



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos,
Canales y Puertos

EVALUACIÓN DE LOS RIESGOS DE UN SISTEMA DE
MICROALGAS PARA LA REUTILIZACIÓN DE LAS
AGUAS TRATADAS PARA RIEGO AGRÍCOLA

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Ambiental

AUTOR/A: Hernández Cuenca, Silvia

Tutor/a: Pachés Giner, María Aguas Vivas

Cotutor/a externo: GONZALEZ CAMEJO, JOSUE

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos,
Canales y Puertos

EVALUACIÓN DE LOS RIESGOS DE UN SISTEMA DE
MICROALGAS PARA LA REUTILIZACIÓN DE LAS
AGUAS TRATADAS PARA RIEGO AGRÍCOLA

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Ambiental

Autora: Hernández Cuenca, Silvia

Tutora: Pachés Giner, María Aguas Vivas

Cotutor externo: González Camejo, Josué

Curso académico: 2023-2024

ÍNDICE DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	Estado del arte.....	1
1.2.	Normativa aplicable.....	4
1.3.	Contaminantes del agua residual urbana.....	9
1.3.1.	Riesgos asociados a los contaminantes del agua residual urbana.....	14
1.4.	Plan de Gestión del Riesgo	15
1.4.1.	Guía Técnica del Centro Común de Investigación para la Gestión de Riesgos de Reutilización del Agua en Riego Agrícola en Europa	17
1.4.1.1.	Módulo I. El sistema de reutilización del agua (elementos nº 1 y nº2)	17
1.4.1.2.	Módulo II. Evaluación de Riesgos (elementos nº3, nº4, nº5, nº6 y nº7)	18
1.4.1.3.	Módulo III. Monitoreo (elementos nº 8 y nº9).....	21
1.4.1.4.	Módulo IV. Gestión y Comunicación (elementos nº 10 y nº 11)	21
1.4.2.	Evaluación del riesgo	22
1.4.2.1.	Análisis Cuantitativo del Riesgo Microbiológico (QMRA).....	22
1.4.2.2.	Análisis de riesgos cualitativo o semicuantitativo según la norma UNE-EN 15975	25
1.5.	Tratamientos basados en microalgas.....	26
2.	OBJETIVOS	28
3.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	29
3.1.	Metodología	29
3.1.1.	Alcance del Plan de Gestión del Riesgo.....	29
3.1.2.	Módulo I. El Sistema de Reutilización	29
3.1.2.1.	Descripción del Sistema.....	29
3.1.2.2.	Identificación de las partes que intervienen en el Sistema.....	30
3.1.3.	Módulo II. Evaluación de Riesgos	30
3.1.3.1.	Identificación de peligros y eventos peligrosos.....	30
3.1.3.2.	Identificación de entornos, grupos y rutas de exposición.....	30
3.1.3.3.	Evaluación de riesgos.....	31
3.1.3.4.	Requisitos adicionales	37
3.1.3.5.	Identificación de medidas.....	37
3.1.4.	Módulo III. Monitoreo	37



3.1.4.1.	Procedimientos y sistemas de control	37
3.1.4.2.	Sistemas de control medioambiental	38
3.1.5.	Módulo IV. Coordinación y Gestión.....	38
3.2.	Caso de estudio	40
3.3.	Estudios previos.....	42
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
4.1.	Módulo I. El Sistema de Reutilización	46
4.1.1.	Descripción del Sistema de Reutilización	47
4.1.2.	Caracterización del agua residual influente y efluente	49
4.1.2.1.	Agentes patógenos	49
4.1.2.2.	Parámetros físico químicos.....	50
4.2.	Módulo II. Evaluación de Riesgos	50
4.2.1.	Identificación de peligros y rutas de exposición	50
4.2.1.1.	Identificación de peligros.....	50
4.2.1.2.	Grupos y rutas de exposición	57
4.2.2.	Elección del método de análisis	57
4.2.3.	Análisis QMRA de agentes patógenos.....	58
4.2.4.	Análisis semicuantitativo de parámetros físico químicos	62
4.2.4.1.	Probabilidad de presencia y exposición	62
4.2.4.2.	Gravedad de las consecuencias	67
4.2.4.3.	Evaluación del riesgo	68
4.2.5.	Propuesta de medidas	73
4.3.	Módulo III. Monitoreo	78
4.3.1.	Procedimiento y sistema de control.....	78
5.	CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS	79
5.1.	Conclusiones.....	79
5.2.	Limitaciones y futuros estudios.....	80
6.	AGRADECIMIENTOS.....	81
7.	REFERENCIAS	81
	ANEXO I. CÁLCULOS COMPLETOS.....	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estrés hídrico en Europa	1
Figura 2. Elementos clave de la gestión del riesgo	16
Figura 3. Etapas del análisis QMRA	24
Figura 4. Esquema resumen de la metodología aplicada al caso de estudio	39
Figura 5. Diagrama de bloques del proceso en la EDAR Cuenca del Carraixet	40
Figura 6. Diagrama de bloques del caso de estudio	41
Figura 7. Diagrama de bloques del sistema de reutilización del Plan de Gestión del Riesgo	42
Figura 8. Sistema de reutilización de agua objeto del Plan de Gestión del Riesgo	47
Figura 9. Diagrama de flujo del sistema	47
Figura 10. Imagen real del sistema de microalgas (reactor)	48
Figura 11. Imagen genérica del acoplamiento al sistema de microalgas (tanques de membranas de UF)	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Requisitos de calidad de las aguas regeneradas para riego agrícola	5
Tabla 2. Frecuencias mínimas del control rutinario de las aguas regeneradas para riego agrícola	6
Tabla 3. Controles de validación de las aguas regeneradas para riego agrícola	6
Tabla 4. Criterios de las aguas regeneradas para riego agrícola según la normativa española	8
Tabla 5. Frecuencias mínimas de análisis de las aguas regeneradas para uso agrario	8
Tabla 6. Características medias del agua residual española	13
Tabla 7. Valores de referencia basado en efectos para la salud en aguas de consumo humano	14
Tabla 8. Matriz 3x3 de apreciación de riesgos cualitativo	25
Tabla 9. Matriz 5x5 de apreciación de riesgos semicuantitativo	26
Tabla 10. Valores de los parámetros que alimentan al modelo dosis respuesta	32
Tabla 11. Volúmenes de exposición según la ruta	32

