3.000 hab-eq, generando malos resultados en la depuración de las aguas con unos costes muy elevados.

En el caso que nos encontramos, donde la población disminuye, al igual que la actividad industrial, es necesario reevaluar y adaptar la capacidad de tratamiento para evitar desperdicios de recursos y optimizar el funcionamiento de la EDAR.

Por todo ello, se le da una puntuación a este criterio de: **5 (muy relevante)**

- *Superficie y características del terreno disponible para la ampliación de la EDAR*

En este caso específico, la disponibilidad de terreno no representa una limitación significativa para la ampliación de la planta. Dentro de la parcela donde se encuentra en la actualidad la EDAR se dispone de suficiente superficie para realizar la optimización. Además, las características del terreno son adecuadas para la construcción y operación de instalaciones nuevas, lo que reduce la complicación.

Dado que hay bastante terreno disponible y no se prevén problemas significativos relacionados con el espacio, este criterio se considera menos relevante en comparación con otros factores críticos.

Por todo ello, se le da una puntuación a este criterio de: **2 (poco relevante)**

- *Origen y concentración de la contaminación en el agua residual*

El origen y la concentración de la contaminación en el agua residual son factores importantes a la hora de diseñar una EDAR. En el caso específico que estamos estudiando la mayor parte del agua residual que llega a la planta proviene de hogares y de escorrentías pluviales, lo que implica una carga contaminante relativamente uniforme y predecible.

Además, la presencia industrial en la zona es cada vez menor, lo que significa que la entrada de contaminantes industriales es muy pequeña y tienden a disminuir a corto y largo plazo. Por estas razones, aunque es importante considerar el origen y la concentración de la contaminación, no es un factor crítico en la optimización de la planta en este contexto.

Por todo ello, se le da una puntuación a este criterio de: **3 (medianamente relevante)**

- *Versatilidad del tratamiento*

La versatilidad del tratamiento se refiere a la capacidad del sistema para adaptarse a diferentes tipos y cargas de contaminantes. En este caso particular que estamos estudiando la principal fuente de aguas residuales es residencial y pluvial, con poca variabilidad en la composición del agua de entrada en la planta.

Además, dado que la actividad industrial en la zona es mínima, no se prevé una necesidad significativa de ajustar el tratamiento a diferentes tipos de contaminantes. Por lo tanto, la versatilidad del sistema de tratamiento no es un factor crítico en la optimización de la planta de tratamiento de aguas residuales para estos municipios.

Por todo ello, se le da una puntuación a este criterio de: **2 (poco relevante)**

- *Capacidad de adaptación a las condiciones climáticas*

La capacidad de adaptación a las condiciones climáticas es un aspecto para considerar en el diseño y, a continuación, en la operación de una estación de aguas residuales, ya que la temperatura influye significativamente en el tratamiento efectivo de las aguas residuales.

En las poblaciones de San Juan de la Nava y El Barraco, el clima es frío, pero no presenta temperaturas extremas durante el invierno. Durante los meses más fríos de invierno, las heladas son comunes durante la noche, pero durante el día las temperaturas suelen ser siempre mayores de 0°C. Dado que las condiciones climáticas no son extremadamente severas, la capacidad de adaptación a estas condiciones no es un factor crítico en la optimización de la planta.

Por todo ello, se le da una puntuación a este criterio de: **3 (medianamente relevante)**

- *Cantidad de fangos generada y estabilización de los fangos*

La cantidad de fangos generada y la estabilización de estos son factores muy importantes y costes a la hora de gestionar una EDAR. Sin embargo, en este caso particular, la cantidad de fangos producidos es relativamente baja, dada la naturaleza predominantemente residencial y pluvial del influente.

Además, la planta actual tiene capacidad suficiente para operar y estabilizar los fangos generados sin necesidad de ajustes importantes. Por lo tanto, la generación y estabilización de fangos no representan un desafío crítico ni un factor determinante en la optimización de la EDAR que estamos estudiando.

Por todo ello, se le da una puntuación a este criterio de: **1 (muy poco relevante)**

- *Complejidad en la explotación y mantenimiento*

Tener una EDAR con unas características especiales hace necesario tener de manera constante personal altamente cualificado, junto con mayores costes, tanto de personal como durante el proceso, y, por ende, un riesgo mayor de que se produzcan fallos durante la explotación. Dado que la planta actual ya se enfrenta a desafíos debido a su sobredimensión, es crucial que la explotación y mantenimiento se simplifiquen lo máximo posible para mejorar la eficiencia y reducir los costes. Esto hará que la planta sea más sostenible a largo plazo, incluso con una disminución en la población y la carga contaminante.

Por todo ello, se le da una puntuación a este criterio de: **4 (relevante)**

- *Capacidad de automatización*

La capacidad de automatización es un factor muy interesante a la hora de optimizar y/o ampliar una EDAR. La implementación de sistemas automatizados puede mejorar altamente la eficiencia operativa, reducir la dependencia del trabajo manual y minimizar errores humanos. Además, la automatización permite un monitoreo continuo y ajustes en tiempo real, lo que es crucial para mantener la calidad del tratamiento de aguas.

Dada la sobredimensión de la planta y los elevados costes de operación y mantenimiento actuales, la capacidad de automatización se vuelve aún más importante. Automatizar procesos puede ayudar a gestionar mejor la variabilidad en el volumen y la composición del agua residual, optimizando el uso de recursos y reduciendo costes operativos. Por lo tanto, este criterio se considera altamente relevante para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de la planta.

Por todo ello, se le da una puntuación a este criterio de: **4 (relevante)**

CRITERIOS AMBIENTALES

- *Producción de malos olores*

La producción de malos olores es un aspecto que es necesario considerar en el diseño y operación de una Estación Depuradora de Aguas Residuales. La planta actual se encuentra ubicada a las afueras de los núcleos urbanos, y no hay casas ni construcciones cercanas que puedan verse afectadas por los olores.

La distancia de la planta respecto a las áreas residenciales minimiza el impacto de los posibles malos olores en la población. Por lo tanto, aunque la gestión de malos olores es siempre importante, su relevancia en este caso de estudio es realmente baja.

Por todo ello, se le da una puntuación a este criterio de: **1 (muy poco relevante)**

- *Generación de ruidos*

La generación de ruidos es un aspecto para considerar muy importante ya que puede afectar tanto a la población cercana como a la fauna local. En este caso, la planta de tratamiento está situada lejos de las áreas residenciales, lo que significa que el ruido producido no afecta a la población humana.

Aunque hay presencia de animales salvajes en la zona, como jabalíes, estos no suelen acercarse a la zona, no se han reportado daños en la planta por animales salvajes. Por ello el ruido no tiene un impacto significativo en la fauna local. Por lo tanto, la generación de ruidos no representa un problema crítico en este contexto específico.

Por todo ello, se le da una puntuación a este criterio de: **2 (poco relevante)**

- *Integración paisajística*

La integración paisajística se refiere a cómo una Estación Depuradora de Aguas Residuales se incorpora visual y funcionalmente al entorno que la rodea. En este caso, la optimización de la planta no implicará cambios significativos en su apariencia externa, ya que se utilizará la misma parcela y muchas de las construcciones existentes seguirán en uso.

Además, la planta está situada lejos de los núcleos urbanos, lo que minimiza cualquier impacto visual que pudiera tener sobre la población de ambos municipios. Dado que la optimización no alterará sustancialmente la estructura y ubicación de la planta, la integración paisajística no es un factor crítico en este contexto.

Por todo ello, se le da una puntuación a este criterio de: **2 (poco relevante)**

- *Posibilidad de actuar como cobijo de especies animales*

La posibilidad de que cualquier depuradora o construcción, ya sea nueva o exista desde hace tiempo, actúe como cobijo de especies animales es un criterio que considerar en términos de que se pueda mejorar en su sostenibilidad gracias a su impacto ambiental positivo. Aunque la planta ya existe y no va a cambiar significativamente con la optimización, hay intentar hacer medidas que faciliten su uso por parte de ciertas especies, especialmente aves y pequeños animales.

Por ejemplo, se podrían introducir áreas verdes o estructuras específicas que proporcionen hábitats seguros y adecuados para estas especies. Estas adaptaciones no solo beneficiarían a la fauna local, sino que también podrían contribuir a mejorar la percepción ambiental de la planta.

Por todo ello, se le da una puntuación a este criterio de: **3 (medianamente relevante)**

- *Huella de carbono generada*

La huella de carbono generada es un criterio relevante en la evaluación de una Estación Depuradora de Aguas Residuales, ya que refleja el impacto ambiental del sistema en términos de emisiones de gases de efecto invernadero. En este contexto, la optimización de la planta ofrece una oportunidad significativa para reducir su huella de carbono.

Implementar tecnologías más eficientes y procesos optimizados, junto con la estabilización de los fangos y su posterior uso para generar energía, ayudará de forma significativa a reducir la huella de carbono. Además, la adopción de energías renovables y prácticas sostenibles puede contribuir aún más a reducir la huella de carbono de la planta. Dado el creciente enfoque en la sostenibilidad y la reducción de emisiones, este criterio es especialmente importante.

Por todo ello, se le da una puntuación a este criterio de: **4 (relevante)**

CRITERIOS DE EXPLOTACIÓN

- *Costes de explotación*

Los costes de explotación son un factor crucial en la gestión de una planta depuradora, y en esta planta es un criterio para tener en cuenta. Actualmente, los gastos de operación, que incluye el coste de personal y de reparaciones, son muy elevados debido a la sobredimensión de la planta y su funcionamiento deficiente. Este desajuste no solo incrementa los costes de operación, sino que también afecta la eficacia general del tratamiento.

Optimizar la planta para que sea más eficiente durante su explotación es esencial para reducir estos costes. Implementar mejoras tecnológicas y operativas puede ayudar a ajustar la capacidad de la planta a las necesidades reales, disminuyendo así los costes de energía, mantenimiento y mano de obra. Dado el impacto financiero significativo, la reducción de los costes de explotación es un criterio altamente relevante.

Por todo ello, se le da una puntuación a este criterio de: **4 (relevante)**

- *Costes de implantación*

Los costes de implantación se refieren a los gastos iniciales necesarios, ya sea para construir una nueva planta o para optimizar la existente. Si bien es importante considerar la inversión inicial requerida para realizar las mejoras necesarias, esta debe balancearse con los beneficios a largo plazo en términos de eficiencia y reducción de costes que se esperan.

Dado que la planta ya está construida y la optimización no implica una reconstrucción total, sino ajustes y mejoras específicas, los costes de implantación son significativos, pero no críticos. Evaluar cuidadosamente estos costes ayuda a asegurar que la inversión sea viable y justificada por las mejoras operativas esperadas.

Por todo ello, se le da una puntuación a este criterio de: **3 (medianamente relevante)**

- *Capacidad de adopción de energías renovables*

La capacidad de adopción de energías renovables es un criterio nuevo, que cada vez hay que tener más en cuenta, no solo en este caso, sino en todas las construcciones que se realizan en general. Incorporar fuentes de energía renovable, como paneles solares o sistemas de biogás, puede reducir significativamente la dependencia de fuentes de energía no renovables y disminuir los costes operativos a largo plazo, llegando a conseguir que la planta tenga coste energético 0, es decir, que no dependa de energía externa para su correcto funcionamiento, ahorrando significativamente sus costes.

Además, el uso de energías renovables contribuye a reducir la huella de carbono de la planta, alineándose con los objetivos de sostenibilidad sostenible y las normativas actuales sobre emisiones. Dada la importancia de la sostenibilidad y la eficiencia energética, la capacidad de integrar energías renovables en la operación de la planta es un factor crucial para su optimización.

Por todo ello, se le da una puntuación a este criterio de: **5 (muy relevante)**

Con todos estos criterios evaluados y las puntuaciones correspondientes asignadas, procedemos a introducir estos valores en la herramienta de análisis multicriterio. Esta herramienta nos ayuda a generar una matriz de decisión que refleje de manera integral la relevancia de cada criterio en el contexto específico de la planta de tratamiento de aguas residuales.

Al introducir cada uno de los valores en la herramienta, esta ponderará cada criterio según su importancia relativa, utilizando las puntuaciones asignadas para calcular el impacto total de cada opción de sistema de tratamiento, tal y como se ha explicado anteriormente. Esta matriz de decisión nos proporcionará una comparación clara y objetiva de los diferentes sistemas de depuración, ayudándonos a identificar cuál se adapta mejor a las necesidades y condiciones de las poblaciones de San Juan de la Nava y El Barraco.

El resultado de este análisis, presentado en la Tabla 53, nos permitirá determinar cuál es el sistema de tratamiento más adecuado, considerando no solo la eficiencia técnica y operativa, sino también factores económicos, ambientales y sociales. Esto nos asegura que la decisión final esté respaldada

por un análisis detallado y fundamentado, optimizando así los recursos disponibles y garantizando la sostenibilidad y efectividad de la planta de tratamiento a largo plazo.

Tabla 53. Matriz de decisión EDAR San Juan de la Nava y El Barraco (elaboración propia)

	VALOR ASIGNADO	PORCENTAJE OBTENIDO	LAGUNAJE (LA)		HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL VERTICAL-HORIZONTAL (HFSV-HFSH)		CONTACTOR BIOLÓGICO ROTATIVO (CBR)		REACTOR SECUENCIAL (SBR)		REACTOR BIOPELICULA SOBRE LECHO MOVIL (MBBR)	
			Datos matriz de puntuación	VALOR OBTENIDO	Datos matriz de puntuación	VALOR OBTENIDO	Datos matriz de puntuación	VALOR OBTENIDO	Datos matriz de puntuación	VALOR OBTENIDO	Datos matriz de puntuación	VALOR OBTENIDO
CRITERIOS TÉCNICOS												
Calidad requerida del efluente según el medio receptor	5 (muy relevante)	9%	3	0,28	6	0,57	6	0,57	7	0,66	9	0,85
Tamaño de la población a tratar	5 (muy relevante)	9%	6	0,57	6	0,57	6	0,57	7	0,66	8	0,75
Superficie y características del terreno disponible para la ampliación de la EDAR	2 (poco relevante)	4%	2	0,08	3	0,11	9	0,34	8	0,30	9	0,34
Origen y concentración de la contaminación en el agua residual	3 (medianamente relevante)	6%	7	0,40	8	0,45	8	0,45	7	0,40	8	0,45
Versatilidad del tratamiento.	2 (poco relevante)	4%	9	0,34	4	0,15	4,5	0,17	7	0,26	4	0,15
Capacidad de adaptación a las condiciones climáticas	3 (medianamente relevante)	6%	1	0,06	5	0,28	5	0,28	9	0,51	9	0,51
Cantidad de fangos generada y estabilización de los fangos	1 (muy poco relevante)	2%	3	0,06	3	0,06	5	0,09	7	0,13	7	0,13
Complejidad en la explotación y mantenimiento	4 (relevante)	8%	9	0,68	8	0,60	5	0,38	7	0,53	7	0,53
Capacidad de automatización	4 (relevante)	8%	1	0,08	3	0,23	6,5	0,49	8	0,60	9	0,68
CRITERIOS AMBIENTALES												
Producción de malos olores	1 (muy poco relevante)	2%	1	0,02	7	0,13	7	0,13	8	0,15	7	0,13
Generación de ruidos.	2 (poco relevante)	4%	10	0,38	9	0,34	5	0,19	2	0,08	2	0,08
Integración paisajística	2 (poco relevante)	4%	9	0,34	9	0,34	3	0,11	3	0,11	3	0,11
Posibilidad de actuar como cobijo de especies animales	3 (medianamente relevante)	6%	9	0,51	9	0,51	1	0,06	1	0,06	2	0,11
Huella de carbono generada	4 (relevante)	8%	9	0,68	9	0,68	2	0,15	2	0,15	2	0,15
CRITERIOS DE EXPLOTACIÓN												
Costes de explotación	4 (relevante)	8%	5	0,38	2	0,15	9	0,68	9	0,68	7	0,53
Costes de implantación	3 (medianamente relevante)	6%	2	0,11	5	0,28	4	0,23	8	0,45	6	0,34
Capacidad de adopción de energías renovables	5 (muy relevante)	9%	2	0,19	5	0,47	5	0,47	8	0,75	9	0,85
SUMATORIO		100%		5,13		5,92		5,36		6,49		6,70

El sistema que ha obtenido la mayor puntuación en la matriz de decisión es el Reactor de Biopelícula sobre Lecho Móvil (MBBR). Este resultado indica que, según los criterios evaluados, el MBBR es la opción más adecuada para optimizar la planta de tratamiento de aguas residuales que sirve a San Juan de la Nava y El Barraco. (Ilustración 21)

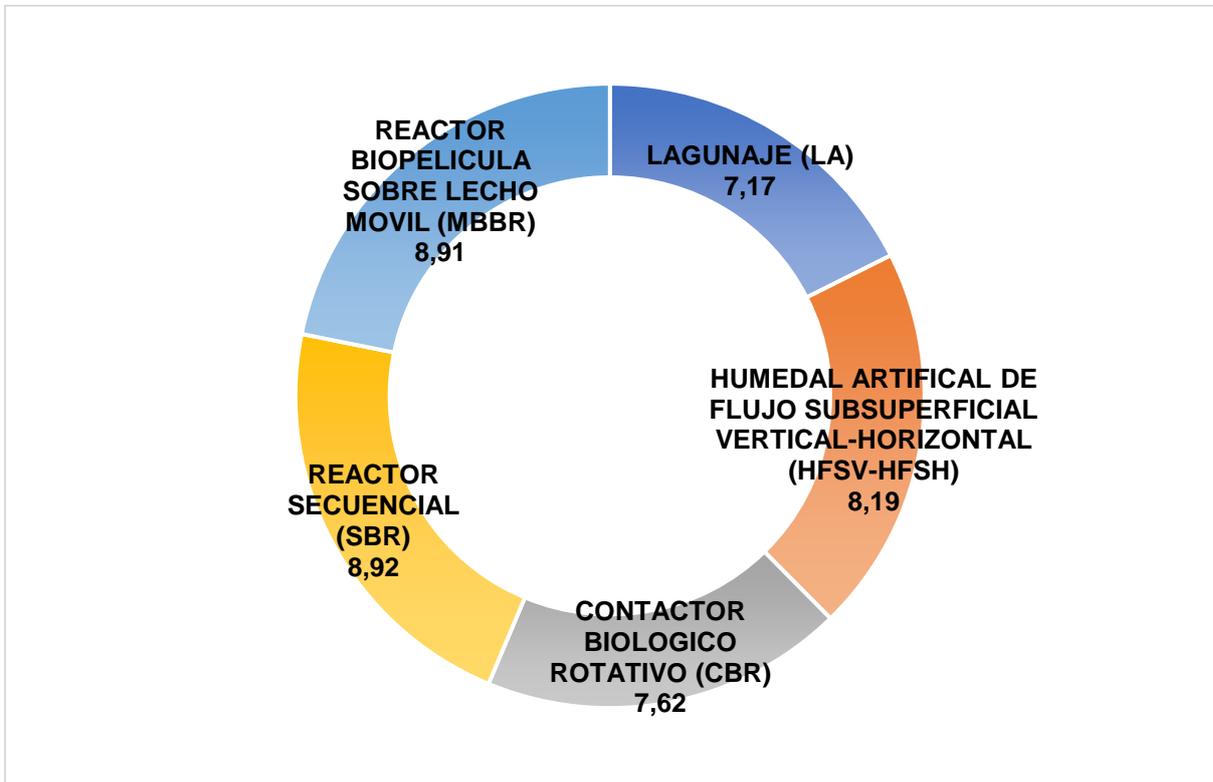


Ilustración 21. Gráfico con las puntuaciones obtenidas EDAR San Juan de la Nava y El Barraco (elaboración propia)

Sin embargo, para asegurar que esta es la decisión correcta, vamos a aplicar los dos criterios de desempate previamente definidos: el plazo de ejecución y la posibilidad de financiación.