Tabla 12. Parámetros bibliográficos para caracterizar el riesgo de los agentes patógenos	33
Tabla 13. Grado de verdad de la probabilidad combinada del riesgo	34
Tabla 14. Grado de verdad de la probabilidad combinada del riesgo	35
Tabla 15. Matriz de riesgos adaptada al caso de estudio	36
Tabla 16. Matriz de riesgos para los tres niveles establecidos	36
Tabla 17. Caracterización del afluente al sistema de microalgas.....	43
Tabla 18. Caracterización del efluente tras la MF	43
Tabla 19. Caracterización de metales pesados	44
Tabla 20. Recuento de E.Coli en UFC/100mL en planta piloto de membranas de UF y MD de la EDAR Cuenca del Carraixet	45
Tabla 21. Detección de Salmonella spp en planta piloto de membranas de UF y MD de la EDAR Cuenca del Carraixet.....	45
Tabla 22. Recuento de huevos de helminto en planta piloto de membranas de UF y MD de la EDAR Cuenca del Carraixet expresado en huevos/L.....	45
Tabla 23. Recuento de colífagos somáticos en planta piloto de membranas de UF y AnMBR de la EDAR Cuenca del Carraixet expresado en UFP/mL	46
Tabla 24. Recuento de esporas de Clostridium perfringens en planta piloto de membranas de UF y AnMBR de la EDAR Cuenca del Carraixet expresado en UFC/100mL	46
Tabla 25. Caracterización de agentes patógenos del influente y efluente del sistema.	49
Tabla 26. Caracterización físico-química del influente y efluente del sistema	50
Tabla 27. Identificación de agentes peligrosos	51
Tabla 28. Identificación de agentes peligrosos a evaluar cuantitativa o semi-cuantitativamente	53
Tabla 29. Grupos y rutas de exposición para el caso de estudio	57
Tabla 30. Modo de evaluación de los potenciales peligros.....	58
Tabla 31. Decisión de parámetros bibliográficos a utilizar	58
Tabla 32. Riesgo promedio obtenido para E. coli con membranas de UF en cada ruta de exposición evaluada	59
Tabla 33. Riesgo promedio obtenido para E. coli con MD en cada ruta de exposición evaluada	60

Tabla 34. Riesgo promedio obtenido para colifagos somáticos con membranas de UF en cada ruta de exposición evaluada	61
Tabla 35. Riesgo promedio obtenido para colifagos somáticos con AnMBR en cada ruta de exposición evaluada	61
Tabla 36. Riesgo promedio obtenido para esporas de Clostridium perfringens con AnMBR en cada ruta de exposición evaluada	62
Tabla 37. Probabilidad de presencia asignada a los parámetros físico-químicos evaluados	63
Tabla 38. Probabilidad de exposición asignada a los parámetros físico-químicos evaluados en cada una de las rutas.....	64
Tabla 39. Probabilidad combinada resultante para cada uno de los parámetros físico-químicos evaluados en cada una de las rutas	65
Tabla 40. Nivel de gravedad de consecuencias para la salud humana de los parámetros físico-químicos (excepto metales).....	67
Tabla 41. Nivel de gravedad de consecuencias para la salud humana de los metales..	68
Tabla 42. Nivel de riesgo asociado al N-NH4.....	68
Tabla 43. Nivel de riesgo asociado al N-NO3.....	69
Tabla 44. Nivel de riesgo asociado al P-PO4.....	69
Tabla 45. Nivel de riesgo asociado a la conductividad	70
Tabla 46. Nivel de riesgo asociado a la turbidez	70
Tabla 47. Nivel de riesgo asociado a los microplásticos.....	71
Tabla 48. Nivel de riesgo asociado a los metales	71
Tabla 49. Valores de concentración de colifagos y E. coli para el cálculo QMRA	76
Tabla 50. Cálculo del riesgo residual con análisis QMRA	76
Tabla 51. Concentraciones y log reducción para los cuales el uso de agua regenerada es seguro	77
Tabla 52. Comprobación QMRA de riesgos aceptables	77

RESUMEN

En la actualidad la gestión de recursos y la economía circular desempeña un papel fundamental. En este contexto, el tratamiento de aguas residuales y la reutilización de las mismas se ha vuelto esencial, con el fin de alcanzar la sostenibilidad ambiental. Al mismo tiempo, la normativa relacionada con la gestión de recursos hídricos se vuelve cada vez más exigente, para lograr la reutilización segura de las aguas en materia de salud humana, animales y medio ambiente. Tanto es así que con el nuevo Reglamento (UE) 2020/741 se establece la obligatoriedad de redactar un Plan de Gestión del Riesgo de las aguas regeneradas en cualquier sistema de reutilización.

Se considera que el agua está contaminada cuando su estado natural se ve modificado y pierde su aptitud para los usos para los que estaba destinada. El agua contaminada presenta alteraciones que pueden ser físicas (color, densidad, temperatura, etc.), químicas o biológicas. No obstante, que el agua esté contaminada no conlleva necesariamente que existan riesgos para la salud, animales o medio ambiente. Por tanto, es necesario para maximizar la reutilización y que sea segura al mismo tiempo proporcionar una comprensión completa de los posibles peligros involucrados en cada sistema de reutilización, siguiendo indicaciones de organizaciones especialistas, como la Organización Mundial de la Salud (OMS).

La integración de un tratamiento con cultivo de microalgas en las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDARs) se presenta como una alternativa de interés en relación a las tecnologías sostenibles, debido a la obtención de un agua de calidad capaz de ser reutilizada para combatir el problema de escasez de agua, a la vez que se obtiene un producto de la biomasa. Para considerarse una alternativa viable, es necesario asegurar que las aguas regeneradas no conllevan riesgos para la salud humana, entre otros. En relación al caso de estudio que se presenta, el tratamiento de agua se basa en un cultivo de microalgas combinado con un tratamiento convencional de fango activado, con el objetivo de maximizar la producción de agua regenerada, recuperación de nutrientes y minimización de la contaminación ambiental, dentro del marco del proyecto MSCA-“MicroAlgae 4.0” (101067621).

Así, este Trabajo Fin de Máster surge con el objetivo de estudiar la viabilidad técnica y legal que tiene un agua tratada mediante un sistema de microalgas para su reutilización para riego agrícola, mediante la realización de un Plan de Gestión del Riesgo en consonancia con la reciente normativa existente. El principal objetivo es evaluar el riesgo para la salud humana que tendría utilizar un agua tratada mediante un sistema de microalgas para su reutilización para riego agrícola, planteando un caso de estudio hipotético, utilizando datos experimentales de estudios previos.

La evaluación de riesgos, como parte principal del estudio, se realiza con metodologías fiables y contrastadas (estándar) como lo son el análisis QMRA (Quantitative Microbiological Risk Assessment) y la norma UNE-EN-15975-2, de gestión del riesgo. Los resultados muestran riesgos aceptables en la mayoría de potenciales peligros estudiados, excepto para N-NO₃, microplásticos y colífagos somáticos, para los cuales se proponen medidas que los mitiguen.