CRITERIOS DE DESEMPATE

- *Plazo de ejecución*

El plazo de ejecución se refiere al tiempo necesario para implementar las mejoras y optimizaciones que se vayan a realizar. En esta planta que da servicios los municipios de San Juan de la Nava y de El Barraco existe suficiente espacio disponible para llevar a cabo la optimización de manera gradual mientras la planta actual sigue funcionando.

Esto permite realizar las mejoras en fases, dejando fuera de servicio partes específicas de la planta sin interrumpir su operación general. Dado que no hay una presión inmediata para

completar las optimizaciones rápidamente, el plazo de ejecución no es un factor crítico en este caso de estudio.

Por todo ello, se le da una puntuación a este criterio de: **1 (muy poco relevante)**

- *Posibilidad de financiación*

La posibilidad de financiación es un criterio extremadamente relevante en la evaluación de la planta de tratamiento de aguas residuales. En este caso, tanto San Juan de la Nava como El Barraco son poblaciones pequeñas con presupuestos limitados, lo que hace crucial la obtención de fondos externos para llevar a cabo las optimizaciones necesarias.

Acceder a subvenciones, créditos o cualquier tipo de apoyo financiero es esencial para asegurar la viabilidad del proyecto. Sin una financiación adecuada, las mejoras necesarias para optimizar la planta y reducir los costes operativos no serían factibles. Por lo tanto, asegurar fuentes de financiación es un factor clave para el éxito de esta optimización.

Por todo ello, se le da una puntuación a este criterio de: **5 (muy relevante)**

Con la puntuación obtenida en estos dos criterios se crea la Tabla 54 para así obtener el sistema de depuración más adecuado para el caso de estudio de los municipios de El Barraco y San Juan de la Nava.

Tabla 54. Matriz de decisión San Juan de la Nava y El Barraco incluyendo criterios de desempate (elaboración propia)

	VALOR ASIGNADO	PORCENTAJE OBTENIDO	LAGUNAJE (LA)		HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL VERTICAL-HORIZONTAL (HFSV-HFSH)		CONTACTOR BIOLÓGICO ROTATIVO (CBR)		REACTOR SECUENCIAL (SBR)		REACTOR BIOPELÍCULA SOBRE LECHO MOVIL (MBBR)	
			Datos matriz de puntuación	VALOR OBTENIDO	Datos matriz de puntuación	VALOR OBTENIDO	Datos matriz de puntuación	VALOR OBTENIDO	Datos matriz de puntuación	VALOR OBTENIDO	Datos matriz de puntuación	VALOR OBTENIDO
CRITERIOS TÉCNICOS												
Calidad requerida del efluente según el medio receptor	5 (muy relevante)	8%	3	0,25	6	0,51	6	0,51	7	0,59	9	0,76
Tamaño de la población a tratar	5 (muy relevante)	8%	6	0,51	6	0,51	6	0,51	7	0,59	8	0,68
Superficie y características del terreno disponible para la ampliación de la EDAR	2 (poco relevante)	3%	2	0,07	3	0,10	9	0,31	8	0,27	9	0,31
Origen y concentración de la contaminación en el agua residual	3 (medianamente relevante)	5%	7	0,36	8	0,41	8	0,41	7	0,36	8	0,41
Versatilidad del tratamiento.	2 (poco relevante)	3%	9	0,31	4	0,14	4,5	0,15	7	0,24	4	0,14
Capacidad de adaptación a las condiciones climáticas	3 (medianamente relevante)	5%	1	0,05	5	0,25	5	0,25	9	0,46	9	0,46
Cantidad de fangos generada y estabilización de los fangos	1 (muy poco relevante)	2%	3	0,05	3	0,05	5	0,08	7	0,12	7	0,12
Complejidad en la explotación y mantenimiento	4 (relevante)	7%	9	0,61	8	0,54	5	0,34	7	0,47	7	0,47
Capacidad de automatización	4 (relevante)	7%	1	0,07	3	0,20	6,5	0,44	8	0,54	9	0,61
CRITERIOS AMBIENTALES												
Producción de malos olores	1 (muy poco relevante)	2%	1	0,02	7	0,12	7	0,12	8	0,14	7	0,12
Generación de ruidos.	2 (poco relevante)	3%	10	0,34	9	0,31	5	0,17	2	0,07	2	0,07
Integración paisajística	2 (poco relevante)	3%	9	0,31	9	0,31	3	0,10	3	0,10	3	0,10
Posibilidad de actuar como cobijo de especies animales	3 (medianamente relevante)	5%	9	0,46	9	0,46	1	0,05	1	0,05	2	0,10
Huella de carbono generada	4 (relevante)	7%	9	0,61	9	0,61	2	0,14	2	0,14	2	0,14
CRITERIOS DE EXPLOTACIÓN												
Costes de explotación	4 (relevante)	7%	5	0,34	2	0,14	9	0,61	9	0,61	7	0,47
Costes de implantación	3 (medianamente relevante)	5%	2	0,10	5	0,25	4	0,20	8	0,41	6	0,31
Capacidad de adopción de energías renovables	5 (muy relevante)	8%	2	0,17	5	0,42	5	0,42	8	0,68	9	0,76
SUMATORIO		90%		4,61		5,32		4,81		5,83		6,02

CRITERIOS DE DESEMPATE												
Plazo de ejecución	1 (muy poco relevante)	2%	3	0,20	4	0,27	7	0,47	7	0,47	6	0,41
Posibilidad de financiación	5 (muy relevante)	8%	8	0,41	8	0,41	4	0,20	5	0,25	5	0,25
SUMATORIO		10%		0,61		0,68		0,68		0,73		0,66
SUMATORIO TOTAL		100%		5,22		6,00		5,49		6,56		6,68

El análisis con los dos criterios de desempate confirma que el Reactor de Biopelícula sobre Lecho Móvil (MBBR) sigue siendo la opción mejor valorada para optimizar la planta de tratamiento de aguas residuales que sirve a San Juan de la Nava y El Barraco. Sin embargo, el Reactor Secuencial Batch (SBR) también ha obtenido también una puntuación alta, lo que merece una consideración adicional. En la Ilustración 22 se observa de manera gráfica las puntuaciones obtenidas por cada sistema de depuración y como el SBR es el que mayor puntuación obtiene.

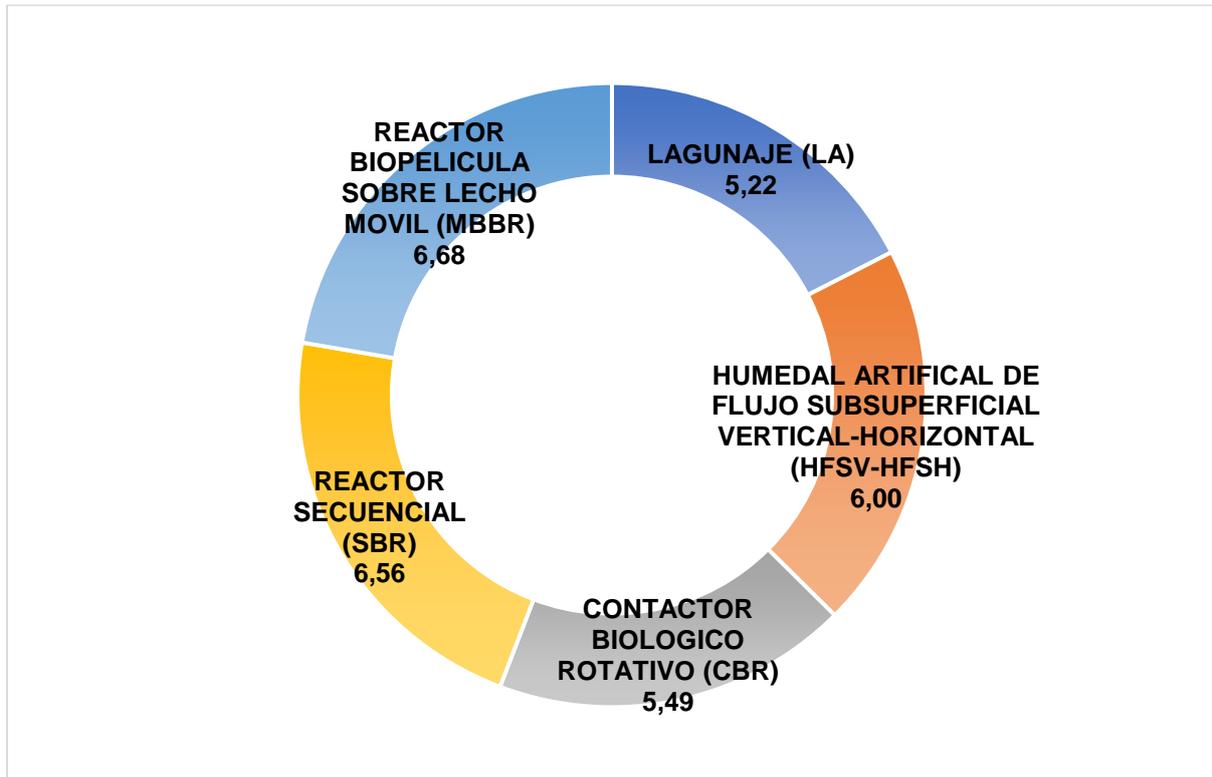


Ilustración 22. Gráfico con las puntuaciones obtenidas EDAR San Juan de la Nava y El Barraco (elaboración propia)

A continuación, se explica por qué el MBBR es la mejor opción en este contexto específico, teniendo en cuenta factores adicionales relevantes para la implementación.

- Infraestructura existente:

La planta actual ya cuenta con turbosoplantes instaladas, que son componentes esenciales en el funcionamiento del sistema MBBR. Estas turbosoplantes pueden ser reutilizadas eficazmente, reduciendo los costes de implementación y simplificando la transición al nuevo sistema.

Parte de la infraestructura civil existente, como las balsas y los edificios, puede ser aprovechada para el MBBR. Esto minimiza la necesidad de nuevas construcciones, lo que resulta en una mayor economía de recursos y tiempo.

- Eficiencia operativa:

Tal y como se ha podido comprobar en el Estado del Arte, el sistema MBBR es conocido por su alta eficiencia en la eliminación de contaminantes con un mantenimiento relativamente bajo. Esto es crucial en nuestro caso, ya que buscamos optimizar el rendimiento de la planta a la vez que reducimos los costes de explotación y mantenimiento mediante un sistema más eficaz y sostenible.

Además, el sistema MBBR puede manejar variaciones en las cargas contaminantes más eficazmente que otros sistemas. Esto puede ayudar en aquellas épocas lluviosas o en las épocas de vaciado de las piscinas municipales y privadas de la zona.

- Compatibilidad y sostenibilidad:

El MBBR es compatible con las estructuras y equipos existentes, lo que facilita su integración en la planta actual. Esta compatibilidad reduce la complejidad del proyecto y asegura una transición más suave.

El uso de la tecnología MBBR también contribuye a la sostenibilidad del sistema, ya que es eficiente en términos energéticos y puede ser combinado con fuentes de energía renovable, alineándose con nuestros objetivos de reducir la huella de carbono.

- Costes de mantenimiento y operación:

Comparado con el SBR, el MBBR tiene menores requerimientos de mantenimiento debido a su diseño simple y robusto. Esto es especialmente relevante en nuestro caso de estudio ya que minimiza los costes de mantenimiento a largo plazo.

La menor necesidad de intervención manual y la posibilidad de automatización con el sistema MBBR también contribuyen a la reducción de costes y a una operación más eficiente.

Aunque el Reactor Secuencial Batch (SBR) presenta una puntuación alta y es una opción viable, el MBBR se destaca como la mejor elección en este caso debido a su capacidad para reutilizar la infraestructura existente, su eficiencia operativa, y su compatibilidad con las condiciones y recursos actuales de la planta. Estos factores no solo facilitan la implementación y reducen los costes iniciales, sino que también aseguran una operación sostenible y eficiente a largo plazo.

Por lo tanto, el Reactor de Biopelícula sobre Lecho Móvil (MBBR) se confirma como la opción óptima para la optimización de la planta de tratamiento de aguas residuales que sirve a San Juan de la Nava y El Barraco.

Una vez se ha estudiado y hemos corroborado que el sistema MBBR es el más adecuado para este caso de estudio, nos surge la duda de que es más conveniente, si usar la EDAR ya construida para realizar la optimización de la misma o nos es mejor construir una nueva en las inmediaciones de esta.

A continuación, desarrollamos las características más importantes para comprobar que es mejor.

- Según se ha ido comentado durante el desarrollo de la herramienta, la EDAR cuenta con varios edificios de control (Ilustración 23), infraestructuras como las balsas actuales, el

pretratamiento, o las turbosoplantes que se podrían reutilizar, al ser compatibles con el sistema MBBR.



Ilustración 23. Edificios existentes en la EDAR de El Barraco y San Juan de la Nava (elaboración propia)

- En el interior de la parcela donde se encuentra actualmente la EDAR se dispone de terreno pensado para realizar una ampliación de esta (Ilustración 24), pero que, para el caso de estudio, nos valdría perfectamente para realizar la optimización del sistema de depuración en caso de no poder reutilizar las balsas existentes. Esto ahorraría en los costes de implementación al no necesitar adquirir nuevos terrenos.



Ilustración 24. Terreno disponible en el interior de la EDAR de El Barraco y San Juan de la Nava (elaboración propia)

- Con el uso de las instalaciones disponibles, además del ahorro en costes con la reutilización de las infraestructuras existentes y algunos de los equipos, se consigue un impacto ambiental

menor a la vez que incrementos la eficacia de la planta y la hacemos más sostenible al poder destinar parte del presupuesto a mejoras energéticas dentro de la planta, por ejemplo, la instalación de paneles solares en las cubiertas de los edificios, a la vez que reducimos la necesidad de nuevos materiales.

- Por el contrario, si realizamos la optimización de la depuradora en los terrenos disponibles en el interior de esta, puede ocasionar diversos problemas a la hora de mantener la continuidad del proceso mientras se realiza la implementación del nuevo proceso.

Con toda la información que disponemos, y que hemos ido aprendiendo con el uso de la herramienta, se considera que la mejor decisión para la optimización de la EDAR de El Barraco y San Juan de la Nava es usar los terrenos disponibles en el interior de la parcela, así conseguiremos ahorrar costes a la vez que podemos usar parte de este ahorro para realizar obras de mejora relacionadas con la sostenibilidad de la planta.

7.1.1.4. Conclusiones del caso de estudio

En este estudio, se ha demostrado que la herramienta de análisis multicriterio desarrollada es válida y eficaz para la optimización de una Estación Depuradora de Aguas Residuales ya existente. Al aplicar esta herramienta a la planta que sirve a los municipios de San Juan de la Nava y El Barraco, se han podido identificar de manera objetiva y fundamentada las opciones de tratamiento más adecuadas, considerando una amplia gama de criterios relevantes.

La herramienta ha permitido:

Evaluar de manera integral múltiples aspectos críticos, como la calidad del efluente, los costes de explotación y mantenimiento, la capacidad de adaptación a las condiciones locales, y la posibilidad de financiar las mejoras necesarias. Esto ha asegurado que todos los factores importantes sean considerados en la toma de decisiones.

Identificar el Reactor de Biopelícula sobre Lecho Móvil (MBBR) como la opción más adecuada para optimizar la planta al no solo obtener la mayor puntuación en la matriz de decisión inicial, sino que también destacó en los criterios de desempate, reforzando su idoneidad.

Aprovechar la infraestructura existente, como las turbosoplantes y las obras civiles ya instaladas, reduce los costes de implementación y facilita una transición más eficiente y económica hacia el nuevo sistema.

Proveer una solución que no solo es eficiente en términos operativos y económicos, sino que también contribuye a la sostenibilidad ambiental mediante la reducción de la huella de carbono y la integración potencial de energías renovables.

Mostrar que la herramienta es adaptable y puede ajustarse a las condiciones y necesidades específicas de diferentes plantas de tratamiento, haciendo que sea una herramienta versátil para la optimización de sistemas de depuración en diversas situaciones.

En conclusión, la herramienta de análisis multicriterio ha demostrado ser una herramienta valiosa para la optimización de plantas de tratamiento de aguas residuales. Su capacidad para considerar una amplia gama de criterios y adaptarse a las circunstancias específicas de cada caso la convierte en una opción robusta y fiable para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de las instalaciones existentes.

7.1.2. Viladecavalls Este

Continuando con la validación de la metodología, ahora vamos a usar esta metodología en una de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales de Viladecavalls, la conocida como EDAR de Viladecavalls Est. Como iremos contando, esta EDAR ha sufrido muchos fallos desde hace ya años y a principios del año 2024 se ha realizado una ampliación en la misma. Usaremos la metodología para comprobar si obtenemos la misma solución que la elegida para realizar su ampliación.

7.1.2.1. Antecedentes

El municipio de Viladecavalls es un municipio de algo más de 20 Km² a 274 m sobre el nivel mar, ubicado en el oeste de la comarca del Vallés Occidental, muy cercada Terrassa y de la Abadía de Montserrat y a 30 km de Barcelona. (Ilustración 25) Limita al norte con el término municipal de Vacarisses por la sierra de Coll Cardús, donde encontramos la cima más alta, el Turó del Ros (639 m), al este delimita con el municipio de Terrassa, al sur con Ullastrell y al oeste con la riera de Sant Jaume, que separa Viladecavalls de la comarca del Baix Llobregat. («Ajuntament de Viladecavalls» 2024)



Ilustración 25. Ubicación del municipio de Viladecavalls (elaboración propia)

En lo que se refiere a la depuración de aguas de este municipio, actualmente hay cuatro estaciones depuradoras, pero solamente tres están en servicio:

- EDAR de Viladecavalls Este, de la Agencia Catalana del Agua.
- EDAR de Viladecavalls Oeste, de la Agencia Catalana del Agua.
- EDAR de Viladecavalls Sur, de titularidad municipal.
- EDAR de Sant Miquel de Guanteres, que está fuera de servicio.

La EDAR que vamos a estudiar es la EDAR de Viladecavalls Este (Ilustración 26). Esta depuradora está dimensionada para el tratamiento de un caudal afluente medio de $900 \text{ m}^3/\text{día}$ con una carga de $370 \text{ mg DBO}_5/\text{l}$, equivalente a $333 \text{ kg}/\text{día}$. Actualmente recibe, sin embargo, un promedio de cerca de $1.400 \text{ m}^3/\text{día}$. Más de 1.5 veces el caudal para la que está diseñada.



Ilustración 26. Ubicación EDAR Viladecavalls ESTE (elaboración propia)

Gracias a las visitas realizadas a esta EDAR y a poder conocer de primera mano esta EDAR desde antes de su ampliación, hasta después de esta ampliación, nos encontramos los siguiente elementos característicos (Ilustración 27):

- Pretratamiento
- Tratamiento Biológico

Durante el año 2012 uno de los biodiscos originales se rompió y quedó fuera de servicio. El que quedaba operativo sufrió una elevada sobrecarga durante todo el año 2013, provocando constantes roturas de cadena y averías cada vez más importantes. Finalmente, a finales del mes de diciembre de 2013 el segundo de los biodiscos se rompió definitivamente, sin posibilidad de reparación. Esta situación imposibilitaba totalmente el sistema original de depuración biológica existente en la depuradora y el agua de salida incumplía con los límites de salida permitidos por el RD 509/1996. Las modificaciones realizadas se basaron en la utilización del digestor aeróbico, como reactor de lodos activos de media carga con aireación prolongada. La idea fue aprovechar al máximo los equipos e instalaciones existentes para tener un nuevo sistema de depuración con el menor coste posible.

- Decantación
- Línea de Fangos



Ilustración 27. Esquema de la EDAR de Viladecavalls Este antes de las obras (elaboración propia)

7.1.2.2. Introducción

Como hemos comentado anteriormente, disponemos de una EDAR diseñada para un caudal de entrada de 900 m³/día, sin embargo, en la actualidad están entrando más de 1.400 m³/día, más de 1.5 veces el caudal para el que está diseñada, ocasionando que parte de este caudal se tenga que derivar al Torrent de Sant Miquel y que el agua depurada no obtenga los parámetros necesarios. Al igual que ocurre con los caudales, los habitantes equivalentes para lo que está diseñada esta EDAR es de algo menos de 6.000 hab-eq.

Al igual que hemos hecho anteriormente con la Estación de Aguas Residuales de El Barraco y San Juan de la Nava, vamos a comprobar los habitantes equivalentes que se tienen previstos teniendo en cuenta la población y los caudales de entrada, para así comprobar si es necesario realizar una ampliación.

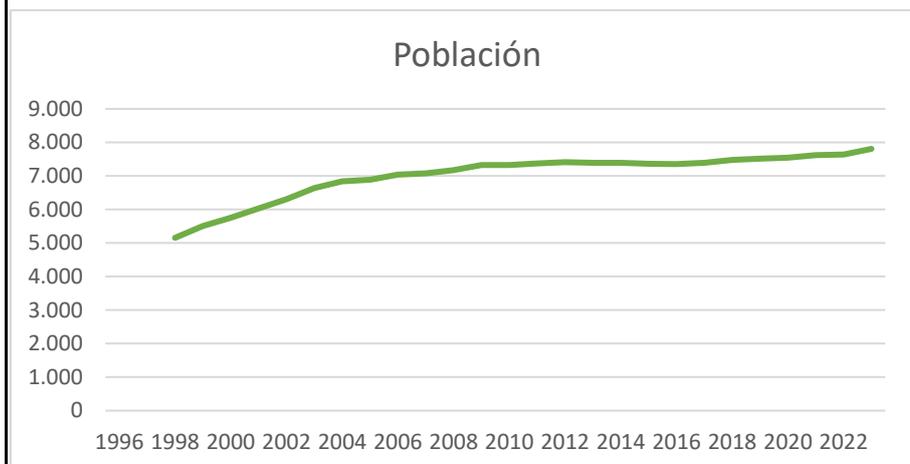
- Población

En la Tabla 55 se exponen los datos de población obtenidos de en la página web del Instituto Nacional de Estadística para el municipio

Tabla 55. Evolución de la población en Viladecavalls. ((«Barcelona» 2024))

Año	Población
1996	4.882
1997	
1998	5.155
1999	5.509
2000	5.755
2001	6.035
2002	6.304

2003	6.639
2004	6.838
2005	6.890
2006	7.036
2007	7.079
2008	7.170
2009	7.322
2010	7.323
2011	7.376
2012	7.411
2013	7.397
2014	7.395
2015	7.365
2016	7.354
2017	7.392
2018	7.480
2019	7.512
2020	7.545
2021	7.621
2022	7.644
2023	7.809



Revisando la tabla y la gráfica de poblaciones podemos ver como durante todos los años de los que disponemos datos, la población ha ido creciendo. Tras conversaciones con el personal de la planta, que viven en el mismo municipio, indican que cada vez más población de las comarcas vecinas, como, por ejemplo, Terrassa, se están mudando al municipio debido al incremento del precio de la vivienda en estos municipios más grandes e industrializados.

Aun que con estos datos vemos que la población cada vez es mayor, no se sabe con certeza cuantos habitantes dependen directamente de esta EDAR al disponer del municipio de otras dos EDAR más. Por ello, vamos a analizar los datos de caudales e industria.

- Caudales

Gracias a la información proporcionada por los empleados de la EDAR, tenemos la Tabla 56 con los caudales de entrada a la EDAR durante los últimos años.

Tabla 56. Caudales medios diarios de entrada en la EDAR (elaboración propia)

Año	Caudal medio diario (m ³ /día)
2005	1103
2006	1202
2007	1366
2008	1258
2009	1469

2010	1485
2011	1488
2012	1502
2013	1547
2014	1550
2015	1537
2016	1571
2017	1627
2018	1683
2019	1739
2020	1745
2021	1802
2022	1852

Analizando la tabla podemos observar cómo los caudales de entrada a la EDAR de Viladecavalls Este han ido aumentando de forma progresiva desde el año 2005 hasta el año 2022. Gracias a esta tabla y a la tabla de población que anteriormente hemos comentado, vemos que el aumento de población corresponde con el aumento de caudal de entrada a la EDAR que estamos estudiando.

- Industria

Algo importante que hemos de estudiar para conocer lo habitantes equivalentes es la industria presente en el municipio. En las inmediaciones de la EDAR nos encontramos con tres fábricas de grandes dimensiones, todas ellas de reciente construcción. Dos de ellas están dedicadas a los automóviles y sus componentes y otra de ella dedicada a la repostería. Estas tres fábricas disponen de una pequeña EDAR para tratar sus vertidos previos a la entrada a la depuradora que estamos estudiando.

- Habitantes equivalentes

Con estos tres datos podemos conocer de forma aproximada el número de habitantes equivalentes:

Población: La población del municipio de Viladecavalls presenta un crecimiento constante desde hace ya varios años, y la previsión a corto plazo es que esa siga aumentando debido a la creciente industrialización a la vez que aumentada el precio de la vivienda en municipios más grande de la inmediaciones.

Caudales: Como hemos podido comprobar gracias a información proporcionada por el personal de la EDAR, los caudales de entrada a la EDAR han ido aumentando durante los últimos años, siendo estos 1.5 veces superiores a los caudales de diseño.

Industria: Recientemente se han construido varias fábricas y la previsión es que la industria siga aumentando en las inmediaciones debido a la falta de espacio en los municipios vecinos altamente industrializados.

Con estos tres datos podemos hacer una estimación de los habitantes equivalentes. Para este caso de estudio, teniendo en cuenta que aumenta la población, los caudales y la industria, estimamos que la población equivalente para este municipio es de 9.000 hab-eq con unos caudales de entrada que oscilarán en torno a los 1.900 m³ hora, más del doble para lo que está pensado la EDAR de Viladecavalls Este.

Teniendo en cuenta estos datos y que según se ha comentado anteriormente la EDAR ha sufrido un gran número de problema en los biodiscos existentes, hasta el punto de fallar ambos biodiscos, se considera necesario realizar una ampliación de esta para poder dar servicio de forma correcta a la población sin incumplir con la normativa de vertidos.

Una vez considerado necesario realizar una ampliación en la EDAR de Viladecavalls Este, vamos a usar la herramienta creada anteriormente para conocer qué sistema de depuración nos arroja como más valido y a la vez, comprobar si este corresponde con el sistema escogido para realizar la ampliación ya realizada a principios del año 2024.

7.1.2.3. *Aplicación de la Herramienta*

A continuación, al igual que como hemos hecho con la depuradora de San Juan de la Nava y El Barraco, vamos a evaluar uno por uno cada criterio de la herramienta creada anteriormente. Cada criterio será evaluado para el caso que nos encontramos para ver qué sistema nos arroja como más adecuado para realizar la ampliación.

CRITERIOS TÉCNICOS

- *Calidad requerida del efluente según el medio receptor*

La calidad requerida del efluente es un factor importante en la evaluación de cualquier planta de tratamiento de aguas residuales. En el caso de la EDAR de Viladecavalls, Aunque la presencia de industrias en el área ha aumentado, estas industrias cuentan con sistemas de depuración previos antes de verter sus efluentes en la EDAR. Esto significa que el agua que llega a la planta no está excesivamente contaminada, ya que una parte significativa de los contaminantes industriales ha sido removida antes de su llegada.

No obstante, la calidad del efluente sigue siendo importante para cumplir con las normativas ambientales y proteger el medio receptor, la carga reducida de contaminantes gracias a las pre-depuradoras industriales justifica que este criterio sea considerado de relevancia media.

Por todo ello, se le da una puntuación a este criterio de: **3 (medianamente relevante)**

- *Tamaño de la población a tratar*

El tamaño de la población a tratar, es decir, los habitantes equivalentes es un factor muy relevante para entender la necesidad de ampliar la EDAR de Viladecavalls Este. Aunque la población actual no

es extremadamente elevada, se prevén nuevas urbanizaciones y se está viendo un aumento en la industria en la zona.

Antes de la ampliación, la planta estaba diseñada para manejar un caudal entrante de 900 m³/día, pero se prevé que los caudales de entrada aumenten a 1.900 m³/día, más del doble. Este incremento destaca la importancia de considerar el tamaño de la población a tratar para asegurar que la planta pueda satisfacer las necesidades futuras sin comprometer la calidad del tratamiento y el cumplimiento de las normativas ambientales.

Por todo ello, se le da una puntuación a este criterio de: **5 (muy relevante)**

- *Superficie y características del terreno disponible para la ampliación de la EDAR*

La superficie y características del terreno disponible para la ampliación de la EDAR de Viladecavalls Este son factores importantes que hay que estudiar en profundidad. En este caso, no hay terreno disponible en las inmediaciones y el espacio dentro de la planta es muy escaso. La planta está completamente rodeada por carreteras que dan acceso a cultivos, naves industriales e incluso viviendas. Este factor limita significativamente las opciones para ampliar la depuradora.

La falta de terreno hace crucial optimizar el terreno existente y disponible y considerar soluciones de tratamiento de las aguas residuales que requieran menos espacio. Dado que la falta de terreno disponible afecta directamente la capacidad de ampliar la EDAR existente, este criterio se considera de máxima importancia obteniendo una puntuación alta.

Por todo ello, se le da una puntuación a este criterio de: **5 (muy relevante)**

- *Origen y concentración de la contaminación en el agua residual*

El origen y la concentración de la contaminación en el agua residual es un factor importante a la hora de ampliar una Estación Depuradora de Aguas Residuales. La mayor parte del agua residual proviene de las viviendas y de las industrias de la zona. Sin embargo, estas cuentan con pre-depuradoras que tratan sus residuos antes de enviarlos a la EDAR. Sin embargo, existe la posibilidad de que algunos contaminantes industriales lleguen a la planta, aunque en cantidades reducidas.

Esta situación implica que, aunque la carga contaminante principal es relativamente uniforme y fácil de manejar para realizar una correcta depuración de esta, debe mantenerse una vigilancia continua para asegurar que los contaminantes industriales no comprometan la eficacia del tratamiento.

Por todo ello, se le da una puntuación a este criterio de: **3 (medianamente relevante)**

- *Versatilidad del tratamiento.*

La versatilidad del tratamiento es un factor relevante para la EDAR de Viladecavalls Este. Aunque la mayoría del agua residual proviene de viviendas y de industrias con pre-depuradoras, existe la posibilidad de que lleguen vertidos no deseados o inesperados.

Contar con un sistema de tratamiento versátil es crucial para manejar estos imprevistos de manera eficiente, asegurando que la planta pueda adaptarse a variaciones en la carga contaminante sin comprometer la calidad del efluente para mantener parámetros de depuración adecuados. Esta

capacidad de adaptación es muy importante para continuar con el correcto cumplimiento de las normativas ambientales y la eficacia operativa de la planta.

Por todo ello, se le da una puntuación a este criterio de: **4 (relevante)**

- *Capacidad de adaptación a las condiciones climáticas*

La capacidad de adaptación a las condiciones climáticas es un criterio que suele ser relevante, pero para el caso que nos encontramos es un factor con no mucha importancia. La región donde se ubica la EDAR de Viladecavalls Este disfruta de temperaturas moderadas durante todo el año, con mínimas que no bajan de los 8°C en invierno, muy raro que haya heladas, y máximas que superan ligeramente los 30°C en verano. Estas condiciones climáticas son favorables para la depuración de aguas, permitiendo un funcionamiento óptimo de la planta durante todo el año, sin excesivo frío ni excesivo calor.

Debido a estas temperaturas estables y muy adecuadas para el proceso de tratamiento de agua residual, la capacidad de adaptación a las condiciones climáticas no es un factor importante en este caso de estudio.

Por todo ello, se le da una puntuación a este criterio de: **1 (muy poco relevante)**

- *Cantidad de fangos generada y estabilización de los fangos*

La cantidad de fangos generada y su estabilización es un factor necesario de estudiar para la ampliación de la EDAR de Viladecavalls Este. La planta ya dispone de una línea de fangos que permite gestionar de manera eficiente y adecuada los fangos producidos. Sin embargo, dado el aumento en el caudal de entrada y, por ende, la población equivalente, es muy probable que sea necesario realizar algunas modificaciones leves para poder continuar manejando eficientemente la mayor cantidad de fangos generados.

Estas modificaciones no son significativas, pero son necesarias para asegurar que la planta continúe operando de manera eficiente y cumpliendo con la normativa actual.

Por todo ello, se le da una puntuación a este criterio de: **3 (medianamente relevante)**

- *Complejidad en la explotación y mantenimiento*

Como se ha explicado anteriormente, tener una EDAR con unas características concretas hace necesario personal especializado con conocimientos en estos sistemas para poder gestionar de forma correcta y sostenible la planta. En este caso de estudio, La EDAR de Viladecavalls Este es una planta de tamaño medio que ha requerido la presencia de forma diaria y constante de personal cualificado desde sus inicios. El personal cuenta con conocimientos y experiencia en la depuración de aguas, lo que facilita la gestión operativa de la planta. Este personal, que se ha ido renovando poco a poco a lo largo de los años, ha operado con los diferentes sistemas de depuración que se han tenido.

Por todo ello, se le da una puntuación a este criterio de: **2 (poco relevante)**

- *Capacidad de automatización*

La capacidad de automatización es un factor muy interesante a la hora de realizar una ampliación de una EDAR existente ya que abre la puerta a mejoras y ahorros. En la ampliación de la EDAR de Viladecavalls Este la automatización de parte de la planta puede aportar numerosos beneficios, como la reducción del trabajo manual, la disminución de errores humanos y la mejora general en la eficiencia del proceso de depuración.

Automatizar procesos críticos permite un monitoreo continuo y ajustes en tiempo real, asegurando una operación más estable y consistente. Esto es especialmente importante en una planta que maneja un caudal elevado y necesita mantener altos estándares de calidad en el tratamiento de aguas residuales.

Por todo ello, se le da una puntuación a este criterio de: **4 (relevante)**

CRITERIOS AMBIENTALES

- *Producción de malos olores*

La producción de malos olores es un factor crucial a la hora de ampliar y/o optimizar una depuradora existente. Para la EDAR de Viladecavalls Este debido a su proximidad áreas pobladas y a las viviendas hace que la gestión de los malos olores sea esencial para evitar molestias y obtener una mayor aceptación por parte de la población.

La minimización de los malos olores no solo es importante para la aceptación social de la planta, sino también para cumplir con las normativas ambientales que regulan la calidad del aire en las proximidades de áreas urbanas.

Por todo ello, se le da una puntuación a este criterio de: **5 (muy relevante)**

- *Generación de ruidos.*

La generación de ruidos es un criterio muy importante para tener en cuenta en la EDAR de Viladecavalls debido a la proximidad de la planta tanto a las viviendas como a la fauna local. Al igual que con los olores, la cercanía de la EDAR al núcleo urbano de Viladecavalls hace que la mitigación del ruido sea muy importante para evitar molestias a la población y a las especies animales de la zona, como pueden ser zorros, jabalíes y diversas especies de aves.

Además, el ruido puede afectar negativamente a la fauna que habita en las inmediaciones, por lo que es esencial implementar medidas que minimicen la generación de ruidos o sistemas de depuración que produzcan poco ruido o que si producen ruido se pueda mitigar. Con ello se pretendería mitigar su impacto tanto en las personas como en los animales.

Por todo ello, se le da una puntuación a este criterio de: **5 (muy relevante)**

- *Integración paisajística*

En el caso que nos encontramos ahora, la Estación Depuradora de Aguas Residuales ya se encuentra construida y en caso de realizar una ampliación no habría cambios de forma significativa en su

apariciencia externa, es decir, de muros hacia afuera. Así mismo, en la ampliación se usarían gran parte de las construcciones existentes.

Ya que la planta existente no cambiará de forma masiva y como la población ya está acostumbrada a la presencia de esta, la integración paisajística no es un factor crítico en este caso de estudio.

Por todo ello, se le da una puntuación a este criterio de: **1 (muy poco relevante)**

- *Posibilidad de actuar como cobijo de especies animales*

La posibilidad de que la depuradora que estamos estudiando pueda actuar como cobijo de especies animales es un criterio que considerar en términos de que se pueda mejorar en su sostenibilidad gracias a su impacto ambiental positivo. Aunque la planta ya existe y no va a cambiar significativamente con la optimización, hay intentar hacer medidas que faciliten su uso por parte de ciertas especies, especialmente aves y pequeños animales que puedan frecuentar la zona.

Al igual que con el otro caso de estudio, se podrían introducir áreas verdes o estructuras específicas que proporcionen hábitats seguros y adecuados para estas especies. Estas adaptaciones no solo beneficiarían a la fauna local, sino que también podrían contribuir a mejorar la percepción ambiental de la planta.

Por todo ello, se le da una puntuación a este criterio de: **2 (poco relevante)**

- *Huella de carbono generada*

La huella de carbono generada es un criterio relevante en la evaluación de la EDAR de Viladecavalls Este. Implementar tecnologías más eficientes y procesos más moderno y eficientes, puede disminuir significativamente el consumo de energía y, por lo tanto, las emisiones asociadas. Además, la adopción de fuentes de energía renovable, como paneles solares o sistemas de biogás gracias a los tratamientos del fango, puede conseguir una neutralidad energética en la planta. Estas prácticas sostenibles no solo mejoran la eficiencia de la planta, sino que también pueden resultar en ahorros económicos a largo plazo debido a la menor dependencia de fuentes de energía externas.

Dado el creciente enfoque en la sostenibilidad ambiental y la necesidad de cumplir con las normativas sobre emisiones, la capacidad de la planta para reducir su huella de carbono es especialmente importante. Este enfoque no solo asegura que la depuradora funcione de manera más sostenible, sino que también refuerza el compromiso del municipio de Viladecavalls con la protección del medio ambiente.

Por todo ello, se le da una puntuación a este criterio de: **4 (relevante)**

CRITERIOS DE EXPLOTACIÓN

- *Costes de explotación*

Los costes de explotación son un factor clave en la gestión de cualquier EDAR. En el caso de estudio que nos encontramos, la EDAR de Viladecavalls actualmente opera por encima de su capacidad

diseñada, los gastos operativos son considerablemente elevados, parte debidos a los grandes cambios que se han ido haciendo debido a los daños en los diferentes sistemas de depuración que existan.

Ampliar, y a la vez optimizar la planta para que sea más eficiente es esencial para reducir estos costes. Implementar mejoras tecnológicas que ayuden en su operación diaria puede ayudar a ajustar la capacidad de la planta a las necesidades reales, disminuyendo así los costes de energía, mantenimiento y mano de obra. Un sistema de tratamiento más eficiente puede operar con menor consumo energético y requerir menos intervenciones, lo que se traduce en una reducción significativa de los costes a largo plazo. Por ello, en este caso de estudio nos encontramos ante un criterio muy importante.

Por todo ello, se le da una puntuación a este criterio de: **5 (muy relevante)**

- *Costes de implantación*

Los costes de implantación son un criterio muy relevante que hay que tener en cuenta para ampliar la EDAR de Viladecavalls Este. Dado que la planta ya está en funcionamiento, pero este funcionamiento no es correcto ya que el caudal de entrada es casi el doble de lo calculado en su diseño y a que ha experimentado varios problemas durante los últimos años, cualquier proyecto de ampliación o mejora se va a revisar de forma exhaustiva.

Además, nos encontramos en una fase donde el dinero necesario para realizar estos trabajos es limitado. Es crucial que los costes de implantación se gestionen de manera eficaz. Hay que asegurar que los fondos se utilicen de la manera más efectiva posible, haciendo que su funcionamiento llegue a ser el correcto. Por lo tanto, los costes de implantación son un factor de máxima importancia, ya que determinarán la capacidad de la planta para realizar las mejoras necesarias y asegurar su funcionamiento eficiente y sostenible en el futuro.

Por todo ello, se le da una puntuación a este criterio de: **5 (muy relevante)**

- *Capacidad de adopción de energías renovables*

Poder adoptar energías renovables es un criterio para tener en cuenta para realizar la ampliación de la plana que estamos estudiando. La EDAR de Viladecavalls Este se encuentra en una zona con incidencia de sol durante todo el año, así como temperaturas medias altas, lo que proporciona una excelente oportunidad para integrar tecnologías de energía renovable, como paneles solares.