ABSTRACT

Currently, sustainable resource management and circular economy play a key role in the transformation of economic activities. In this context, the treatment of wastewater and its reuse has become essential to achieve environmental sustainability. At the same time, legislation related to water management is becoming increasingly stringent to ensure the safe reuse of water concerning human health, animals, and the environment. In this respect, with the new Regulation (EU) 2020/741, it is mandatory to draft a Risk Management Plan for reclaimed water in any reuse system.

Water is considered contaminated when is altered and loses its suitability for its intended uses. Contaminated water exhibits alterations that can be physical (color, density, temperature, etc.), chemical, or biological. However, the fact of water being contaminated does not necessarily mean there are risks to human health, animals, and/or the environment. To maximize reusability and ensure safety at the same time, it is necessary to provide a comprehensive understanding of the potential hazards involved in each specific reuse system, following guidance from specialized organizations such as the World Health Organization (WHO).

The integration of microalgae cultivation in Wastewater Treatment Plants (WWTPs) is presented as an interesting alternative concerning sustainable technologies due to the production of quality water capable of being reused to combat water scarcity, while obtaining valuable biomass. To be considered a viable alternative, it is necessary to ensure that reclaimed water does not pose risks to human health, among other factors. In the case study presented, the water treatment is based on a microalgae cultivation combined with a conventional activated sludge treatment, aiming to maximize reclaimed water production, nutrient recovery, and minimize environmental pollution, within the framework of the MSCA- "MicroAlgae 4.0" project (101067621).

Thus, this Master Thesis aims to study the technical and legal feasibility of water treated by a microalgae system for its reuse in agricultural irrigation, through the development of a Risk Management Plan in accordance with recent regulations. From a scientific point of view, the main objective of this Master Thesis is to evaluate the risk to human health of using water treated by a microalgae system for its reuse in agricultural irrigation, presenting a hypothetical case study, utilizing experimental data from previous studies.

Risk assessment, as a central part of the study, is conducted using reliable and established methodologies such as Quantitative Microbiological Risk Assessment (QMRA) and standard UNE-EN-15975-2 for risk management. The results show acceptable risks for most of the potential hazards studied, except for N-NO₃, microplastics, and somatic coliphages, for which measures are proposed to mitigate them.

RESUM

En l'actualitat la gestió de recursos i l'economia circular juguen un paper fonamental. En aquest context, el tractament d'aigües residuals i la seua reutilització s'ha tornat essencial per tal d'assolir la sostenibilitat ambiental. Però al mateix temps, la normativa relacionada amb la gestió de recursos hídrics es fa cada vegada més exigent per aconseguir la reutilització segura de les aigües en matèria de salut humana, animal i medi ambiental. Tant és així que el nou Reglament (UE) 2020/741 estableix l'obligatorietat de redactar un Pla de Gestió del Risc de les aigües regenerades en qualsevol sistema de reutilització.

Es considera que l'aigua està contaminada quan el seu estat natural es modifica i no pot ser utilitzada per als fins per als quals estava destinada. L'aigua contaminada presenta alteracions que poden ser físiques (color, densitat, temperatura, etc.), químiques o biològiques. No obstant això, que l'aigua estiga contaminada no implica necessàriament que existisquen riscos per a la salut humana, els animals o el medi ambient. Per tant, per a maximitzar la reutilització i que siga segura al mateix temps és necessari conèixer amb detall els possibles perills que comporten cada sistema de reutilització d'aigües, seguint indicacions d'organitzacions especialistes, com l'Organització Mundial de la Salut (OMS).

La integració d'un tractament amb cultiu de microalgues en les Estacions Depuradores d'Aigües Residuals (EDARs) es presenta com una alternativa d'interés en relació a les tecnologies sostenibles. Aquest sistema permet l'obtenció d'una aigua de qualitat al mateix temps que és reutilitzada per combatre el problema d'escassetat d'aigua y s'obté un producte de la biomassa. Per a considerar-se una alternativa viable, és necessari assegurar que les aigües regenerades no comporten riscos per a la salut humana, entre altres. En aquest Treball Fi de Màster s'analitza el esmenat sistema. En concret, el tractament d'aigua es basa en un cultiu de microalgues combinat amb un tractament convencional de fang actiu, amb l'objectiu de maximitzar la producció d'aigua regenerada i la recuperació de nutrients i minimitzar la contaminació ambiental, dins del marc del projecte MSCA-"MicroAlgae 4.0" (101067621).

Més específicament, aquest Treball Fi de Màster sorgeix amb l'objectiu d'estudiar la viabilitat tècnica i legal que té un aigua tractada mitjançant un sistema de microalgues per a la seua reutilització per al regadiu agrícola. Per això es proposa un Pla de Gestió del Risc en consonància amb la recent normativa aprovada. Aquest plan ens permet avaluar el risc que suposaria per a la salut humana que tindria utilitzar un aigua tractada mitjançant un sistema de microalgues per a la seua reutilització per al regadiu agrícola. Per fer aquest avaluació es planteja un cas d'estudi hipotètic, utilitzant dades experimentals d'estudis previs.

L'avaluació de riscos, com a part principal de l'estudi, es realitza amb metodologies fiables i contrastades (estàndard) com ho són l'anàlisi QMRA (Quantitative Microbiological Risk Assessment) i la norma UNE-EN-15975-2, de gestió del risc. Els resultats mostren riscos acceptables en la majoria dels potencials perills estudiats, excepte per a N-NO₃, microplàstics i colífags somàtics, per als quals es proposen mesures que els mitiguen.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Estado del arte

En la actualidad, nos enfrentamos a un desequilibrio en el sistema de gestión del agua, dado que la cantidad de agua generada por las precipitaciones es insuficiente para satisfacer la demanda de consumo en muchas regiones (Tzanakakis et al., 2020). Esta disparidad conlleva una escasez de agua disponible para uso humano. De hecho, de todas las reservas de agua en el planeta, únicamente el 2.5% es agua dulce, y de esta, el 70% se encuentra en forma de glaciares, nieve o hielo. Por consiguiente, esto supone que solo el 0.77% del agua está al alcance de las actividades humanas (Agua.org.mx, 2024).

A este hecho se suma el crecimiento de la población, aumento del nivel de vida, rápida urbanización, cambio climático, desertificación, cambios en los patrones de consumo y aumento de las tierras de regadío y que, por tanto, la demanda de recursos hídricos aumenta (Gharib et al., 2023). Desde hace ya años nos encontramos ante un estrés hídrico que, además, está siendo acrecentado por el cambio climático, con sequías y patrones meteorológicos difíciles de predecir.

Un método ampliamente utilizado para medir la escasez de agua es el índice de estrés hídrico. Este se define como el ratio entre la cantidad demandada de agua promedio que se extrae anualmente, y la disponibilidad del recurso a largo plazo (Pedro-Monzónis et al., 2015). Valores hasta 0.2 se considera un estrés hídrico bajo, entre 0.2 y 0.4 estrés hídrico medio, y un valor mayor que 0.4 implica estrés hídrico severo (Climate Adapt, s.f.).