El uso de los edificios existentes para instalar paneles solares puede proporcionar una fuente de energía sostenible y económica, reduciendo la dependencia de fuentes de energía no renovables y disminuyendo los costes durante la explotación. Además, la integración de energías renovables contribuye significativamente a la reducción de la huella de carbono de la planta, alineándose con los objetivos de sostenibilidad ambiental que se buscan con la elaboración de esta herramienta. Por estas razones, la capacidad de adopción de energías renovables es un factor relevante en la evaluación de la planta.

Por todo ello, se le da una puntuación a este criterio de: **4 (relevante)**

Una vez hemos evaluado todos los criterios y les hemos asignado una puntuación para la ampliación de la EDAR de Viladecavalls Este, procedemos a introducir estos valores en la herramienta de análisis multicriterio, al igual que hemos hecho con la optimización de la EDAR de San Juan de la Nava y El Barraco. Esta herramienta nos ayuda a generar una matriz de decisión que refleje de manera completa la relevancia de cada criterio para el caso concreto que estamos estudiando.

Al introducir cada uno de los valores en la herramienta, esta pondera de forma automática cada criterio según su importancia que se le ha ido dando a cada criterio, utilizando las puntuaciones asignadas para calcular el impacto total de cada opción de sistema de tratamiento, tal y como se ha explicado anteriormente. Esta matriz de decisión nos proporcionará una comparación clara y objetiva de los diferentes sistemas de depuración, ayudándonos a identificar cuál se adapta mejor a las necesidades y condiciones de la EDAR de Viladecavalls Este.

El resultado de este análisis, presentado en la Tabla 57, nos permitirá determinar cuál es el sistema de tratamiento más adecuado, considerando no solo la eficiencia técnica y operativa, sino también factores económicos, ambientales y sociales. Esto nos asegura que la decisión final esté respaldada por un análisis detallado y fundamentado, optimizando así los recursos disponibles y garantizando la sostenibilidad y efectividad de la planta de tratamiento a largo plazo.

Tabla 57. Matriz de decisión EDAR Viladecavalls Este (elaboración propia)

		VALOR ASIGNADO	PORCENTAJE OBTENIDO	LAGUNAJE (LA)		HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL VERTICAL-HORIZONTAL (HFSV-HFSH)		CONTACTOR BIOLÓGICO ROTATIVO (CBR)		REACTOR SECUENCIAL (SBR)		REACTOR BIOPELÍCULA SOBRE LECHO MÓVIL (MBBR)	
				Datos matriz de puntuación	VALOR OBTENIDO	Datos matriz de puntuación	VALOR OBTENIDO	Datos matriz de puntuación	VALOR OBTENIDO	Datos matriz de puntuación	VALOR OBTENIDO	Datos matriz de puntuación	VALOR OBTENIDO
CRITERIOS TÉCNICOS													
Calidad requerida del efluente según el medio receptor	3 (medianamente relevante)	5%	3	0,15	6	0,30	6	0,30	7	0,34	9	0,44	
Tamaño de la población a tratar	5 (muy relevante)	8%	6	0,49	6	0,49	6	0,49	7	0,57	8	0,66	
Superficie y características del terreno disponible para la ampliación de la EDAR	5 (muy relevante)	8%	2	0,16	3	0,25	9	0,74	8	0,66	9	0,74	
Origen y concentración de la contaminación en el agua residual	3 (medianamente relevante)	5%	7	0,34	8	0,39	8	0,39	7	0,34	8	0,39	
Versatilidad del tratamiento.	4 (relevante)	7%	9	0,59	4	0,26	4,5	0,30	7	0,46	4	0,26	
Capacidad de adaptación a las condiciones climáticas	1 (muy poco relevante)	2%	1	0,02	5	0,08	5	0,08	9	0,15	9	0,15	
Cantidad de fangos generada y estabilización de los fangos	3 (medianamente relevante)	5%	3	0,15	3	0,15	5	0,25	7	0,34	7	0,34	
Complejidad en la explotación y mantenimiento	2 (poco relevante)	3%	9	0,30	8	0,26	5	0,16	7	0,23	7	0,23	
Capacidad de automatización	4 (relevante)	7%	1	0,07	3	0,20	6,5	0,43	8	0,52	9	0,59	
CRITERIOS AMBIENTALES													
Producción de malos olores	5 (muy relevante)	8%	1	0,08	7	0,57	7	0,57	8	0,66	7	0,57	
Generación de ruidos.	5 (muy relevante)	8%	10	0,82	9	0,74	5	0,41	2	0,16	2	0,16	
Integración paisajística	1 (muy poco relevante)	2%	9	0,15	9	0,15	3	0,05	3	0,05	3	0,05	
Posibilidad de actuar como cobijo de especies animales	2 (poco relevante)	3%	9	0,30	9	0,30	1	0,03	1	0,03	2	0,07	
Huella de carbono generada	4 (relevante)	7%	9	0,59	9	0,59	2	0,13	2	0,13	2	0,13	
CRITERIOS DE EXPLOTACIÓN													
Costes de explotación	5 (muy relevante)	8%	5	0,41	2	0,16	9	0,74	9	0,74	7	0,57	
Costes de implantación	5 (muy relevante)	8%	2	0,16	5	0,41	4	0,33	8	0,66	6	0,49	

Capacidad de adopción de energías renovables	4 (relevante)	7%	2	0,13	5	0,33	5	0,33	8	0,52	9	0,59
SUMATORIO		100%		4,90		5,62		5,72		6,57		6,44

Analizando la matriz de decisión y observando la Ilustración 28, se observa que el sistema con la mejor puntuación es el SBR también conocido como Sequencing Batch Reactor por sus siglas en ingles. Este resultado nos indica que el SBR sería la mejor opción para ampliar la EDAR de Viladecavalls y coincide con el sistema escogido para realizar su ampliación a principios del año 2024.

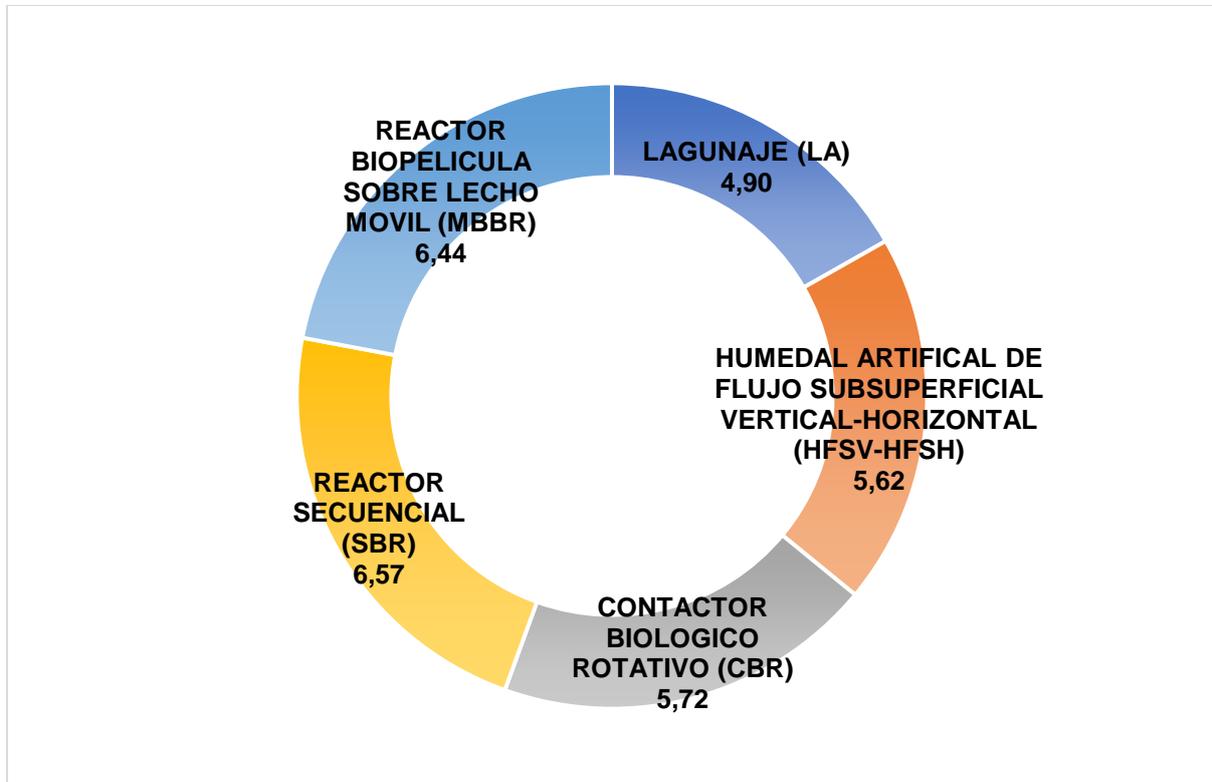


Ilustración 28. Gráfico con las puntuaciones obtenidas EDAR Viladecavalls Este (elaboración propia)

Sin embargo, antes de realizar conclusiones sobre el sistema escogido y la herramienta usada, vamos a usar los dos criterios de desempate al obtener el sistema MBBR una puntuación no muy lejana al SBR para el caso de estudio.

CRITERIOS DE DESEMPATE

- Plazo de ejecución

La necesidad de realizar mejoras significativas para manejar el incremento en los caudales y mejorar la eficiencia del tratamiento implica que el tiempo requerido para implementar estas mejoras es un factor importante que hay que tener en cuenta. Si bien se pretende realizar la ampliación y completar las mejoras en un plazo razonable para minimizar las interrupciones, la planta puede continuar funcionando durante las fases de la ampliación.

La posibilidad de realizar las mejoras de manera escalonada y la capacidad de la planta para operar parcialmente durante la ejecución del proyecto permiten una cierta flexibilidad en el plazo de ejecución. Sin embargo, un plazo de ejecución demasiado largo podría aumentar los costes y las complicaciones, por lo que es necesario encontrar un equilibrio adecuado para asegurar que las mejoras se implementen de manera eficiente sin extenderse innecesariamente.

Por todo ello, se le da una puntuación a este criterio de: **3 (medianamente relevante)**

- *Posibilidad de financiación*

La posibilidad de financiación puede llegar a ser un factor crítico para poder realizar obras de este tipo en la depuradoras ya existentes. Dado que la planta necesita una ampliación y que se aprovechara para realizar mejoras tecnológicas para manejar el nuevo caudal de entrada y la carga contaminante, asegurar fondos suficientes es crucial para la viabilidad del proyecto.

El acceso a subvenciones, créditos y otros tipos de fórmulas financieras puede hacer una gran diferencia en la capacidad del municipio para implementar las mejoras necesarias. La obtención de financiación adecuada permitirá cubrir los costes de implantación y garantizar que las mejoras se realicen sin comprometer la sostenibilidad financiera de la planta. Por estas razones, la posibilidad de financiación es un factor relevante para poder realizar la ampliación de la planta.

Por todo ello, se le da una puntuación a este criterio de: **4 (relevante)**

A continuación, se presenta Tabla 58 con los resultados:

Tabla 58. Matriz de decisión EDAR Viladecavalls Este incluyendo criterios de desempate (elaboración propia)

			LAGUNAJE (LA)		HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL VERTICAL-HORIZONTAL (HFSV-HFSH)		CONTACTOR BIOLÓGICO ROTATIVO (CBR)		REACTOR SECUENCIAL (SBR)		REACTOR BIOPELÍCULA SOBRE LECHO MOVIL (MBBR)	
			Datos matriz de puntuación	VALOR OBTENIDO	Datos matriz de puntuación	VALOR OBTENIDO	Datos matriz de puntuación	VALOR OBTENIDO	Datos matriz de puntuación	VALOR OBTENIDO	Datos matriz de puntuación	VALOR OBTENIDO
	VALOR ASIGNADO	PORCENTAJE OBTENIDO										
CRITERIOS TÉCNICOS												
Calidad requerida del efluente según el medio receptor	3 (medianamente relevante)	4%	3	0,13	6	0,26	6	0,26	7	0,31	9	0,40
Tamaño de la población a tratar	5 (muy relevante)	7%	6	0,44	6	0,44	6	0,44	7	0,51	8	0,59
Superficie y características del terreno disponible para la ampliación de la EDAR	5 (muy relevante)	7%	2	0,15	3	0,22	9	0,66	8	0,59	9	0,66
Origen y concentración de la contaminación en el agua residual	3 (medianamente relevante)	4%	7	0,31	8	0,35	8	0,35	7	0,31	8	0,35
Versatilidad del tratamiento.	4 (relevante)	6%	9	0,53	4	0,24	4,5	0,26	7	0,41	4	0,24
Capacidad de adaptación a las condiciones climáticas	1 (muy poco relevante)	1%	1	0,01	5	0,07	5	0,07	9	0,13	9	0,13
Cantidad de fangos generada y estabilización de los fangos	3 (medianamente relevante)	4%	3	0,13	3	0,13	5	0,22	7	0,31	7	0,31
Complejidad en la explotación y mantenimiento	2 (poco relevante)	3%	9	0,26	8	0,24	5	0,15	7	0,21	7	0,21
Capacidad de automatización	4 (relevante)	6%	1	0,06	3	0,18	6,5	0,38	8	0,47	9	0,53
CRITERIOS AMBIENTALES												
Producción de malos olores	5 (muy relevante)	7%	1	0,07	7	0,51	7	0,51	8	0,59	7	0,51
Generación de ruidos.	5 (muy relevante)	7%	10	0,74	9	0,66	5	0,37	2	0,15	2	0,15
Integración paisajística	1 (muy poco relevante)	1%	9	0,13	9	0,13	3	0,04	3	0,04	3	0,04
Posibilidad de actuar como cobijo de especies animales	2 (poco relevante)	3%	9	0,26	9	0,26	1	0,03	1	0,03	2	0,06
Huella de carbono generada	4 (relevante)	6%	9	0,53	9	0,53	2	0,12	2	0,12	2	0,12
CRITERIOS DE EXPLOTACIÓN												
Costes de explotación	5 (muy relevante)	7%	5	0,37	2	0,15	9	0,66	9	0,66	7	0,51
Costes de implantación	5 (muy relevante)	7%	2	0,15	5	0,37	4	0,29	8	0,59	6	0,44

Capacidad de adopción de energías renovables	4 (relevante)	6%	2	0,12	5	0,29	5	0,29	8	0,47	9	0,53
SUMATORIO		90%		4,40		5,04		5,13		5,90		5,78
CRITERIOS DE DESEMPATE												
Plazo de ejecución	3 (medianamente relevante)	4%	3	0,22	4	0,29	7	0,51	7	0,51	6	0,44
Posibilidad de financiación	4 (relevante)	6%	8	0,59	8	0,59	4	0,29	5	0,37	5	0,37
SUMATORIO		10%		0,81		0,88		0,81		0,88		0,81
SUMATORIO TOTAL		100%		5,21		5,93		5,94		6,78		6,59

El análisis realizado explicando cada uno de los criterios de evaluación y los dos criterios de desempate para nuestro caso de estudio, ha resultado en que el Reactor Secuencial Batch (SBR) es la opción mejor valorada para ampliar la EDAR de Viladecavalls Este. En la Ilustración 29 se observan los resultados obtenidos por cada uno de los sistemas de depuración estudiados.

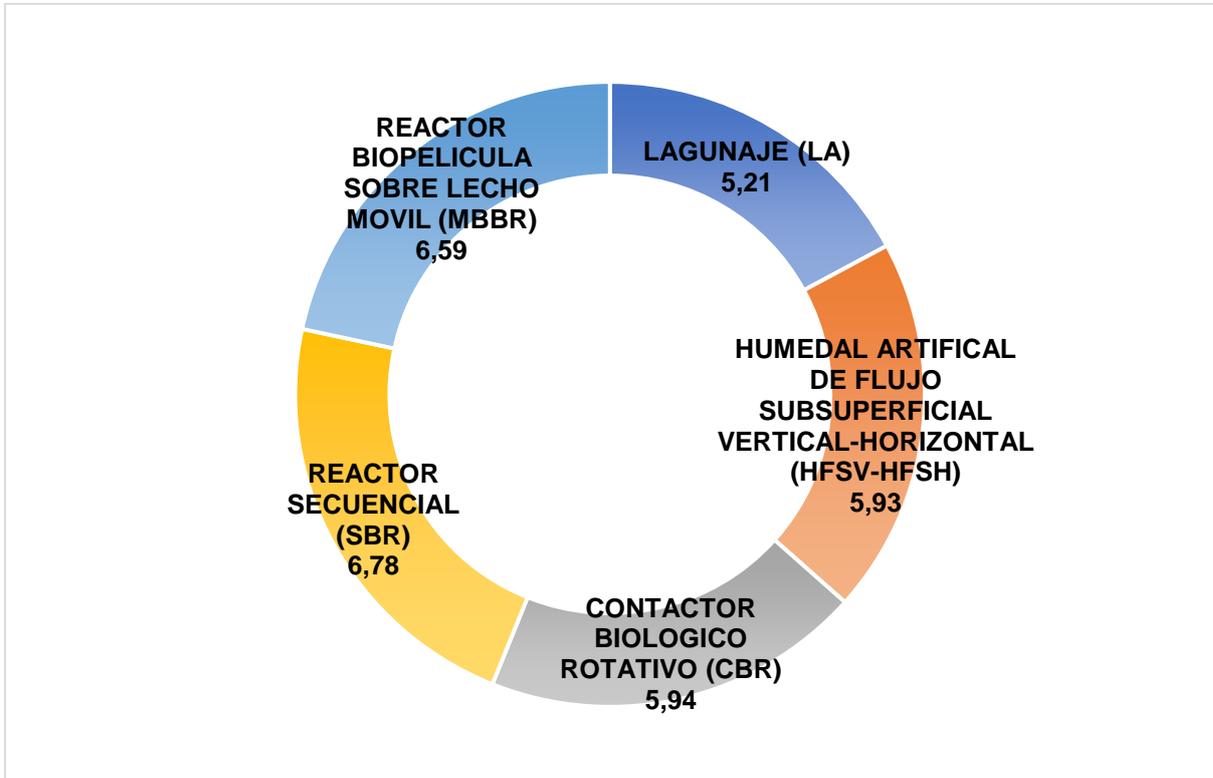


Ilustración 29. Gráfico con las puntuaciones obtenidas EDAR Viladecavalls Este (elaboración propia)

A continuación, se explica por qué el SBR es la mejor opción en este contexto específico, teniendo en cuenta factores adicionales relevantes para la implementación.

- Infraestructura existente

La planta actual puede beneficiarse significativamente de la implementación del SBR debido a la infraestructura existente. Aunque no se mencionan exactamente que infraestructuras y equipos se van a quedar tras la posible, el diseño del SBR facilita su integración en instalaciones existentes. Esto minimiza los costes de implementación y permite aprovechar al máximo los recursos ya disponibles en la planta.

- Eficiencia operativa

Como se ha explicado en el Estado del Arte, el SBR destaca por su alta eficacia en la eliminación de contaminantes y su capacidad para manejar variaciones en los caudales de entrada, al igual que con las variaciones de contaminantes. Esto es especialmente relevante para Viladecavalls Este,

donde el caudal afluente supera la capacidad de diseño y se prevé un aumento continuo debido al crecimiento de la población y la industrialización. El SBR puede ajustarse fácilmente a variaciones en la carga contaminante, asegurando una depuración correcta cumpliendo todos los estándares de calidad a la vez que la normativa actual.

- Compatibilidad y sostenibilidad

El SBR es compatible con las necesidades de la planta de Viladecavalls Este. La capacidad de automatizar gran parte de este sistema de depuración reduce la necesidad de intervención manual y mejora la precisión del tratamiento, lo que se alinea con los objetivos de sostenibilidad. Además, el SBR puede ser combinado con tecnologías de energía renovable, lo que contribuye a la reducción de la huella de carbono de la planta y a guiar a la planta hacia un coste energético cero.

- Costes de mantenimiento y operación

El SBR, aunque requiere una inversión inicial elevada, a largo plazo los costes asociados a su mantenimiento son menores. Su diseño robusto y eficiente permite una operación más estable, reduciendo las interrupciones y las necesidades de mantenimiento frecuente. Esto es crucial para la planta de Viladecavalls Este, que actualmente enfrenta altos costes debido a la sobrecarga y el desgaste de los equipos.

- Versatilidad y adaptabilidad

El SBR ofrece una gran versatilidad y adaptabilidad a diferentes condiciones de contaminación. Dada la previsión de crecimiento de la población y la industrialización en Viladecavalls, esta flexibilidad es vital para asegurar que la planta pueda seguir operando eficientemente a medida que aumenten las demandas de tratamiento.

Aunque otros sistemas de tratamiento, como el MBBR, también presentan importantes ventajas, el Reactor Secuencial Batch (SBR) se destaca como la mejor opción para la EDAR de Viladecavalls Este. Su capacidad para manejar variaciones en las cargas contaminantes, su compatibilidad con la infraestructura existente, y su potencial para reducir costes de operación y mantenimiento hacen de este sistema la mejor opción para este caso. Implementar el SBR no solo mejorará la eficiencia y sostenibilidad de la planta, sino que también asegurará su capacidad para cumplir con las normativas ambientales y las necesidades a largo plazo.

Tal y como hemos hecho con la EDAR de El Barraco y San Juan de la Nava, tras comprobar que el sistema SBR es el más adecuado para realizar la ampliación de la EDAR de Viladecavalls Este, vamos a estudiar que es mejor, si realizar la ampliación en una nueva ubicación o ampliar y mejorar las infraestructuras existentes.

A continuación, desarrollaremos las características más importantes para comprobar que es mejor y corroborar si esto coincide con la solución adoptada por la ingeniera a la hora de realizar el proyecto para ampliar esta EDAR.

- Al igual que la EDAR de El Barraco y San Juan de la Nava, la EDAR de Viladecavalls cuenta con varios edificios de control, una estación de bombeo, un pretratamiento, entre otras infraestructuras que podrían usarse para la ampliación de esta depuradora.
- Por el contrario, como vemos en la Ilustración 30, dentro de la EDAR de Viladecavalls no disponemos de un terreno especialmente habilitado para realizar una ampliación, sin embargo, sí que dispone de unos terrenos ubicados al oeste de la parcela, con poca superficie, pero que podrían usarse para realizar la ampliación. Para poder usar estos terrenos sería necesario cambiar el vallado, así como mover algunos árboles que se encuentran en la zona, pudiendo esto suponer retrasos medioambientales.



Ilustración 30. Terreno disponible para la ampliación en la EDAR de Viladecavalls Este (elaboración propia)

- Como se ha indicado anteriormente, las inmediaciones de la parcela donde se encuentra la EDAR, está rodeada de carreteras y cultivos, a la vez que por la zona oeste de la parcela tenemos el Torrent de Sant Miquel, lo que hace poco viable la ampliación en terrenos cercanos a los actuales, por lo que usar los terrenos actuales se presenta como la solución más efectiva.
- Poder usar el terreno disponible en el interior de la parcela para ampliar la depuradora hace que los costes de implementación se reduzcan al reutilizar las infraestructuras y parte de los procesos existentes a la vez que mejoramos parte del terreno para poner una instalación

de paneles fotovoltaicos, haciendo más sostenible la depuradora y reduciendo la huella de carbono con esta ampliación.

- Al contrario que con la EDAR de El Barraco y San Juan de la Nava, al utilizar terreno disponible en el interior de la parcela, pero fuera de la línea del proceso de depuración actual, durante las obras no se generarían interferencias importantes mientras se continúa con el proceso de depuración tal y como antes de las obras.

Una vez estudiado con más detenimiento la posibilidad de ampliar la EDAR de Viladecavalls Este, se corrobora que el uso de los terrenos disponibles en el interior de la parcela para la implementación de un sistema SBR a la vez que se siguen usando parte de las infraestructuras existentes, es la mejor opción. Así mismo, al usar un terreno que actualmente está en desuso se podría aprovechar el ahorro que supone no tener que usar otros terrenos para mejorar la sostenibilidad de la depuradora con la implementación de paneles solares, haciendo que la EDAR pueda ser energéticamente neutra durante la mayor parte del año.

7.1.2.4. Conclusiones del caso de estudio

Con la utilización de la herramienta de análisis multicriterio para la ampliación de una Estación Depuradora de Aguas Residuales ya existente, la EDAR de Viladecavalls Este, hemos llegado a la conclusión de que el *Reactor Secuencial Batch* (SBR) es la opción más adecuada para esta planta, coincidiendo con la decisión que en su momento tomaron los expertos cuando se realizó el proyecto para la ampliación de esta depuradora a principios del año 2024. Esto valida la precisión y fiabilidad de la herramienta creada.

La herramienta ha permitido evaluar de manera exhaustiva un gran número de aspectos críticos que afectan la operación de la planta. Se han considerado factores como la calidad del efluente, los costes de explotación y mantenimiento, la capacidad de adaptación a las condiciones locales, y la posibilidad de financiar las mejoras necesarias. Esta evaluación tan completa nos asegura que todos los factores importantes se tienen en cuenta al tomar decisiones tan importantes como que sistema usar.

Una se ha comprobado con la herramienta creada que el SBR, el de la Ilustración 31, es la mejor opción para nuestro caso de estudio, al igual que los expertos que realizaron el proyecto de ampliación de esta, la herramienta ha demostrado su capacidad para proporcionar recomendaciones sólidas basadas en una amplia gama de criterios relevantes. La elección del SBR no solo obtuvo la mayor puntuación en la matriz de decisión inicial, sino que también destacó en los criterios de desempate, reforzando así la idoneidad de la herramienta.



Ilustración 31. Fase de construcción del SBR en la EDAR de Viladecavalls Este (elaboración propia)

La sostenibilidad ambiental ha sido un aspecto clave en la evaluación. La capacidad del SBR para manejar variaciones en los caudales y su compatibilidad con tecnologías de energía renovable (Ilustración 32), contribuye a la reducción de la huella de carbono y asegura una operación más sostenible y eficiente de la planta.



Ilustración 32. Implementación de paneles solares durante la ampliación de la EDAR Viladecavalls Este (elaboración propia)

La herramienta también ha demostrado ser adaptable y versátil, pudiendo ajustarse a las condiciones y necesidades específicas de diferentes plantas de tratamiento. Esto la convierte en una herramienta fuerte y confiable para la optimización y/o ampliación de diversas Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales.

Finalmente, al comparar los resultados obtenidos con la decisión tomada por los expertos durante la ampliación de la EDAR de Viladecavalls Este, podemos afirmar que la herramienta de análisis multicriterio es una herramienta valiosa y precisa. No solo coincide con las decisiones de expertos en el campo, sino que también proporciona un enfoque estructurado y objetivo para la toma de decisiones en el ámbito del tratamiento de aguas residuales. Este resultado, el sistema SBR de la lustración 33, refuerza la confianza en la herramienta como un recurso crucial para la optimización de instalaciones de tratamiento de aguas residuales.



Ilustración 33. Vista del SBR tras su construcción (elaboración propia)

7.2. Comparativa entre ambos casos de estudio

Una vez hemos aplicado la herramienta multicriterio en dos casos reales, comprobamos que EDAR de El Barraco y San Juan de la Nava, y en la de Viladecavalls Este, se han obtenido resultados diferentes sistemas de depuración en cada caso, no siendo tan diferentes ambas poblaciones. En la EDAR de El Barraco y San Juan de la Nava, el sistema de depuración obtenido tras analizar todo los criterios ha sido el Reactor de Biopelícula sobre Lecho Móvil (MBBR), mientras que para la EDAR de Viladecavalls Este, el sistema que ha obtenido más valoración ha sido el Reactor Secuencial Batch (SBR).

A continuación, explicamos de forma algo más detallada porque, a pesar de no ser poblaciones tan distantes entre sí, con cada una obtenemos un sistema de depuración diferente.

EDAR de El Barraco y San Juan de la Nava. Sistema MBBR

- Infraestructura existente:

Para proceder a la optimización de la depuradora de El Barraco y San Juan de la Nava, esta dispone de varias infraestructuras compatibles con el sistema de depuración escogió, el Reactor de Biopelícula sobre Lecho Móvil (MBBR). Entre las infraestructuras a reutilizar destacan las turbosoplantes y la obra civil de los reactores existentes. Esto permitirá optimizar de manera más fácil y con menos costes el sistema MBBR, aprovechando al máximo el espacio disponible sin necesidad de grandes modificaciones en cuanto a la obra civil.

- Eficiencia operativa y flexibilidad:

El MBBR destaca por su alta capacidad en la eliminación de varios tipos de contaminante y su capacidad para manejar variaciones en los caudales de entrada. Dado que la planta de El Barraco y San Juan de la Nava tenía que gestionar variaciones significativas en los caudales y la carga contaminante, especialmente durante las épocas de vaciado de piscinas y durante la época de lluvias intensas, el MBBR ofrece una solución robusta y adaptable.

- Costes de mantenimiento y operación:

El sistema de depuración MBBR destaca también por su capacidad para trabajar con unos costes de mantenimiento bastante menores a los demás sistemas de depuración estudiados. Así mismo destaca por su diseño simple y robusto, haciendo que obtenga una puntuación elevada para este caso de estudio. Esto fue especialmente importante en este caso, ya que la planta actual está totalmente sobredimensionada y enfrentaba altos costes durante la operación, tanto de personal, pero sobre todo por mantenimiento. Con el sistema MBBR se conseguirá que la necesidad de intervención por personal sea menor, así como la posibilidad de una mayor automatización. Estos criterios contribuirán a reducir los costes a largo plazo.

- Sostenibilidad:

El MBBR destaca también por su eficiencia energética y su potencial para ser combinado con fuentes de energía renovable. Esto se alineó con los objetivos de sostenibilidad y reducción de la huella de carbono de la planta, ofreciendo una solución más verde y a su vez, eficiente.

EDAR de Viladecavalls Este. Sistema SBR

- Capacidad y caudales de entrada:

La EDAR de Viladecavalls Este estaba diseñada inicialmente para manejar un caudal de 900 m³/día, pero actualmente recibe aproximadamente 1.400 m³/día. Tras realizar varios estudios

se ve que, en el futuro, los caudales podrían alcanzar los 1.900 m³/día debido al crecimiento de la población y también con el aumento de industrias en la zona. El sistema SBR, como se ha visto en el Estado del Arte y se ha ido estudiando durante todo el trabajo, destaca por su capacidad para gestionar altas cargas contaminantes, como las industriales, de manera eficiente. Todo ello ha hecho que el sistema SBR obtenga la mayor puntuación en este caso de estudio.

- Espacio y restricciones de terreno:

La EDAR de Viladecavalls Este tiene muy poco terreno disponible para realizar una ampliación ya que, fuera de su parcela, está rodeada por carreteras y cultivos varios. El sistema SBR, al tener un diseño compacto y modular, puede ser construido en lugares con poco espacio disponible, como el caso donde nos encontramos.

- Eficiencia en la eliminación de contaminantes:

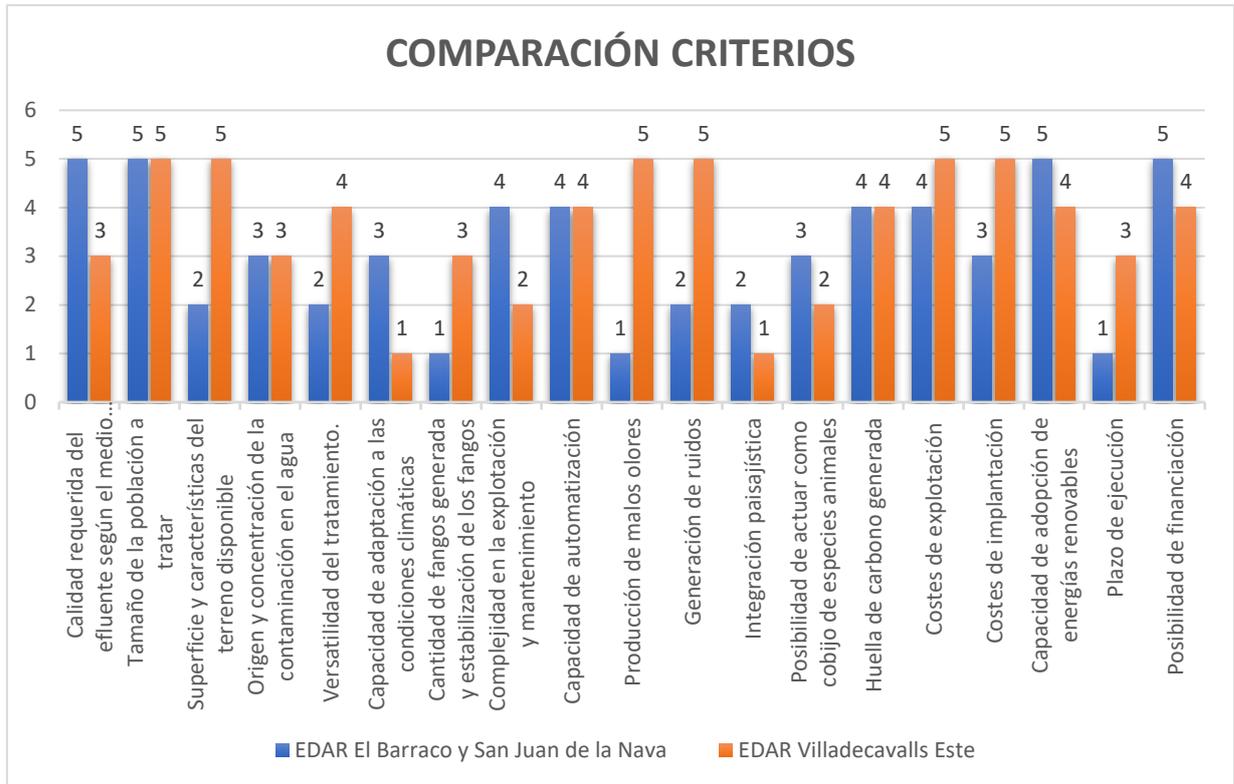
Aunque el MBBR también destaca por ser un sistema altamente eficiente y válido, el SBR ofreció una mayor capacidad de adaptación a las condiciones específicas de Viladecavalls Este, al disponer de contaminación por parte de la población, pero también al llegar a la EDAR contaminación procedente de la industria. Con esta contaminación, el sistema SBR destaca ya que permite ajustar los tiempos de ciclo al igual que las fases del tratamiento de las aguas residuales permitiendo eliminar de forma más precisa los contaminantes, obteniendo un agua depurada de alta calidad.

- Capacidad de automatización y mantenimiento:

Previo a su ampliación, la planta de Viladecavalls Este contaba con personal especializado de forma continua debido a los problemas continuos ocasionados por el aumento continuo de caudal. Con la implementación del sistema SBR se pretende optimizar a la vez que se automatiza parte del proceso. Esto conseguirá una menor intervención por parte de este personal, ocasionando menos errores humanos y a la vez que se consigue disminuir los costes de operación y mantenimiento.

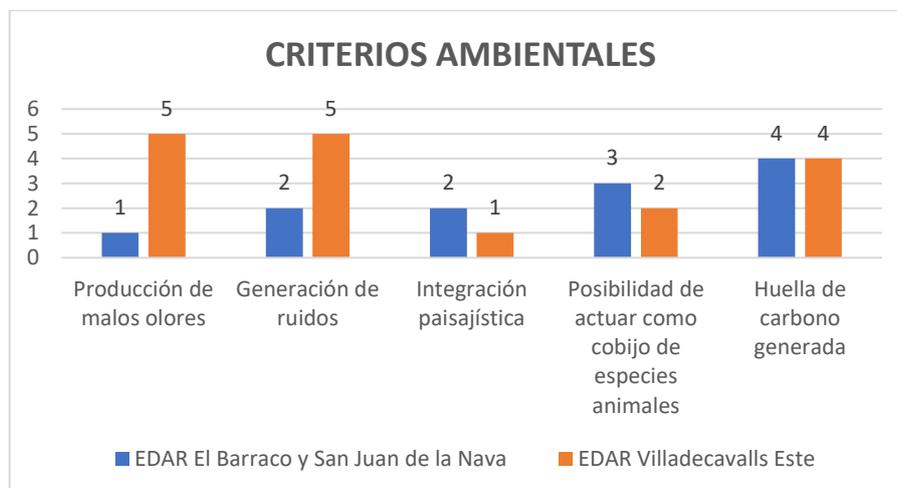
Continuando, comparando ambos casos de estudio, en la Tabla 59 podemos ver, de forma gráfica, la diferencia de puntuación para cada uno de los criterios entre la EDAR de El Barraco y San Juan de la Nava y la EDAR de Viladecavalls Este.

Tabla 59. Puntuación de criterios para cada caso de estudio (elaboración propia)



Revisando más a fondo cada una de las puntuaciones otorgadas a ambas EDAR, observamos como la mayor diferencia de puntuación entre ambas poblaciones se da en los criterios ambientales (Tabla 60). Esto se debe principalmente a que la EDAR de El Barraco y San Juan de la Nava se ubica lejos del núcleo urbano por lo que los criterios de Producción de malos olores y Generación de ruidos obtienen puntuaciones más bajas debido a que son criterios que no tienen tanta importancia como si la tienen en la EDAR de Viladecavalls Este. En esta depuradora y como vemos en la siguiente gráfica, estos criterios obtienen una mayor puntuación ya que esta se encuentra muy cerca del núcleo urbano, cerca de la población por lo que la Producción de malos olores y la Generación de ruidos son criterios que obtiene puntuaciones más altas.

Tabla 60. Puntuación de criterios ambientales para cada caso de estudio (elaboración propia)



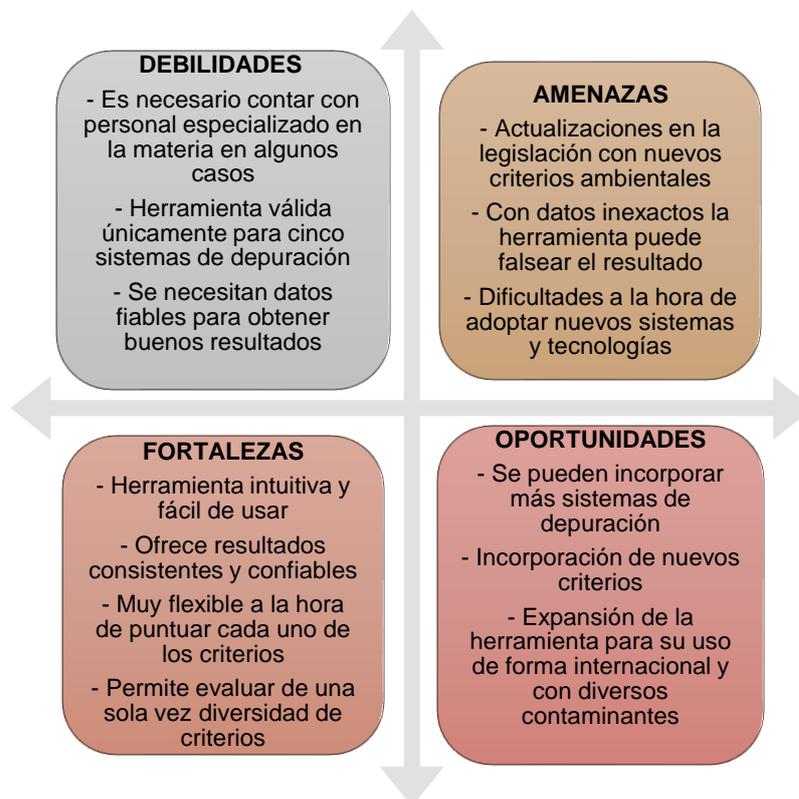
Con toda esta información se considera que la selección del sistema de depuración MBBR para la EDAR de El Barraco y San Juan de la Nava y del sistema SBR para la EDAR de Viladecavalls Este se ha basado en las necesidades y limitaciones específicas de cada depuradora. El MBBR fue el sistema en obtener mayor puntuación en la EDAR de El Barraco y San Juan de la Nava gracias a su capacidad para utilizarse con la infraestructura existente, su fácil operación con un coste de operación y mantenimiento bajo y su alineación con los objetivos de sostenibilidad sostenibles, criterios muy importante. Por otro lado, el sistema SBR fue seleccionado para la EDAR de Viladecavalls Este debido a su capacidad para adaptarse altos caudales, sus buenos resultados con limitación de espacio y su adaptabilidad a las condiciones cambiantes.