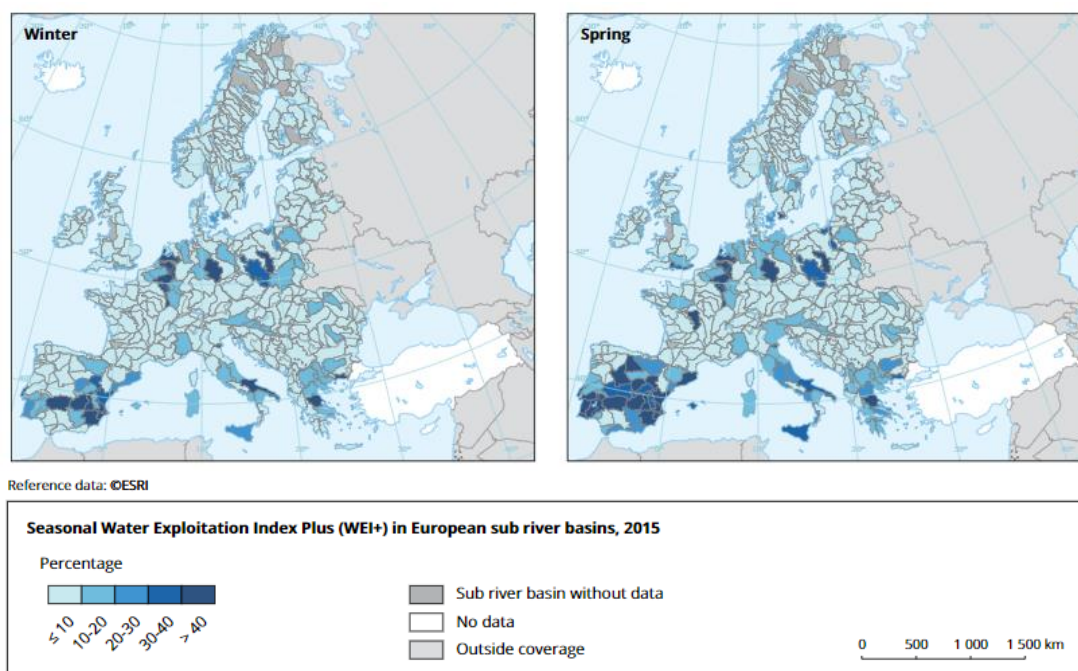


Figura 1
Estrés hídrico en Europa

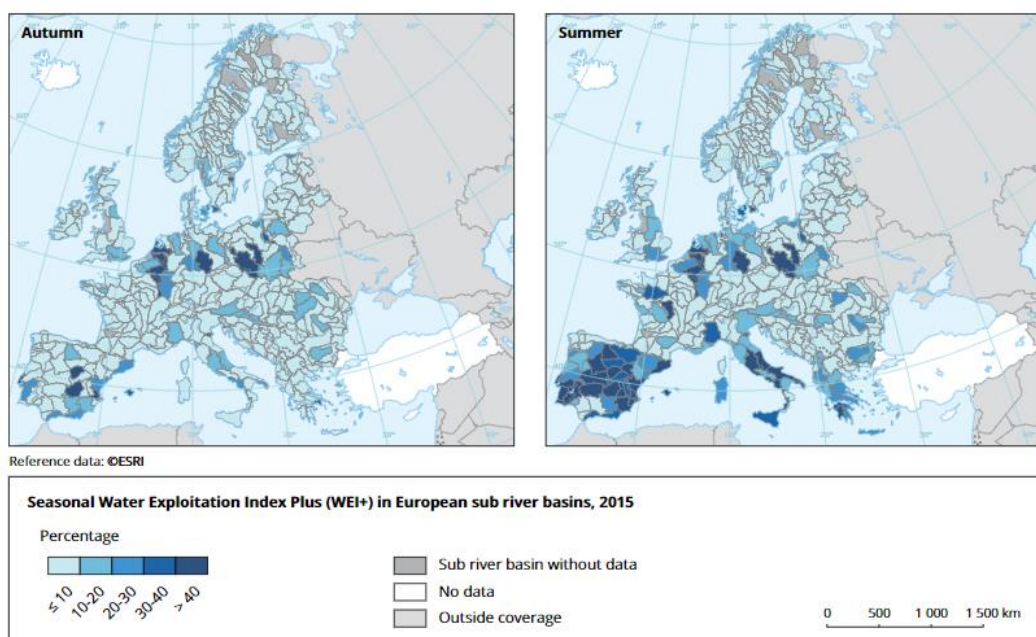


Figura 1

Estrés hídrico en Europa

Nota. Tomado de European Environment Agency [EEA] (2021)

España, ya en 2017, se encontraba entre uno de los países europeos con más estrés hídrico, con valores en torno al 30% (EEA, 2021). La situación en Europa no es mucho mejor y, se prevé que las cuencas fluviales de la Unión Europea se vean afectadas por la escasez de agua en los próximos años, lo cual puede suponer agotamiento de acuíferos, salinización de aguas subterráneas, aumento de la erosión y disminución de la biodiversidad en aguas naturales (Foglia et al., 2023; Jodar-Abellan et al., 2019; Ofori et al., 2021).

Con el fin de mejorar la situación, la tendencia para la gestión de recursos hídricos está basada en preservar las fuentes de mayor calidad para el suministro de agua potable y fuentes alternativas para usos con menores riesgos sanitarios, tales como el riego, uso industrial y para uso potable indirecto como recarga de acuíferos (Asano et al., 2007). Así, la European Environment Agency (EEA) en su informe nº 12/2021 de Recursos Hídricos en Europa propone medidas para enfrentar el estrés hídrico.

Entre estas medidas necesarias para paliar la sequía está el reducir la demanda de agua con reducción de las pérdidas en el sistema de suministro o durante el uso, crear conciencia, introducir tecnologías más eficientes en el uso del agua, almacenar agua durante periodos de abundancia en embalses superficiales o acuíferos y derivar agua desde lugares con abundancia hasta lugares con escasez, priorizar la asignación de agua, reutilizar las aguas residuales, desalar agua salobre, etc. (EEA, 2021).

Asimismo, en la Agenda 2030 en su Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 (ODS 6) “Agua limpia y saneamiento” se habla de garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos, pues la falta de agua potable o de mala calidad tiene consecuencias en la seguridad alimentaria, y en su ODS 14 menciona la importancia de conservar y utilizar de forma sostenible los recursos marinos (Ministerio

de Derechos Sociales y Agenda 2030, 2021). Entonces, es fundamental la gestión sostenible de los recursos hídricos en el mundo.

Entra en juego, entonces, la reutilización de aguas como una importante alternativa para hacer frente a la escasez de agua y contribuir a su vez a alcanzar varios de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. La recuperación de aguas se entiende como el proceso de convertir aguas residuales en aguas que pueden ser utilizadas para otros fines como riego de jardines, cultivos, recarga de aguas subterráneas, etc., estando prohibidos otros usos como el consumo humano, aguas de proceso en industria alimentaria, etc.

Sin embargo, para poder reutilizar las aguas, estas deben cumplir con los requisitos establecidos en la normativa, para lo cual es necesario su tratamiento y depuración. Es por ello que las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (en adelante, EDARs) son de suma importancia. Las EDARs son instalaciones donde se tratan y purifican las aguas que han sido “contaminadas” en hogares, industrias u otras actividades. Hasta hace relativamente pocos años, las EDARs estaban pensadas para eliminar parcial o totalmente los contaminantes de las aguas y que no conllevara un riesgo ambiental, liberando el agua ya tratada de nuevo al medio.

No obstante, a medida que pasa el tiempo, se piensa más en estas instalaciones como Estaciones de Recuperación de Recursos de las Aguas (WRRF), donde no solo se pretende evitar el impacto ambiental, sino recuperar, no solo el propio agua sino los nutrientes valiosos a los que llamábamos “contaminantes”. Este concepto nace en un contexto de desarrollo de economía circular, donde es fundamental que el tratamiento de aguas residuales evolucione hacia alternativas sostenibles que posibiliten la recuperación de recursos como energía, nutrientes, agua regenerada, biosólidos, etc. La recuperación del agua como recurso está muy ligada a la reutilización de las aguas.

A lo largo de los años ha ido aumentando el nivel de reutilización de aguas depuradas. Por ejemplo, en el año 2006 se reutilizaron un 2.4% de aguas respecto al efluente total en depuración en Europa (Mediterranean Wastewater Reuse Working Group, 2007). En los países del norte la reutilización de agua se basa en usos de aplicación industrial, mientras que en el sur de Europa las aplicaciones agrícolas son las dominantes en la reutilización (Chfadi et al., 2021). Concretamente, España e Italia fueron los dos países con mayor volumen reutilizado, con alrededor del 5 al 12 % del efluente total y siendo el principal uso el riego agrícola (Mediterranean Wastewater Reuse Working Group, 2007).

En varias zonas de España, en la actualidad, se reutiliza el agua para la agricultura, sobre todo en la zona de costa mediterránea (en Murcia un 86% y en la Comunidad Valenciana un 94%) y en las islas (las Islas Baleares reutilizan un 57% del agua tratada) (INE, 2020). Aun así, esta práctica se emplea muy por debajo de su potencial, puesto que se estima que las aguas residuales reutilizadas podrían incrementarse hasta 6 veces (European Regional Development Fund, 2020).

Existen numerosas alternativas de tratamiento para poder llevar a cabo la reutilización de las aguas en una EDAR, donde las tecnologías deben ser capaces de alcanzar los requisitos de la calidad del agua efluente, que distan mucho de los de vertido a cauce.

De hecho, en la actualidad, se opta por tecnologías sostenibles basadas en procedimientos naturales de depuración que minimicen el uso de aditivos químicos y que eliminan los contaminantes usando vegetación acuática, el suelo y microorganismos (Morató-Farreras et al., 2006). Es necesario buscar estas alternativas sostenibles para alcanzar los nuevos objetivos marcados por la Directiva sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas: hacer que el sector de las aguas residuales sea neutro desde el punto de vista energético, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en más de un 60% para 2040 respecto a 1990, etc.

Entre las distintas tecnologías se encuentran los humedales, biorreactores de membranas, cultivos de microalgas, etc. Concretamente y como se desarrollará más adelante (ver apartado *Tratamientos basados en microalgas*), el interés de este estudio se centra en la reutilización de las aguas para uso agrícola tras un tratamiento de cultivo de microalgas. Se escoge esta tecnología puesto que se plantea como una alternativa viable debido a que el agua influente de las EDARs se puede aprovechar como fuente de alimento de las microalgas, recuperando los nutrientes y maximizando la producción de agua regenerada, dentro de un enfoque sostenible en línea con los principios de economía circular y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

1.2. Normativa aplicable

A lo largo de la historia reciente, las normas comunitarias relacionadas con la depuración de aguas residuales han progresado. La primera norma que surge, a pesar de haberse dictado con anterioridad otras directivas que incidían sobre la materia de forma indirecta, es la Directiva 91/271/CEE, relativa al tratamiento de las aguas residuales urbanas. En ella, se propone como objetivo la protección del medio ambiente frente a los efectos negativos de los vertidos de las aguas residuales, regulando su recogida, tratamiento y vertido, y estableciendo límites para ciertos parámetros (DQO, DBO₅, SST, P_T y N_T). De hecho, dedica parte de su atención a adoptar medidas especiales según el medio receptor, denominando las zonas sensibles. Esta Directiva queda transpuesta a la normativa española por el RD Ley 11/1995, el RD 509/1996, que lo desarrolla, y el RD 2116/1998 que modifica el anterior, y posteriormente queda modificada por la Directiva 98/15/CE.

Pocos años después aparece la Directiva 2000/60/CE, más conocida como Directiva Marco del Agua, como respuesta a la necesidad de unificar las actuaciones en materia de aguas en la Unión Europea. Esta norma establece la importancia de una gestión planificada para prever un uso racional del recurso hídrico y el control de los vertidos, protegiendo las aguas tanto en términos cualitativos como cuantitativos planteando unos objetivos de calidad, así como garantizar la sostenibilidad.

Por su parte, la reutilización de agua en España tiene sus orígenes jurídicos en la Ley 29/1985, de aguas, derogada por el Real Decreto Legislativo 1/2001, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas. Aun así, la reutilización del agua tenía un papel secundario en España, hasta la llegada del Plan Hidrológico Nacional por la Ley 11/2005. Actualmente, la ley en vigor en cuestiones de reutilización en España es la ley 1620/2007.

En el año 2020, y paralelamente a la escasez de recursos hídricos y el aumento de demanda, se publica una normativa europea, en concreto el Reglamento (UE) 2020/741 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de mayo de 2020, relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del agua. Este Reglamento surge con el objetivo de unificar los criterios mínimos de calidad y control del agua en la Unión Europea y asegurar una utilización de las aguas regeneradas sin riesgos para la salud y el medio ambiente, promoviendo la reutilización y la economía circular para hacer frente a la escasez de agua.

Esta nueva normativa establece cambios relacionados con los permisos, procedimientos, competencias, basándose sobre todo en el uso en agricultura de las aguas regeneradas, que son las aguas depuradas sometidas a un proceso de tratamiento adicional que permite adaptar su calidad al uso al que se destinan (Ministerio de Sanidad, s.f.). Asimismo, dicho Reglamento (UE) 2020/741 introduce la necesidad de elaboración de Plan de Gestión del Riesgo de Aguas Regeneradas para Riego Agrícola, y así garantizar la seguridad ambiental y sanitaria cuando se aplica agua regenerada a las tierras de cultivo.