Estos dos resultados demuestran que la herramienta de análisis multicriterio creada es eficaz y viable para identificar los sistemas de depuración óptimos según el caso de estudio.

7.3. Análisis de la herramienta y sus limitaciones

Una vez la herramienta ha sido validada con dos casos reales se han detectado algunas limitaciones que son necesarias explicar de manera más detallada. Vamos a comenzar realizando un análisis DAFO (Tabla 61) para detectar las Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades de la herramienta.

Tabla 61. Matriz DAFO de resultados (elaboración propia)



Mediante el uso de la herramienta en dos casos reales se ha podido comprobar que estamos ante una herramienta robusta y con gran versatilidad al usar un gran número de criterios de diversa índole. Sin embargo, existen limitaciones que se han identificado y son necesarias de desarrollar para poder mejorar la herramienta y hacer que tenga mayor precisión.

Con el uso de la herramienta se ha podido comprobar que hay criterios donde la puntuación dada es subjetiva, pudiendo falsear los resultados obtenidos. Entre estos criterios destacan los criterios de "*Calidad requerida del efluente según el medio receptor*" y el de "*Versatilidad del tratamiento*". Estos dos criterios pueden tener diferente puntuación según el experto que lo analice por lo que se recomienda contar con la experiencia de varios expertos para evitar esta subjetividad y obtener datos más fiables con el uso de la herramienta creada.

Con el desarrollo de esta herramienta multicriterio se ha detectado que los criterios técnicos, que a su vez necesitan la validación de expertos en la materia, son los criterios que más influyen a la hora de elegir el sistema de depuración más adecuado. Entre todos los criterios técnicos, se comprueba que el que más puede influir en la elección de un sistema u otro es el de "*Calidad requerida del efluente según el medio receptor*". Si una EDAR no puede asegurar que el efluente tiene unos mínimos estándares para cumplir con la normativa actual, cualquier otro criterio se vuelve irrelevante. Por lo tanto, como se ha indicado anteriormente, este criterio debe ser evaluado por varios expertos en la materia para asegurar así el correcto uso de la herramienta y de esta forma se obtengan datos fiables.

Dependiendo del caso de estudio, hay criterios que resultan poco importantes y tiene un menor impacto a la hora de ampliar y/o optimizar una EDAR. Por ejemplo, si nos encontramos con una planta depuradora lejos del núcleo urbano, como por ejemplo la EDAR de San Juan de la Nava y El Barraco, los criterios de "*Producción de malos olores*" y "*Generación de ruidos*" son criterios poco importantes, sin embargo, el criterio de "*Integración paisajística*" puede que tenga mayor importancia si la planta se encuentra en zona natural o protegida. Por el contrario, en zonas altamente pobladas donde ya existe una EDAR y esta se encuentra cerca del núcleo urbano, el criterio de "*Integración paisajística*" no tendrá una importancia significativa.

Se debe tener especial cuidado a la hora de puntuar algunos criterios ya que estos pueden tener un impacto importante en el caso que estemos estudiando. Por ejemplo, el criterio de "*Coste de implantación*" puede ser uno de estos criterios. Si nos encontramos ante un caso donde la limitación es limitada, un error a la hora de puntuar este criterio puede ocasionar grandes problemas económicos durante la implantación de la depuradora.

Así mismo, la herramienta depende, en gran medida, de la disponibilidad y exactitud de los datos de entrada. Como se ha comentado anteriormente, sin unos buenos datos de entrada, la herramienta puede otorgar puntuaciones que no se corresponde con la realidad del caso de estudio. Esto puede ocasionar que la decisión que se vaya a tomar sea una decisión inadecuada. Es muy importante realizar un gran trabajo previo para recolectar esta información y así obtener unos resultados correctos.

Como hemos detectado al realizar el DAFO, esta herramienta es útil pero únicamente para los cinco sistemas de depuración estudiados: Lagunaje (LA), Humedal artificial de flujo subsuperficial vertical-horizontal (HFSV-HFSH), Contactor biológico rotativo (CBR), Reactor secuencial (SBR) y Reactor biopelícula sobre lecho móvil (MBBR). Esto limita a la herramienta ya que únicamente el resultado

sería uno de estos cinco sistemas de depuración. De cara al futuro, esta herramienta podría ampliarse introduciendo más sistemas de depuración a la vez que más criterios.

Se ha detectado que la herramienta tiene limitaciones en términos de flexibilidad siendo complicado adaptarse de forma rápida a cambios en la normativa o con la introducción de avances en la tecnología de depuración. Poder actualizar estos elementos requiere de tiempo y una dedicación para conocer estas nuevas normas y los nuevos avances en tecnología, pudiendo complicar la actualización de esta herramienta.

Aunque la herramienta de análisis multicriterio creada ha demostrado ser robusta y fiable para la optimización y/o ampliación de sistemas de tratamiento de aguas residuales, esta tiene limitaciones que deben ser consideradas, tal y como hemos explicado, pero con una gestión adecuada y la incorporación de mejoras continuas, la herramienta puede seguir siendo una pieza clave en la toma de decisiones informadas y sostenibles en el ámbito del tratamiento de aguas residuales.

8. SOSTEIBILIDAD

Desde los primeros pasos de este Trabajo Fin de Máster, este se ha ido desarrollando, considerando la sostenibilidad como un pilar fundamental al buscar crear una herramienta que ayude a mejorar la depuración de las aguas residuales en poblaciones de menos de 10.000 habitantes equivalentes. Con todo ello, en este TFM se ha creado una herramienta multicriterio donde se han analizado diversos criterios Ambientales, Técnicos y de Explotación, que, a su vez, contribuyen a la sostenibilidad medioambiental, a la sostenibilidad económica y a la sostenibilidad social.

Con este TFM buscamos promover practicas sostenibles que cumplan con las normativas actuales, pero que también puedan ir más allá, cumpliendo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) al poder seleccionar el sistema de depuración que mejor se adapta a cada caso de estudio, haciendo que la depuración sea más eficaz y adecuada pudiendo, a la vez, mejorar el medio ambiente, con la correcta depuración de las aguas y su posterior reutilización, la economía de la población, al buscar disminuir costes, y socialmente ayudando a que las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales sean aceptadas mejor por la población.

Por todo ello, es muy importante que esta herramienta multicriterio nos proporcione el sistema de depuración más adecuado garantizando que este sea técnicamente viable a la vez que también sea viable teniendo en cuenta el medioambiente, la economía y la sociedad. Esto fomentará que la herramienta sea viable a la vez que sostenible con el medio que nos rodea.

A continuación, desarrollamos de manera más concreta los pilares de la sostenibilidad sobre los que se ha enfocado este TFM, sostenibilidad medioambiental, sostenibilidad económica y sostenibilidad social.

8.1. Sostenibilidad Medioambiental

Durante el desarrollo de este TFM, se ha hecho hincapié en la sostenibilidad medioambiental ya que la herramienta multicriterio creada para seleccionar el sistema de depuración más adecuado tiene en cuenta prácticas que minimicen el impacto sobre el medio ambiente. Entre los criterios, destacan los relacionados con la huella de carbono y con la integración de energías renovables en las instalaciones.

Gracias a los criterios que indicamos a continuación, conseguiremos que tras la realización de la ampliación y/o optimización de la EDAR existente, contribuyamos a mejorar medioambientalmente la depuradora que estamos estudiando, tanto en la fase de construcción con el uso de materiales amigables con el medio ambiente, como durante la explotación, intentando que esta genere la menores emisiones posibles y sea autosuficiente.

- Calidad requerida del efluente según el medio receptor:

Aunque en la herramienta multicriterio está considerado como un criterio técnico, este criterio asegura que, una vez tratadas las aguas residuales, estas lleguen al medio receptor en unas condiciones que cumplan la normativa actual pero que también tenga en cuenta futuras normativas ambientales.

- Superficie y características del terreno disponible para la ampliación de la EDAR

Nos encontramos ante un criterio técnico muy relacionado con la sostenibilidad ambiental ya que, si para el caso de estudio no disponemos de terreno disponible para realizar su optimización, es posible que al buscar un nuevo emplazamiento nos encontremos con diversos problemas medioambientales, como por ejemplo la necesidad de talar árboles, zonas protegida, etc. Con un buen estudio de este criterio contribuiremos a la sostenibilidad ambiental de la herramienta multicriterio.

- Origen y concentración de la contaminación en el agua residual:

Al igual que el criterio anterior, este criterio está considerado como un criterio técnico, pero gracias a la evaluación de este criterio, podemos escoger el sistema de depuración que mejor se adapta a la contaminación, promoviendo la elección de un sistema más eficiente y mejor con el medio ambiente.

- Capacidad de adaptación a las condiciones climáticas:

Consideramos a este criterio como sostenible medioambientalmente ya que, con la correcta elección del sistema de depuración, aseguraremos su correcta eficiencia durante todas las épocas del año, independientemente de las condiciones climáticas.

- Cantidad de fangos generada y estabilización de los fangos:

Gracias a la evaluación de este criterio buscamos que sistemas son mejores para el tratamiento de un subproducto generado tras la depuración de las aguas. Una correcta gestión de los fangos contribuye a minimizar el impacto ambiental a la vez que contribuimos a la *sostenibilidad* medioambiental.

- Integración paisajística:

Gracias a este criterio, buscamos que sistema de depuración se integra de mejor forma con el entorno natural que le rodea, ya que es habitual que las EDAR de poblaciones pequeñas se encuentren en zonas alejadas de la población, zonas con una importante vida natural. Con ellos reduciremos el impacto visual generando una mejor aceptación por la población a la vez que mejoramos medioambientalmente la zona.

- Posibilidad de actuar como cobijo de especies animales:

Al igual que con la integración paisajística, con este criterio buscamos mejorar la biodiversidad asociada a la EDAR que estamos estudiando. Como se ha explicado en la elaboración de la herramienta, se pueden implementar diferentes tipos de construcciones que puedan contribuir a aumentar la fauna de la zona a la vez que mejoramos medioambientalmente la zona.

- Huella de carbono generada:

Al buscar sistemas de depuración que generen una menor huella de carbono, contribuimos medioambientalmente a reducir las emisiones de carbono que se emiten a la atmósfera durante la construcción de una depuradora y durante su explotación. Con ello se pretende elegir nuevos sistemas que generen una menor huella de carbono.

- Capacidad de adopción de energías renovables:

Como se ha explicado durante el desarrollo de la herramienta, una EDAR puede llegar a ser un lugar idóneo donde colocar diferentes estilos de energías renovables, como, por ejemplo, paneles solares en los edificios de control. Se pretende reducir la dependencia de energía no renovables llegando a ser la planta totalmente autosuficiente energéticamente con la unión de energías renovables y una correcta gestión de los fangos.

8.2. Sostenibilidad Económica

Debemos entender la sostenibilidad en todo su aspecto, no solo como la sostenibilidad medioambiental. La sostenibilidad económica también ha sido clave en la realización de la herramienta multicriterio ya que varios criterios van enlazados con la sostenibilidad económica. La herramienta nos permite evaluar los costes de explotación e implantación de la nueva EDAR, asegurando que las soluciones propuestas sean viables y sostenibles económicamente a largo plazo. Con los criterios que explicamos a continuación buscamos una gestión económica adecuada durante la construcción y durante la explotación de la depuradora que se vaya a ampliar y/o optimizar. Esto beneficiará tanto a la población como a las administraciones públicas gestoras.

- Costes de explotación:

Con este criterio analizamos los costes que va a generar cada uno de los sistemas de depuración durante su fase de explotación. Buscamos sistemas que generen menos costes de explotación o que si generan altos costes estos se puedan minimizar. Para ellos se buscarán opciones que sean económicamente sostenibles a largo plazo.

- Costes de implantación:

Al igual que con los costes de explotación, con este criterio analizamos los costes que va a generar cada uno de los sistemas de depuración estudiados durante su fase de implantación, es decir, mientras se realizan las mejoras necesarias para su optimización y/o ampliación. Sistemas con menos costes de implantación, con menos obra necesaria, ayudará a minimizar los costes buscamos que estas opciones sean sostenibles económicamente durante su implantación, pero también a largo plazo.

- Plazo de ejecución:

Este criterio, considerado como un criterio de desempate, puede llegar a ser un criterio con una alta importancia a la hora de la sostenibilidad económica a la hora de realizar nuestro proyecto. Un plazo de ejecución alargado en el tiempo, con retrasos e imprevistos genera unos costes elevados. Con este criterio se pretende observar y analizar los sistemas de depuración para evitar estos problemas y así realizar una correcta gestión del tiempo a la vez que se ajusta económicamente la ampliación y/o optimización de la EDAR que estemos estudiando.

- Posibilidad de financiación:

Al igual que con el criterio de plazo de ejecución, el criterio ante el que nos encontramos es considerado como un criterio de desempate, pero es importante tenerlo en cuenta por su importancia a la hora de la sostenibilidad económica de este trabajo. Con este criterios se busca disponer, de la mejor forma posible, de recursos financieros para realizar la ampliación y/o optimización de la EDAR existente a la vez que se busca que esta financiación sea viable a corto y largo plazo.

- Capacidad de automatización:

La capacidad de automatización de cada uno de los sistemas de depuración estudiando, nos indica como es de fácil automatizar los procesos asociados a cada uno de los sistemas. Este criterio está considerado como un criterio técnico, pero también es importante analizar que tanto es posible realizar dicha automatización ya que, a largo plazo, esto puede reducir de forma significativa los costes asociado a dicho sistema de depuración, mejorando su eficiencia y haciendo posible sus sostenibilidad económica.

8.3. Sostenibilidad Social

Aun que todos tenemos en mente que la sostenibilidad va relacionada con el medio ambiente, no hay que dejar de lado la parte social referente a la sostenibilidad. Con varios de los criterios seleccionados durante la creación de la herramienta multicriterio, podemos mejorar la calidad de vida de la población a la vez que hacemos que las depuradoras sean aceptadas socialmente.

Entre los criterios que ayudan a este proyecto con la sostenibilidad ambiental, destaca la producción de malos olores y la generación de ruidos, entre otros.

- Producción de malos olores:

Con la evaluación de este criterio, considerado como un criterio ambiental en la herramienta multicriterio, se busca minimizar el impacto ocasionado por los malos olores que suelen llevar asociadas las depuradoras. Se busca minimizar los olores generados a la vez que se minimiza las molestias a la población cercana. También se intentará que la depuradora tenga una aceptación social cada vez más fuerte.

- Generación de ruidos:

Al estudiar este criterio en referencia a la sostenibilidad, nos encontramos ante un criterio ambiental considerado en la evaluación de la herramienta multicriterio, pero, al igual que nos está pasando con gran parte de los criterios estudiados, este puede ser considerado sostenible socialmente a la vez que es un criterio ambiental. Con el estudio de este criterio se pretende buscar sistemas de depuración que generen las menores interferencias acústicas con la población posible, para así proteger su salud y ayudar a mejorar su calidad de vida.

- Complejidad en la explotación y mantenimiento:

La complejidad asociada a la explotación y el mantenimiento de un sistema de depuración va ligada a lo fácil o difícil que puede resultar cada uno de los sistemas de depuración en este proceso. Con la evaluación de este criterio en, referencia a la sostenibilidad social, se busca que el personal a cargo de la depuradora obtenga la formación necesaria para poder realizar su trabajo sin dificultades excesivas. Con la realización de cursos a este personal, e incluso a la población general, mejoraremos socialmente las depuradoras tras su ampliación y/o optimización.

Una vez analizada más a fondo la parte relacionada con las sostenibilidad, asociada a la herramienta multicriterio, desarrollada para ampliar y/o optimizar Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales existentes, nos encontramos ante una situación donde hemos considerado criterios técnicos, ambientales y de explotación, así como dos más de desempate, que pueden contribuir, a su vez, con la sostenibilidad medioambiental, con la sostenibilidad económica o sostenibilidad social. Es decir, nos encontramos ante criterios técnicos que fomentan la sostenibilidad medioambiental, sin que esto implique un error en la herramienta. Por otro lado, nos encontramos también con criterios técnicos que no están relacionados con la sostenibilidad en este trabajo.

A continuación, exponemos la Tabla 62, donde vamos a poder ver de manera gráfica como quedaría la introducción de la sostenibilidad en cada uno de los criterios estudiados en la elaboración de la herramienta multicriterio.

Tabla 62. Sostenibilidad según cada criterio estudiado (elaboración propia)

SOSTENIBILIDAD	CRITERIOS TÉCNICOS
MEDIOAMBIENTAL	Calidad requerida del efluente según el medio receptor
	Tamaño de la población a tratar
MEDIOAMBIENTAL	Superficie y características del terreno disponible para la ampliación de la EDAR
MEDIOAMBIENTAL	Origen y concentración de la contaminación en el agua residual
	Versatilidad del tratamiento
MEDIOAMBIENTAL	Capacidad de adaptación a las condiciones climáticas
MEDIOAMBIENTAL	Cantidad de fangos generada y estabilización de los fangos
SOCIAL	Complejidad en la explotación y mantenimiento
ECONÓMICA	Capacidad de automatización
SOSTENIBILIDAD	CRITERIOS AMBIENTALES
SOCIAL	Producción de malos olores
SOCIAL	Generación de ruidos
MEDIOAMBIENTAL	Integración paisajística
MEDIOAMBIENTAL	Posibilidad de actuar como cobijo de especies animales
MEDIOAMBIENTAL	Huella de carbono generada
SOSTENIBILIDAD	CRITERIOS DE EXPLOTACIÓN
ECONÓMICA	Costes de explotación
ECONÓMICA	Costes de implantación
MEDIOAMBIENTAL	Capacidad de adopción de energías renovables
SOSTENIBILIDAD	CRITERIOS DE DESEMPATE
ECONÓMICA	Plazo de ejecución
ECONÓMICA	Posibilidad de financiación

8.4. Sostenibilidad en ambos casos de estudio

Una vez hemos establecido cada uno de los criterios según su impacto en la sostenibilidad, ya sea sostenibilidad medioambiental, económica o social, podemos analizar cómo la sostenibilidad se aplica en los dos casos de estudio realizados anteriormente. Para ello, en la herramienta multicriterio realizada anteriormente donde tenemos los porcentajes para criterio, añadiremos los criterios de sostenibilidad estudiados más arriba. De esta manera podremos ver qué porcentaje de importancia obtiene la sostenibilidad según cada caso y nos ayudará a identificar las áreas con mayor impacto y como mejorarlas.

Con todo ello, garantizamos que los sistemas de depuración escogidos cumplan con los criterios técnicos, ambientales y de explotación a la vez que se influye en la sostenibilidad del proyecto.

8.4.1. EDAR de El Barraco y San Juan de la Nava

En la Tabla 63 tenemos la herramienta multicriterio utilizada anteriormente para conocer qué sistema de depuración es el más adecuado en el caso de estudio de la EDAR de El Barraco y San Juan de la Nava junto con las sostenibilidades consideradas tras el estudio.