En el Reglamento (UE) 2020/741 se exigen unos requisitos mínimos de la calidad del agua regenerada en función del riego y de la categoría de cultivo. Así, se diferencian cuatro tipos de calidades de las aguas regeneradas (A, B, C y D), siendo la de más alta calidad la primera de ellas, que puede ser utilizada para todos los cultivos de alimentos que se consumen crudos en los que la parte comestible está en contacto directo con las aguas regeneradas y los tubérculos que se consumen crudos, y con cualquier método de riego.

Para cada una de las clases de calidad se exigen unos requisitos mínimos, definiendo para ello parámetros de control, como se muestra en la tabla a continuación.

Tabla 1

Requisitos de calidad de las aguas regeneradas para riego agrícola

Clase	Tratamiento	<i>E. coli</i> (número/100mL)	DBO ₅ (mg/L)	STS (mg/L)	Turbidez (NTU)
A	Secundario, filtración y desinfección	≤10	≤10	≤10	≤5
B	Secundario y desinfección	≤100	Según Directiva 91/271/CEE (anexo I, cuadro I)		-
C	Secundario y desinfección	≤1 000			-
D	Secundario y desinfección	≤10 000			-

Nota. Tomado de Reglamento (UE) 2020/741

Otros requisitos de calidad incluidos, pero con excepciones, son los parámetros *Legionella* spp. < 1 000 UFC/L y nemátodos intestinales (huevos de helminto) ≤ 1 huevo/L. No obstante, la *Legionella* spp. será requisito únicamente cuando exista riesgo de aerosolización y los nemátodos intestinales para el riego de pastos o forraje.

Asimismo, en su artículo 12, hace referencia a la repercusión de sustancias de preocupación emergente en el medio ambiente y en la salud humana y animal cuando se reutiliza el agua, aunque no establece valores admisibles ni protocolos de seguimiento para los mismos.

Se considera que las aguas regeneradas cumplen los requisitos si se ajustan en un porcentaje igual o superior al 90% de las muestras a los valores indicados y si ninguno de los valores de las muestras supera el límite de desviación máxima de una unidad logarítmica con respecto al valor indicado en el caso de la *E. coli* y la *Legionella* spp. y el 100% del valor indicado en el resto de los casos.

Para determinar esto la normativa define unos requisitos mínimos de control, también diferentes para cada una de las clases.

Tabla 2

Frecuencias mínimas del control rutinario de las aguas regeneradas para riego agrícola

Clase	<i>E. coli</i> (número/100mL)	DBO ₅ (mg/L)	STS (mg/L)	Turbidez (NTU)	<i>Legionella</i> spp.	Nemátodos intestinales
A	1S	1S	1S	Continuo	2M	2M o según
B	1S	Según Directiva 91/271/CEE (anexo I, cuadro I)		-	2M	determine el
C	2M			-	2M	operador en
D	2M			-	2M	función del nº de huevos entrada

NS: nº veces a la semana; NM: nº veces al mes

Nota. Tomado de Reglamento (UE) 2020/741

Además, el R2020/741 exige realizar una validación antes de instalar una nueva estación regeneradora de aguas, y se hará para la clase con los requisitos más estrictos (clase A). Esta validación contempla el seguimiento de microorganismos indicadores de cada grupo de patógenos, es decir, bacterias, virus y protozoos.

Tabla 3

Controles de validación de las aguas regeneradas para riego agrícola

Clase	Microorganismos indicadores	Objetivos de rendimiento de la cadena del tratamiento (reducción de log10)
A	<i>E. coli</i>	≥ 5
	Colifagos totales/colifagos F- específicos/colifagos	≥ 6
	Esporas de <i>Clostridium</i> <i>perfringens</i> /bacterias formadoras de esporas reductoras de sulfato	≥ 4 en caso de esporas de <i>Clostridium</i> <i>perfringens</i> ≥ 5 en caso de bacterias formadoras de esporas reductoras de sulfato

Nota. Tomado de Reglamento (UE) 2020/741

No obstante, la OMS, en su guía para la calidad del agua de consumo humano (World Health Organization [OMS], 2018), asegura que no se puede realizar un análisis para cada uno de los microorganismos existentes, por lo que selecciona organismos representativos, que, en caso de ser controlados, aseguraría el control del resto. Normalmente se incluye una bacteria (*Campylobacter*), un virus (rotavirus) y un protozoo o un helminto (*Cryptosporidium*).

De hecho, el Reglamento (UE) 2020/741, menciona que los patógenos de referencia *Campylobacter*, rotavirus y *Cryptosporidium* también podrán emplearse para el control de validación, en lugar de los microorganismos indicadores propuestos. En ese caso, se aplicarán los siguientes objetivos de rendimiento (reducción de $\log_{10}$): *Campylobacter* (≥ 5.0), rotavirus (≥ 6.0) y *Cryptosporidium* (≥ 5.0).

La nueva normativa exige la necesidad de adaptación en un periodo muy corto de tiempo. Por ello, a fecha de 27 de noviembre de 2023, se publica un proyecto de Real Decreto por el que se aprueba el Reglamento de reutilización de las aguas que sustituirá al vigente RD 1620/2007, que regula los usos del agua regenerada (urbano, industrial, recreativo...). Este nuevo Real Decreto adoptará lo establecido en el Reglamento (UE) 2020/741 sobre el uso agrícola de las aguas regeneradas, y regulará también el resto de usos.

Esta propuesta de Real Decreto consta de un único artículo por el que se aprueba el Reglamento de reutilización de las aguas, una disposición transitoria, una disposición derogatoria única en la que queda derogado concretamente el Real Decreto 1620/2007 y cinco disposiciones finales. Asimismo, se describe lo citado en el Reglamento, con una estructura organizada en ocho capítulos. El capítulo V contiene disposiciones sobre el Plan de Gestión del Riesgo de aguas regeneradas y en el Anexo III los elementos clave de gestión del riesgo.

Además, esta propuesta contiene no solo lo dispuesto en el Reglamento sobre aguas regeneradas para uso agrícola, sino que incorpora en el Anexo I. Parte A los requisitos según los usos (urbano, agrícola, industrial, otros usos y destino ambiental). Así, regula los usos del agua regenerada incorporando lo establecido en el Reglamento para el uso agrícola de manera particular.

Cabe destacar que lo referido a frecuencias, valores límites y controles de validación descritos en esta propuesta son idénticos a los mencionados en el Reglamento europeo, que es el uso de interés en este caso de estudio.

Sin embargo, hasta la publicación en el Boletín Oficial del Estado de esta nueva normativa, en España, está aún en vigor el RD 1620/2007, del 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. En su Anexo I se recogen los criterios mínimos para poder reutilizar las aguas para los distintos usos (urbano, agrícola, agua de proceso, uso recreativo y ambiental), exigiendo un valor máximo admisible (VMA) para cada uno de los criterios.

Así, los criterios para riego de cultivos con sistema de aplicación del agua que permita el contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles para alimentación humana en fresco, por ser el más restrictivo, descritos como calidad 2.12, son los que se muestran en la tabla a continuación.

Tabla 4

Criterios de las aguas regeneradas para riego agrícola según la normativa española

USO DEL AGUA PREVISTO	VALOR MÁXIMO ADMISIBLE (VMA)				
	Nemátodos intestinales	Escherichia coli	Sólidos en suspensión	Turbidez	Otros criterios
2. USOS AGRÍCOLAS					
CALIDAD 2.12 a) Riego de cultivos con sistema de aplicación del agua que permita el contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles para alimentación humana en fresco	1 huevo/10 mL	100 UFC/100 mL Teniendo en cuenta un plan de muestreo a 3 clases ³ con los siguientes valores: n =10 m=100 UFC/100 mL M=1.000 UFC/100 mL c=3	20 mg/L	10 UNT	OTROS CONTAMINANTES Contenidos en la autorización de vertido de aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs. <i>Legionella</i> spp. 1000 UFC/L (si existe riesgo de aerosolización) Es obligatorio llevar a cabo la detección de patógenos Presencia/Ausencia (<i>Salmonella</i> , etc.) cuando se repita habitualmente que c=3 para M=1.000

Nota. Tomado de Real Decreto 1620/2007

Se puede observar que, a diferencia de la normativa europea vigente actualmente, la normativa estatal incorpora el criterio *Salmonella* (presencia o ausencia) aunque únicamente en determinadas ocasiones.

Además, menciona en ese mismo Anexo criterios referidos a otras características del agua regenerada como la conductividad (3.0 dS/m) y metales pesados (Boro: 0.5 mg/L; Arsénico: 0.1 mg/L; Berilio: 0.1 mg/L; Cadmio: 0.01 mg/L; Cobalto: 0.05 mg/L; Cromo: 0.1 mg/L; Cobre: 0.2 mg/L; Manganeseo: 0.2 mg/L; Molibdeno: 0.01 mg/L; Níquel: 0.2 mg/L; Selenio: 0.02 mg/L; Vanadio: 0.1 mg/L).

En la parte B de ese mismo anexo se establece frecuencias mínimas de análisis para cada uno de los criterios, como se observa en la *Tabla 5*.

Tabla 5*Frecuencias mínimas de análisis de las aguas regeneradas para uso agrario*

Uso	Calidad	Nematodos intestinales	<i>Escherichia coli</i>	SS	Turbidez	Otros criterios
2. USO AGRARIO	2.1	Quincenal	Semanal	Semanal	Semanal	Mensual
	2.2	Quincenal	Semanal	Semanal	-	Quincenal
	2.3	Quincenal	Semanal	Semanal	-	-

Nota. Tomado de Real Decreto 1620/2007

Si se evalúan las diferencias entre la normativa europea (clase A) y la aún vigente normativa española para uso agrícola más restrictivo, la normativa europea siempre es más restrictiva que la española, tanto en valores admisibles como en frecuencia de análisis.

La única diferencia que destaca la normativa española es la inclusión del parámetro *Salmonella*, y la detección de su presencia/ausencia, y la inclusión de criterios para metales y conductividad.

Por otro lado, en el año 2023, se publicó el Real Decreto-ley 4/2023, por el que se adoptan medidas urgentes en materia agraria y de aguas en respuesta a la sequía y al agravamiento de las condiciones del sector primario derivado del conflicto bélico en Ucrania y de las condiciones climatológicas. Este Real Decreto-ley pone el foco en la necesidad inmediata y urgente de la reutilización del agua como actividad en España, sobre todo en las zonas con escasez de recursos hídricos, adquiriendo mayor relevancia las aguas regeneradas en las zonas próximas a la costa por no comprometer las demandas aguas abajo.

En la actualidad, la Unión Europea se encuentra en proceso de actualizar la Directiva de Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas. Algunos de los cambios clave en esta nueva Directiva se basan en normas más estrictas sobre nutrientes y microcontaminantes y en introducir parámetros sanitarios para el seguimiento de pandemias en el análisis de las aguas residuales. Entre las sustancias de nueva aparición destacan los microplásticos y material genético que refleja la presencia de microorganismos resistentes a antimicrobianos. Además, destacan los compuestos con propiedades de alteración endocrina y los productos farmacéuticos.

1.3. Contaminantes del agua residual urbana

Se considera que el agua está contaminada cuando su estado natural se ve modificado y pierde su aptitud para los usos para los que estaba destinada. La fuente de contaminación puede ser de origen natural o antrópico, siendo estas las de mayor importancia, por vertidos de aguas urbanas, de explotaciones ganaderas, agrícolas, industriales, etc. El agua contaminada presenta alteraciones que pueden ser físicas (color, densidad, temperatura, etc.), químicas o biológicas.

A continuación, se describen brevemente los principales contaminantes del agua residual.

- Sólidos totales

Es una de las características más importantes del agua residual, pues engloba la materia en suspensión, la materia sedimentable, la materia coloidal y la materia disuelta. Dentro de esta clasificación, la materia coloidal está ligada a la turbiedad, otro parámetro que se emplea para indicar la calidad de las aguas.

- Cloruros

El ión cloruro es un ión inorgánico muy necesario en el agua potable, a su vez que un indicador de contaminación en aguas residuales, puesto que afecta a las propiedades del agua y al medio ambiente en general (daños en estructuras metálicas, deterioro de la calidad del suelo, afección en el crecimiento de las plantas,...) (Gil-Fernández, 2022). Se debe tener en cuenta que los métodos convencionales de tratamiento de las aguas no contemplan su eliminación (Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua [CIDTA], s.f.).

Además, este parámetro está altamente relacionado con la conductividad, que se define como la capacidad del agua para transportar una corriente eléctrica, y depende de las sustancias disueltas ionizadas y de la temperatura. Su valor es muy usado para obtener un valor estimado de contenido de sólidos disueltos (Romero-Rojas, 1999).

- Materia orgánica

La materia orgánica presente en las aguas residuales procede principalmente de desechos de alimentos, aguas negras domésticas, etc. Los parámetros que estiman este contaminante son la DQO y la DBO y están referidas a la cantidad de oxígeno que es necesario para oxidar químicamente y biológicamente la materia orgánica (Ferrer-Polo et al., 2018). Asimismo, aceites y grasas también son materia orgánica, pero su descomposición por acción bacteriana no es tan sencilla (CIDTA, s.f.).