Tabla 63. Sostenibilidad y criterios para el caso de estudio de El Barraco y San Juan de la Nava (elaboración propia)

		VALOR ASIGNADO	PORCENTAJE OBTENIDO
SOSTENIBILIDAD	CRITERIOS TÉCNICOS		
MEDIOAMBIENTAL	Calidad requerida del efluente según el medio receptor	5 (muy relevante)	8%
	Tamaño de la población a tratar	5 (muy relevante)	8%
MEDIOAMBIENTAL	Superficie y características del terreno disponible para la ampliación de la EDAR	2 (poco relevante)	3%
MEDIOAMBIENTAL	Origen y concentración de la contaminación en el agua residual	3 (medianamente relevante)	5%
	Versatilidad del tratamiento.	2 (poco relevante)	3%
MEDIOAMBIENTAL	Capacidad de adaptación a las condiciones climáticas	3 (medianamente relevante)	5%
MEDIOAMBIENTAL	Cantidad de fangos generada y estabilización de los fangos	1 (muy poco relevante)	2%
SOCIAL	Complejidad en la explotación y mantenimiento	4 (relevante)	7%
ECONÓMICA	Capacidad de automatización	4 (relevante)	7%
SOSTENIBILIDAD	CRITERIOS AMBIENTALES		
SOCIAL	Producción de malos olores	1 (muy poco relevante)	2%
SOCIAL	Generación de ruidos.	2 (poco relevante)	3%
MEDIOAMBIENTAL	Integración paisajística	2 (poco relevante)	3%
MEDIOAMBIENTAL	Posibilidad de actuar como cobijo de especies animales	3 (medianamente relevante)	5%
MEDIOAMBIENTAL	Huella de carbono generada	4 (relevante)	7%
SOSTENIBILIDAD	CRITERIOS DE EXPLOTACIÓN		
ECONÓMICA	Costes de explotación	4 (relevante)	7%
ECONÓMICA	Costes de implantación	3 (medianamente relevante)	5%
MEDIOAMBIENTAL	Capacidad de adopción de energías renovables	5 (muy relevante)	8%
SUMATORIO			90%
SOSTENIBILIDAD	CRITERIOS DE DESEMPATE		
ECONÓMICA	Plazo de ejecución	1 (muy poco relevante)	2%
ECONÓMICA	Posibilidad de financiación	5 (muy relevante)	8%
SUMATORIO			10%
SUMATORIO TOTAL			100%

Con la elaboración de la Ilustración 34 observamos como la Sostenibilidad Medioambiental, con un porcentaje del 47%, es la que obtiene mayor puntuación. La sostenibilidad económica para este caso de estudio obtiene una puntuación bastante menor. Estos porcentajes se alienan con lo descrito anteriormente durante el desarrollo de la herramienta para este caso de estudio, donde la parte medioambiental ha prevalecido frente a la social y económica.

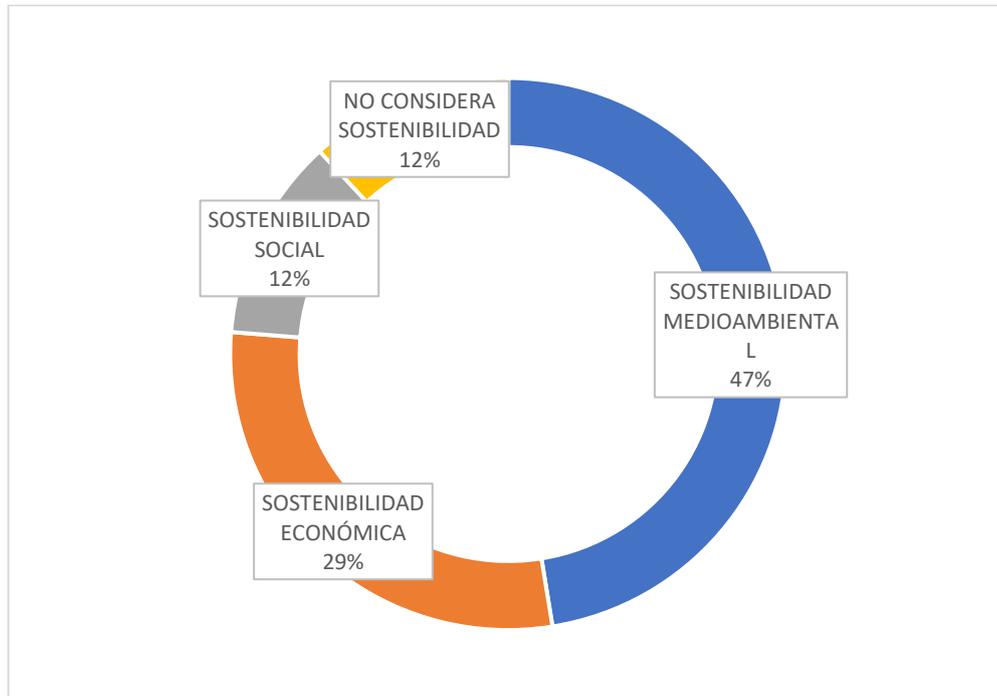


Ilustración 34. Gráfico con los porcentajes de sostenibilidad para la EDAR de El Barraco y San Juan de la Nava (elaboración propia)

8.4.2. EDAR de Viladecavalls Este

En la Tabla 64 tenemos la herramienta multicriterio utilizada anteriormente para conocer qué sistema de depuración es el más adecuado en el caso de estudio de la EDAR de Viladecavalls Este, junto con las sostenibilidades consideradas tras el estudio.

Tabla 64 Sostenibilidad y criterios para el caso de estudio de Viladecavalls Este (elaboración propia).

		VALOR ASIGNADO	PORCENTAJE OBTENIDO
SOSTENIBILIDAD	CRITERIOS TÉCNICOS		
MEDIOAMBIENTAL	Calidad requerida del efluente según el medio receptor	3 (medianamente relevante)	4%
	Tamaño de la población a tratar	5 (muy relevante)	7%

MEDIOAMBIENTAL	Superficie y características del terreno disponible para la ampliación de la EDAR	5 (muy relevante)	7%
MEDIOAMBIENTAL	Origen y concentración de la contaminación en el agua residual	3 (medianamente relevante)	4%
	Versatilidad del tratamiento.	4 (relevante)	6%
MEDIOAMBIENTAL	Capacidad de adaptación a las condiciones climáticas	1 (muy poco relevante)	1%
MEDIOAMBIENTAL	Cantidad de fangos generada y estabilización de los fangos	3 (medianamente relevante)	4%
SOCIAL	Complejidad en la explotación y mantenimiento	2 (poco relevante)	3%
ECONÓMICA	Capacidad de automatización	4 (relevante)	6%
SOSTENIBILIDAD	CRITERIOS AMBIENTALES		
SOCIAL	Producción de malos olores	5 (muy relevante)	7%
SOCIAL	Generación de ruidos.	5 (muy relevante)	7%
MEDIOAMBIENTAL	Integración paisajística	1 (muy poco relevante)	1%
MEDIOAMBIENTAL	Posibilidad de actuar como cobijo de especies animales	2 (poco relevante)	3%
MEDIOAMBIENTAL	Huella de carbono generada	4 (relevante)	6%
SOSTENIBILIDAD	CRITERIOS DE EXPLOTACIÓN		
ECONÓMICA	Costes de explotación	5 (muy relevante)	7%
ECONÓMICA	Costes de implantación	5 (muy relevante)	7%
MEDIOAMBIENTAL	Capacidad de adopción de energías renovables	4 (relevante)	6%

SUMATORIO		90%
------------------	--	-----

SOSTENIBILIDAD	CRITERIOS DE DESEMPATE		
ECONÓMICA	Plazo de ejecución	3 (medianamente relevante)	4%
ECONÓMICA	Posibilidad de financiación	4 (relevante)	6%

SUMATORIO		10%
------------------	--	-----

SUMATORIO TOTAL		100%
------------------------	--	------

Al igual que con la EDAR de El Barraco y San Juan de la Nava, en la Ilustración 35 observamos, de manera gráfica, los porcentajes de sostenibilidad obtenidos en este caso de estudio. Al contrario que con la EDAR de El Barraco y San Juan de la Nava, en el caso de estudio de la EDAR de Viladecavalls Este, los porcentajes de sostenibilidad económica y medioambiental son más parejos ya que en este estudio la parte económica ha tenido un peso elevado a la hora de elegir el sistema de depuración más adecuado.

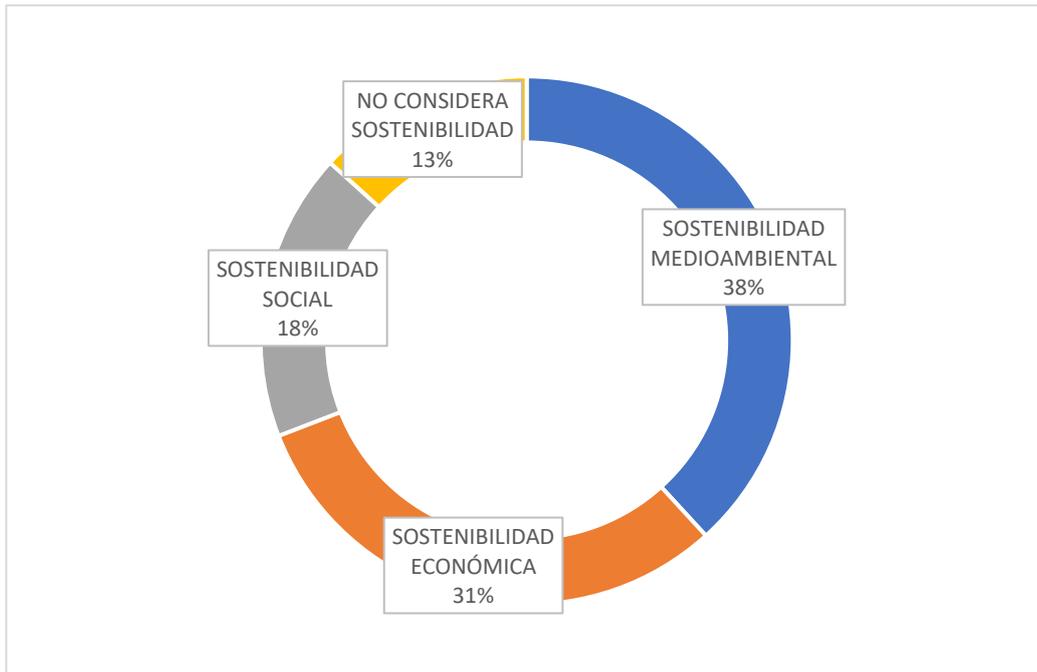


Ilustración 35. Gráfico con los porcentajes de sostenibilidad para la EDAR de Viladecavalls Este (elaboración propia)

8.5. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Como se ha explicado en los objetivos de este TFM, con la elaboración de este trabajo, se busca contribuir de la mejor manera con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), destacando el ODS 6 (Agua limpia y saneamiento) y el ODS 13 (Acción por el clima), entre otros.

8.5.1. ODS 6: Agua limpia y saneamiento



El ODS 6 tiene como meta garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos. La herramienta multicriterio apoya este objetivo de diversas maneras:

Con la herramienta creada se busca seleccionar el sistema de depuración más adecuado para caso. Entre los criterios usados destaca Calidad requerida del efluente según el medio receptor, criterio muy importante a la hora de realizar el tratamiento de las aguas residuales, ya que es muy importante, que, tras la depuración, las aguas cumplan con la normativa actual.

Así mismo, se promueve la reutilización del agua tratada, como por ejemplo para el baldeo de las calles o el riego de zonas verdes. Con ello se reduce la necesidad de agua potable contribuyendo a la gestión sostenible de los recursos hídricos y asegurando la disponibilidad de agua potable para la población.

La herramienta fomenta la implementación de tecnologías nuevas, modernas y avanzadas que eliminan eficientemente los contaminantes, protegiendo así los ecosistemas acuáticos y asegurando un entorno más limpio y saludable.

8.5.2. ODS 13: Acción por el clima

13 ACCIÓN
POR EL CLIMA



El ODS 13 se centra en adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos. La herramienta multicriterio contribuye a este objetivo mediante:

La herramienta prioriza tecnologías de tratamiento que minimizan las emisiones de gases de efecto invernadero. Al evaluar y seleccionar opciones con una menor huella de carbono, se contribuye a la mitigación del cambio climático.

La herramienta promueve la adopción de energías renovables y la mejora de la eficiencia energética en las depuradoras que estamos estudiando, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles y disminuyendo las emisiones de carbono asociadas.

Al asegurar que los sistemas de depuración sean capaces de operar eficazmente bajo diversas condiciones climáticas, la herramienta contribuye a la resiliencia frente a los impactos del cambio climático, garantizando la continuidad y la eficacia del tratamiento de aguas residuales.

9. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

9.1. CONCLUSIONES

Durante la redacción de este TFM se ha investigado sobre diversos sistemas de depuración muy utilizados a lo largo de los últimos años y se ha ido creando una herramienta multicriterio para conocer qué sistema de depuración es el más adecuado para cada caso concreto de estudio, valorando de 1 a 5 diversos criterios.

Para la elaboración de este trabajo, se ha tomado como referencia inicial el "Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones". Sin embargo, se ha identificado que este manual está desactualizado, por lo tanto, se ha procedido a una revisión completa de los criterios que aparecen en dicho manual, actualizándolos y complementándolos con criterios de elaboración propia que se ha considerado relevantes.

En primer lugar, se han incorporado nuevos criterios que reflejan mejor las necesidades y exigencias actuales en términos de sostenibilidad ambiental, eficiencia operativa y viabilidad económica. Estos criterios adicionales incluyen, entre otros, la capacidad de integración de energías renovables, la gestión y reducción de la huella de carbono, y la capacidad de adaptación a condiciones cambiantes.

También, se han introducido y evaluado nuevos sistemas de depuración que no estaban contemplados en el manual original. Estos sistemas incluyen tecnologías avanzadas y emergentes que ofrecen soluciones más eficientes y sostenibles para el tratamiento de aguas residuales. La introducción de estos sistemas permite una comparación más amplia y exhaustiva, facilitando elegir el sistema más adecuado para cada caso de estudio, donde cada caso tiene unas características diferentes. La actualización de todos los criterios y la incorporación de nuevas tecnologías ha sido fundamental para desarrollar una herramienta de análisis multicriterio robusta y fiable.

Una de las conclusiones sacadas durante la elaboración de este trabajo corresponde al sistema de lagunaje. El sistema de lagunaje, el cual históricamente se ha usado de forma habitual en el tratamiento de aguas residuales, consideramos que se encuentra anticuado debido a varias características propias del sistema. En primer lugar, requiere grandes extensiones de terreno para su implementación, lo cual no suele ser viable para ampliar y/o optimizar depuradoras existentes. Además, los sistemas de lagunaje suelen tener problemas de control de olores y pueden atraer vectores de enfermedades como mosquitos, lo que representa un riesgo para la salud pública. Su eficiencia en la eliminación de nutrientes y contaminantes es menor comparada con tecnologías estudiadas, y no siempre cumple con las normativas actuales.

Por el contrario, los humedales artificiales destacan por ser sistemas de depuración más adecuados para poblaciones muy pequeñas debido a su capacidad de implementación en situaciones donde la limitación de espacio no es tan importante a la vez que obtiene buenos resultados tras la depuración de las aguas residuales. Además, tienen la ventaja de depurar las aguas de manera natural, utilizando plantas y microorganismos para eliminar contaminantes de forma eficiente. Esto no solo mejora la sostenibilidad ambiental, sino que también reduce la necesidad de infraestructura y mantenimiento intensivo, haciendo de los humedales artificiales una opción práctica y económica para poblaciones de menor tamaño.

Respecto a los objetivos planteados al comienzo de este TFM llegamos a la conclusión de que hemos logrado cumplir con muchos de los objetivos planteados, aunque también hemos detectado algunas áreas donde se requiere más trabajo para alcanzar estos objetivos.

Se ha logrado identificar la necesidad de actualizar el manual y hemos creado una herramienta de análisis multicriterio cuya base viene dada investigaciones previas, incluyendo las realizadas por Ortega de Miguel et al. Esta herramienta ha sido creada para refinar y mejorar estas investigaciones, incorporando una amplia gama de criterios y factores en la evaluación de sistemas de depuración, asegurando una selección adecuada y sostenible.

El trabajo ha permitido el desarrollo de criterios de selección robustos, claros y cuantificables, que facilitan la optimización y ampliación de depuradoras existentes. La integración de las últimas tendencias en sostenibilidad y optimización del uso de recursos ha sido una parte fundamental del enfoque.

Respecto a la eliminación de fósforo y nitrógeno, la herramienta no ha tenido en cuenta estos criterios a la hora de ampliar y/o optimizar depuradoras existentes debido al rango de población donde esta herramienta es factible, entre 200 y 10.000 habitantes equivalentes. Este aspecto requiere una mayor investigación para poder ser integrado en futuras actualizaciones de la herramienta.

En cuanto a la incorporación de energías renovables, con la herramienta se ha tenido en cuenta este objetivo al considerar la integración de energías renovables y la eficiencia energética como criterios importantes. A la hora de validar esta herramienta, en el caso de la EDAR de Viladecavalls, se ha podido observar cómo tras las obras de ampliación se han incorporado paneles solares para así lograr un coste energético cero.

La herramienta ha sido diseñada para ser flexible y adaptable a cada caso de estudio, lo que facilita su utilización para un amplio abanico de situaciones. Aunque la validación de la herramienta se ha realizado con dos casos dentro del territorio nacional, la metodología es lo suficientemente fiable para que pueda tener una aplicación internacional.

El trabajo ha ayudado a contribuir a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) planteados inicialmente. El ODS 6 (Agua limpia y saneamiento) y ODS 13 (Acción por el clima) al promover prácticas sostenibles en el tratamiento de aguas residuales y la reducción de la huella de carbono usando como base una herramienta cuya finalidad principal es la correcta depuración de las aguas para así obtener un agua limpia. La herramienta considera criterios ambientales y de sostenibilidad, alineándose con estos objetivos globales.

Este TFM ha logrado cumplir con una gran parte de los objetivos planteados inicialmente, desarrollando una herramienta fácil de usar, eficaz y fiable para la selección de sistemas de depuración de aguas residuales para ampliar y/o optimizar depuradoras existentes. Aunque quedan aspectos por mejorar, especialmente en la eliminación de nutrientes y en los criterios ambientales,

los avances realizados proporcionan una base sólida para futuras investigaciones sobre esta herramienta.

9.2. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

Con este último punto buscamos aquellos gaps que no se han usado y que podrían servir de cara al futuro para mejorar esta herramienta, ya que con este Trabajo Fin de Máster queremos que la herramienta creada siga “viva” y se pueda ir trabajando sobre ella para que se pueda ir ampliando y mejorando de cara al futuro.

- *Integración de más sistemas de depuración*

A partir de lo aprendido en este TFM, es evidente que dependiendo del sistemas de depuración unos tienen sus ventajas y desventajas dependiendo del contexto en el que se apliquen. Investigar sobre tecnologías emergentes y menos comunes puede ofrecer soluciones innovadoras y eficientes. Por ejemplo, sistemas como los reactores anaeróbicos de flujo ascendente (UASB) pueden ser investigados para poder introducirlos en la herramienta multicriterio.

- *Mayor importancia a los criterios ambientales*

Para futuras investigaciones, se debería dar más importancia a los criterios ambientales para promover la sostenibilidad y reducir el impacto ambiental de las depuradoras. Durante el desarrollo de la herramienta se han incluido diversos criterios ambientales, como, por ejemplo, la huella de carbono generada según el sistema de depuración, pero de cara al futuro se podrían incluir criterios como la huella hídrica y el impacto sobre la biodiversidad. Esto permitirá tomar decisiones más informadas y sostenibles.

- *Capacidad de eliminar fósforo y nitrógeno*

Como se ha ido explicando en el Estado del Arte de este TFM, la correcta eliminación de nutrientes como el fósforo y el nitrógeno es crucial para evitar la eutrofización y cumplir con las normativas ambientales que cada vez son más exigentes, no solo a nivel nacional, sino a nivel internacional. Este TFM ha abordado la importancia de la eliminación de contaminantes, pero no se ha tenido en cuenta a la hora de realizar la herramienta multicriterio. Investigar sobre el uso de tecnologías avanzadas capaces de eliminar fósforo y nitrógeno es crucial para el futuro de la herramienta.

- *Capacidad de prevenir pandemias*

La pandemia de COVID-19 ha resaltado la importancia de la vigilancia sanitaria y el control de patógenos en el agua residual. Basado en lo aprendido en este TFM, futuras investigaciones deben enfocarse en cómo las plantas de tratamiento de aguas residuales pueden desempeñar un papel crucial en la prevención y control de pandemias. Sería muy interesante introducir criterios

enfocados en la prevención y el análisis exhaustivo de los patógenos de las aguas residuales que llegan a las depuradoras. Así mismo, se podría implementar tecnologías específicas para la detección temprana de estos elementos ayudando a reducir el riesgo de propagación de enfermedades.

10. BIBLIOGRAFIA

- Ajuntament de Viladecavalls. *Ajuntament de Viladecavalls* [en línea], 2024. [consulta: 3 junio 2024]. Disponible en: <https://viladecavalls.cat>.
- AKIN, B. y UGURLU, A., 2005. Monitoring and Control of Biological Nutrient Removal in a Sequencing Batch Reactor. *Process Biochemistry*, vol. 40, DOI 10.1016/j.procbio.2005.01.001.
- ALLEMAN, J. y IRVINE, R., 1980. Nitrification in the Sequencing Batch Biological Reactor. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, vol. 52, DOI 10.2307/25040953.
- ANGELAKIS, A.N. y GIKAS, P., 2014. Water reuse: Overview of current practices and trends in the world with emphasis on EU states. ,
- ARUN, V., MINO, T. y MATSUO, T., 1988. Biological mechanism of acetate uptake mediated by carbohydrate consumption in excess phosphorus removal systems. En: ADS Bibcode: 1988WatRe..22..565A, *Water Research*, vol. 22, DOI 10.1016/0043-1354(88)90056-5.
- Ávila: Población por municipios y sexo. (2858). *INE* [en línea], [sin fecha]. [consulta: 22 mayo 2024]. Disponible en: https://www.ine.es/jaxiT3/Datos.htm?t=2858#_tabs-tabla.
- Ayuntamiento de El Barraco. *Ayuntamiento de El Barraco* [en línea], [sin fecha]. [consulta: 22 mayo 2024]. Disponible en: <http://www.elbarraco.org/informacion/>.
- Barcelona: Población por municipios y sexo. (2861). *INE* [en línea], 2024. [consulta: 3 junio 2024]. Disponible en: <https://www.ine.es/jaxiT3/Datos.htm?t=2861>.
- Bioreactor de membrana MBR. *GEDAR - Tratamiento de Aguas* [en línea], 2024. [consulta: 19 marzo 2024]. Disponible en: <https://www.gedar.com/residuales/tratamiento-biologico-aerobio/bioreactor-membrana-mbr.htm>.
- BOELEEE, N.C., TEMMINK, H., JANSSEN, M., BUISMAN, C.J.N. y WIJFFELS, R.H., 2011. Nitrogen and phosphorus removal from municipal wastewater effluent using microalgal biofilms. *Water Research*, vol. 45, no. 18, ISSN 0043-1354. DOI 10.1016/j.watres.2011.08.044.
- BOLINCHES, A., 2023. Nueva directiva de aguas residuales: ¿Cómo afectará a nuestras depuradoras? *iAgua* [en línea]. [consulta: 4 marzo 2024]. Disponible en: <https://www.iagua.es/blogs/antonio-bolinches/nueva-directiva-aguas-residuales-como-afectara-nuestras-depuradoras-0>.
- BUER, T. y CUMIN, J., 2010. MBR module design and operation. *Desalination*, vol. 250, no. 3, ISSN 0011-9164. DOI 10.1016/j.desal.2009.09.111.
- Cálculo de variaciones del Índice de Precios de Consumo. *INE* [en línea], 2024. [consulta: 23 abril 2024]. Disponible en: <https://www.ine.es/varipc/verVariaciones.do?idmesini=1&anyoini=2011&idmesfin=3&anyofin=2024&ntipo=1&enviar=Calcular>.
- CÁRDENAS, C., PERRUOLO, T., TÁRRE, Y., FLORES, K., TRUJILLO, A. y SAULES, L., 2006. REMOCIÓN DE NUTRIENTES EN UN REACTOR DISCONTINUO SECUENCIAL. , vol. 31,

CARPENTER, S.R., CARACO, N.F., CORRELL, D.L., HOWARTH, R.W., SHARPLEY, A.N. y SMITH, V.H., 1998. Nonpoint Pollution of Surface Waters with Phosphorus and Nitrogen. *Ecological Applications*, vol. 8, no. 3, ISSN 1939-5582. DOI 10.1890/1051-0761(1998)008[0559:NPOSWW]2.0.CO;2.

Confederación Hidrográfica del Júcar - Servicio de Atención al Ciudadano - FAQ. [en línea], 2024. [consulta: 27 mayo 2024]. Disponible en: <https://www.chj.es/preguntaWeb/Pregunta/244>.

CRINI, G. y LICHTFOUSE, E., 2019. Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, vol. 17, no. 1, ISSN 1610-3661. DOI 10.1007/s10311-018-0785-9.

DAUTAN, R., PÉREZ, M.L., CONTRERAS, A., MARZANA, A. y RINCONES, B., 1988. DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN REACTOR DISCONTINUO SECUENCIAL PARA REMOCION DE DBO. ,

DE MIGUEL, E.O., FERRER MEDINA, Y., SALAS RODRÍGUEZ, J.J., ARAGÓN CRUZ, C. y REAL JIMÉNEZ, Á., 2010. *Manual para la implementación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones*. 2010. S.l.: s.n.

DÍAZ, F.J., O'GEEN, A.T. y DAHLGREN, R.A., 2012. Agricultural pollutant removal by constructed wetlands: Implications for water management and design. *Agricultural Water Management*, vol. 104, ISSN 0378-3774. DOI 10.1016/j.agwat.2011.12.012.

DZAKPASU, M., WANG, X., ZHENG, Y., GE, Y., XIONG, J. y ZHAO, Y., 2015. Characteristics of nitrogen and phosphorus removal by a surface-flow constructed wetland for polluted river water treatment. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, vol. 71, no. 6, ISSN 0273-1223. DOI 10.2166/wst.2015.049.

ECHEVERRÍA, I., SAAVEDRA, O., ESCALERA, R., HEREDIA, G. y MONTOYA, R., 2020. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTACTOR BIOLÓGICO ROTATORIO (CBR) PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES A ESCALA PILOTO. *Investigación & Desarrollo*, vol. 20, no. 1, ISSN 2518-4431.

El Consejo adopta su posición sobre nuevas normas para un tratamiento más eficiente de las aguas residuales urbanas. *Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico* [en línea], 2024. [consulta: 26 marzo 2024]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/2023/10/el-consejo-adopta-su-posicion-sobre-nuevas-normas-para-un-tratam.html>.

El Tribunal de Justicia de la UE multa a España por incumplir la directiva de saneamiento y depuración de aguas residuales. [en línea], 2024. [consulta: 4 marzo 2024]. Disponible en: <https://www.mapa.gob.es/en/prensa/ultimas-noticias/el-tribunal-de-justicia-de-la-ue-multa-a-espa%C3%B1a-por-incumplir-la-directiva-de-saneamiento-y-depuraci%C3%B3n-de-aguas-residuales/tcm:38-480500>.

EWING, T., BABAUTA, J.T., ATCI, E., TANG, N., ORELLANA, J., HEO, D. y BEYENAL, H., 2014. Self-powered wastewater treatment for the enhanced operation of a facultative lagoon. *Journal of Power Sources*, vol. 269, ISSN 0378-7753. DOI 10.1016/j.jpowsour.2014.06.114.

- FENU, A., ROELS, J., WAMBECQ, T., DE GUSSEM, K., THOEYE, C., DE GUELDRE, G. y VAN DE STEENE, B., 2010. Energy audit of a full scale MBR system. *Desalination*, vol. 262, no. 1, ISSN 0011-9164. DOI 10.1016/j.desal.2010.05.057.
- GAMEZ, M.J., 2024. Objetivos y metas de desarrollo sostenible. *Desarrollo Sostenible* [en línea]. [consulta: 4 marzo 2024]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>.
- GIL, J.A., TÚA, L., RUEDA, A., MONTAÑO, B., RODRÍGUEZ, M. y PRATS, D., 2010. Monitoring and analysis of the energy cost of an MBR. *Desalination*, vol. 250, no. 3, ISSN 0011-9164. DOI 10.1016/j.desal.2009.09.089.
- GODINI, K., AZARIAN, G., KIMIAEI, A., DRAGOI, E.N. y CURTEANU, S., 2021. Modeling of a real industrial wastewater treatment plant based on aerated lagoon using a neuro-evolutive technique. *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 148, ISSN 0957-5820. DOI 10.1016/j.psep.2020.09.057.
- GONZÁLEZ MARTÍNEZ, J. y MORENO MORA, P., 2009. Metodología y equipos para el control y la mejora de la eficiencia energética en EDAR urbanas. ,
- GREENWAY, M., 2005. The role of constructed wetlands in secondary effluent treatment and water reuse in subtropical and arid Australia. *Ecological Engineering*, vol. 25, no. 5, ISSN 0925-8574. DOI 10.1016/j.ecoleng.2005.07.008.
- GUADIE, A., XIA, S., ZHANG, Z., GUO, W., NGO, H.H. y HERMANOWICZ, S.W., 2013. Simultaneous removal of phosphorus and nitrogen from sewage using a novel combo system of fluidized bed reactor–membrane bioreactor (FBR–MBR). *Bioresource Technology*, vol. 149, ISSN 0960-8524. DOI 10.1016/j.biortech.2013.09.007.
- HAN, H., ZHANG, S., QIAO, J. y WANG, X., 2018. An intelligent detecting system for permeability prediction of MBR. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, vol. 77, no. 1-2, ISSN 0273-1223. DOI 10.2166/wst.2017.562.
- HASSARD, F., BIDDLE, J., CARTMELL, E., JEFFERSON, B., TYRREL, S. y STEPHENSON, T., 2015. Rotating biological contactors for wastewater treatment – A review. *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 94, ISSN 0957-5820. DOI 10.1016/j.psep.2014.07.003.
- HOPKINS, J.N.N., 2007. THE CLOACA MAXIMA AND THE MONUMENTAL MANIPULATION OF WATER IN ARCHAIC ROME. , no. 4,
- JIAN, W., 2010. Discussion of application on surface flow constructed wetlands for sewage treatment. *Journal of Anhui Institute of Architecture & Industry* [en línea], [consulta: 21 marzo 2024]. Disponible en: <https://consensus.app/papers/discussion-application-surface-flow-constructed-sewage-jian/b979a75db6a85a1dbab64b75fe6600ad/>.
- KADLEC, R.H., 1995. Overview: Surface flow constructed wetlands. *Water Science and Technology*, vol. 32, no. 3, ISSN 0273-1223. DOI 10.1016/0273-1223(95)00599-4.
- KJELDEN, P., BARLAZ, M.A., ROOKER, A.P., BAUN, A., LEDIN, A. y CHRISTENSEN, T.H., 2002. Present and Long-Term Composition of MSW Landfill Leachate: A Review. *Critical Reviews in*

Environmental Science and Technology, vol. 32, no. 4, ISSN 1064-3389. DOI 10.1080/10643380290813462.

La mejora en la depuración de aguas residuales urbanas rebaja a menos de un tercio el importe de la multa que España paga a la Comisión Europea. *Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico* [en línea], 2024. [consulta: 4 marzo 2024]. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/2022/09/la_mejora_en_la_depuraciondeaguasresidualesurbanasrebajaamenosde.html.

LAVRNIĆ, S., ALAGNA, V., IOVINO, M., ANCONELLI, S., SOLIMANDO, D. y TOSCANO, A., 2020. Hydrological and hydraulic behaviour of a surface flow constructed wetland treating agricultural drainage water in northern Italy. *Science of The Total Environment*, vol. 702, ISSN 0048-9697. DOI 10.1016/j.scitotenv.2019.134795.

LEE, H., HAN, J. y YUN, Z., 2009. Biological nitrogen and phosphorus removal in UCT-type MBR process. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, vol. 59, no. 11, ISSN 0273-1223. DOI 10.2166/wst.2009.242.

LI, D., ZHENG, B., LIU, Y., CHU, Z., HE, Y. y HUANG, M., 2018. Use of multiple water surface flow constructed wetlands for non-point source water pollution control. *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 102, no. 13, ISSN 1432-0614. DOI 10.1007/s00253-018-9011-8.

MAHVI, A., 2008. Sequencing batch reactor: A promising technology in wastewater treatment. *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering*, vol. 5,

MAYNARD, H.E., OUKI, S.K. y WILLIAMS, S.C., 1999. Tertiary lagoons: a review of removal mechanisms and performance. *Water Research*, vol. 33, no. 1, ISSN 0043-1354. DOI 10.1016/S0043-1354(98)00198-5.

MBA, D., BANNISTER, R.H. y FINDLAY, G.E., 1999. Mechanical redesign of the rotating biological contactor. *Water Research*, vol. 33, no. 18, ISSN 0043-1354. DOI 10.1016/S0043-1354(99)00086-X.

MCINTOSH, J.R., 2008. *The ancient Indus valley: new perspectives*. Santa Barbara (Calif.): ABC-CLIO. ABC-CLIO's understanding ancient civilizations, ISBN 978-1-57607-907-2.

MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO, 2024. Plan DSEAR. *Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico* [en línea]. [consulta: 26 marzo 2024]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/planificacion-hidrologica/planes-programas-relacionados.html>.

MUNOZ PAREDES, J. y RAMOS, R., 2014. Reactores discontinuos secuenciales: Una tecnología versátil en el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 24, DOI 10.18359/rcin.7.

NACIONES UNIDAS, 2021. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2021: el valor del agua. [en línea]. [consulta: 1 abril 2024]. Disponible en: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000378890>.

- NAGHIZADEH, A., MAHVI, A.H., MESDAGHINIA, A.R. y ALIMOHAMMADI, M., 2011. Application of MBR Technology in Municipal Wastewater Treatment. *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 36, no. 1, ISSN 2191-4281. DOI 10.1007/s13369-010-0007-7.
- ORAL, H.V., CARVALHO, P., GAJEWSKA, M., URSINO, N., MASI, F., HULLEBUSCH, E.D.V., KAZAK, J.K., EXPOSITO, A., CIPOLLETTA, G., ANDERSEN, T.R., FINGER, D.C., SIMPERLER, L., REGELSBERGER, M., ROUS, V., RADINJA, M., BUTTIGLIERI, G., KRZEMINSKI, P., RIZZO, A., DEGHANIAN, K., NIKOLOVA, M. y ZIMMERMANN, M., 2020. A review of nature-based solutions for urban water management in European circular cities: a critical assessment based on case studies and literature. *Blue-Green Systems*, vol. 2, no. 1, ISSN 2617-4782. DOI 10.2166/bgs.2020.932.
- PATWARDHAN, A.W., 2003. Rotating Biological Contactors: A Review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 42, no. 10, ISSN 0888-5885. DOI 10.1021/ie0200104.
- PLANELLES, M., 2018. La justicia europea impone multas semestrales a España para que depure sus aguas urbanas. *El País* [en línea]. Madrid, 25 julio 2018. [consulta: 1 abril 2024]. ISSN 1134-6582. Disponible en: https://elpais.com/politica/2018/07/25/actualidad/1532508768_001001.html.
- PORTER, D., 2001. The Great Stink of London: Sir Joseph Bazalgette and the Cleansing of the Victorian Metropolis (review). *Victorian Studies*, vol. 43, DOI 10.1353/vic.2001.0074.
- RAMIREZ, J., 2021a. *Apuntes de la asignatura de Sistemas de depuración, tratamiento de aguas— Tema 1 Aguas residuales, tipología y características. Universidad Europea de Madrid.* 2021a. S.l.: s.n.
- RAMIREZ, J., 2021b. *Apuntes de la asignatura de Sistemas de depuración, tratamiento de aguas— Tema 6 Cálculo de una EDAR. Universidad Europea de Madrid.* 2021b. S.l.: s.n.
- SMITH, V.H., 2003. Eutrophication of freshwater and coastal marine ecosystems a global problem. *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 10, no. 2, ISSN 0944-1344, 1614-7499. DOI 10.1065/espr2002.12.142.
- STEINMANN, C.R., WEINHART, S. y MELZER, A., 2003. A combined system of lagoon and constructed wetland for an effective wastewater treatment. *Water Research*, vol. 37, no. 9, ISSN 0043-1354. DOI 10.1016/S0043-1354(02)00441-4.
- SUN, F., WANG, X. y LI, X., 2013. An innovative membrane bioreactor (MBR) system for simultaneous nitrogen and phosphorus removal. *Process Biochemistry*, vol. 48, DOI 10.1016/j.procbio.2013.08.009.
- TCHOBANOGLIOUS, G., BURTON, F.L., STENSEL, H.D. y INC, M.& E., 2003. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. S.l.: McGraw-Hill Education. ISBN 978-0-07-041878-3.
- TEAMCONCEPT, 2021. Lixiviados: soluciones eficaces para el medio ambiente y tratamientos propuestos por SIGMA. *Agua SIGMA* [en línea]. [consulta: 6 marzo 2024]. Disponible en: <https://aguasigma.com/es/articulos-tecnicos/tratamiento-de-lixiviados-en-vertederos>.
- Urban wastewater - European Commission. [en línea], 2024. [consulta: 4 marzo 2024]. Disponible en: https://environment.ec.europa.eu/topics/water/urban-wastewater_en.

- VALDIVIELSO, A., 2020. ¿Qué Es Una Edar? *iAgua* [en línea]. [consulta: 4 marzo 2024]. Disponible en: <https://www.iagua.es/respuestas/estacion-depuradora-aguas-residuales>.
- VAN DE MOORTELE, A.M.K., ROUSSEAU, D.P.L., TACK, F.M.G. y DE PAUW, N., 2009. A comparative study of surface and subsurface flow constructed wetlands for treatment of combined sewer overflows: A greenhouse experiment. *Ecological Engineering*, vol. 35, no. 2, ISSN 0925-8574. DOI 10.1016/j.ecoleng.2008.08.015.
- VENDRAMELLI, R.A., VIJAY, S. y YUAN, Q., 2016. Phosphorus Removal Mechanisms in a Facultative Wastewater Stabilization Pond. *Water, Air, & Soil Pollution*, vol. 227, no. 11, ISSN 1573-2932. DOI 10.1007/s11270-016-3130-6.
- Vigilancia microbiológica en aguas residuales y aguas de baño como indicador epidemiológico para un sistema de alerta temprana para la detección precoz de SARS-CoV-2 en España. *Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico* [en línea], 2022. [consulta: 4 abril 2024]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/concesiones-y-autorizaciones/vertidos-de-aguas-residuales/alerta-temprana-covid19.html>.
- VYMAZAL, J., 2005. Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. *Ecological Engineering*, vol. 25, no. 5, ISSN 0925-8574. DOI 10.1016/j.ecoleng.2005.07.010.
- VYMAZAL, J., 2009. The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. *Ecological Engineering*, vol. 35, no. 1, ISSN 0925-8574. DOI 10.1016/j.ecoleng.2008.08.016.
- VYMAZAL, J., 2011. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Five Decades of Experience. *Environmental Science & Technology*, vol. 45, no. 1, ISSN 0013-936X. DOI 10.1021/es101403q.
- WAQAS, S. y BILAD, M.R., 2019. A Review on Rotating Biological Contactors. *Indonesian Journal of Science and Technology*, vol. 4, no. 2, ISSN 2527-8045.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION, W.H.O., 2024. Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater Volume 4 Excreta and greywater use in agriculture. [en línea]. [consulta: 4 marzo 2024]. Disponible en: <https://www.who.int/publications-detail-redirect/9241546859>.
- ZHANG, X.L., YAN, S., TYAGI, R.D. y SURAMPALLI, R.Y., 2013. Odor control in lagoons. *Journal of Environmental Management*, vol. 124, ISSN 0301-4797. DOI 10.1016/j.jenvman.2013.03.022.