- Detergentes

Los detergentes (sintéticos o no) usados para limpieza son sustancias que contienen en su composición agentes tensoactivos que modifican la tensión superficial disminuyendo la fuerza de adhesión de las partículas a una superficie, y quelantes para reducir la dureza del agua. El problema de estos agentes tensoactivos y quelantes es que su estructura impide la biodegradación, además de que causan problemas de espumas (Muñoz-Cruz, 2008).

Asimismo, los detergentes contienen fosfatos, que generan problemas de eutrofización (proliferación abundante de algas).

- Nitrógeno

El nitrógeno es un nutriente presente en las aguas residuales esencial para el crecimiento de los organismos. Las formas más destacadas en las aguas residuales son nitrógeno orgánico (formando parte de las proteínas), amoníaco, nitrito y nitrato (las formas más solubles). Las distintas formas en la que aparece el nitrógeno se debe a la acción bacteriana.

La importancia de este contaminante se debe a que altas concentraciones de nutrientes en las aguas dan lugar a nocivas proliferaciones incontroladas de algas, y, por tanto, a eutrofización.

- Fósforo

El fósforo está presente en las aguas residuales en la materia orgánica, detergentes, etc. procedentes de los vertidos. Es, igual que el nitrógeno, un nutriente esencial para la vida de los microorganismos, llegando a provocar eutrofización cuando se vierte con altas concentraciones.

- Sulfatos

El ión sulfato se encuentra, de forma natural, tanto en la mayoría de las aguas de abastecimiento como en el agua residual. Este ion se reduce a sulfuro en los digestores de fangos, y pueden alterar el normal desarrollo en los tratamientos biológicos (CIDTA, s.f.). Además, son un factor importante para evaluar los problemas que pueden surgir por olor y corrosión, por reducción de sulfatos a ácido sulfhídrico (Romero-Rojas, 1999).

- Fluoruros

En cuanto a los fluoruros pueden estar en cantidades excesivas y necesitar de su remoción, pues el ión fluoruro es tóxico y puede aparecer en las aguas residuales industriales de fabricación de componentes electrónicos. Otros aniones tóxicos son los cianuros y cromatos, también presentes en las aguas residuales industriales (CIDTA, s.f.).

- Metales pesados

Los metales pesados son constituyentes importantes del agua residual y algunos de ellos considerados como contaminantes prioritarios, como el níquel (Ni), el manganeso (Mn), el plomo (Pb), el cromo (Cr), el cadmio (Cd), el cinc (Zn), el cobre (Cu), el hierro (Fe) y el mercurio (Hg). En las AR se suelen encontrar en niveles de traza y aunque algunos son imprescindibles para el desarrollo de la vida biológica, son tóxicos y acumulables si pasan a la cadena trófica (Muñoz-Cruz, 2008).

- Agentes patógenos

Los organismos patógenos proceden de desechos humanos infectados o portadores de una determinada enfermedad (CIDTA, s.f.). Las principales clases presentes en aguas residuales son las bacterias, los virus, los protozoos y los helmintos.

Puesto que resultan difíciles de aislar e identificar, se emplea la bacteria coliforme como identificador. No obstante, la presencia de coliformes no siempre es sinónima de contaminación con residuos humanos.

Las bacterias coliformes son especies de organismos capaces de fermentar lactosa con generación de gases o producen una colonia diferenciable en un periodo de incubación de 24 a 48 horas a 35°C, e incluye cuatro géneros (*Escherichia*, *Klebsiella*, *Citrobacter* y *Enterobacter*), mientras que las bacterias coliformes fecales son las capaces de generar gas o colonias a una temperatura de incubación elevada (44.5°C durante 24 horas). Del grupo de organismos, el género *Escherichia* parece ser el más representativo de la contaminación fecal (CIDTA, s.f.).

- Contaminantes emergentes

Además de los contaminantes físico-químicos se deben contemplar los contaminantes emergentes que puedan haber presentes, ya que en las redes de saneamiento de España se han detectado compuestos organoclorados (aldrín, DDT...), orgánicos volátiles (diclorometano, benceno...), dioxinas, furanos, PCB, organofosforados, alquifenoles, etilésteresbromados, ftalatos, amianto, triazinas, organometálicos, y otros como drogas, fitosanitarios, HAP, ibuprofeno o diclofenaco (Galvín, 2014).

Otros de los contaminantes emergentes presentes en las aguas residuales son los antibióticos, bacterias resistentes a antibióticos (ARB) y genes de resistencia a los antibióticos (ARG), y debido a que los procesos convencionales de tratamiento de aguas residuales son solo moderadamente eficaces para su eliminación (Christou et al., 2017), se introducen en el entorno agrícola a través del agua regenerada.

Lin et al. (2020) agrupa los contaminantes emergentes presentes en las aguas residuales en los siguientes: compuestos orgánicos persistentes (COP), productos farmacéuticos y de higiene personal (PPcP), disruptores endocrinos (EDC) y subproductos de desinfección (DBP).

Por su parte, la presencia de microplásticos en entornos acuáticos es una cuestión emergente con impacto a nivel mundial puesto que el uso en la sociedad está incrementándose de manera exponencial en los últimos años y las depuradoras de aguas residuales no tienen capacidad de eliminación por su baja capacidad de degradación de microplásticos (Bollaín-Pastor et al., 2019).

- Dureza

La dureza es expresada como concentración de CaCO_3 . Un agua dura crea problemas pues deposita incrustaciones sobre las superficies con las que entra en contacto (Romero-Rojas, 1999). Por tanto, puede suponer problemas en las etapas de tratamiento.

- Temperatura

La temperatura es un parámetro físico importante por su influencia sobre el desarrollo de la vida, las reacciones químicas que se puedan dar, y la aptitud del agua para ciertos usos. Además, está relacionada con el oxígeno disuelto, también imprescindible para el desarrollo de microorganismos aerobios y tratamiento de las aguas residuales (CIDTA, s.f.). Sin embargo, no supone un peligro potencial como contaminante propiamente dicho, siendo más importante en aguas industriales con temperaturas elevadas.

- pH

Este parámetro es vital para el desarrollo de la vida de los microorganismos que se encargan de la depuración de las aguas residuales (eliminación de materia orgánica y nutrientes).

De hecho, el intervalo de pH adecuado para la proliferación de la mayor parte de la vida biológica es bastante estrecho y crítico (CIDTA, s.f.). Aun así, de forma similar a la temperatura, no se considera un parámetro contaminante relevante en aguas residuales urbanas. Sin embargo, es un parámetro relevante a controlar debido a su importancia para los procesos químicos y biológicos, y a que puede sufrir variaciones relevantes debido a procesos como la nitrificación-desnitrificación.

En este trabajo, el estudio está enfocado en una instalación diseñada para recibir en su mayoría aguas residuales urbanas. En general, las características medias del agua residual urbana española (con un 20% de aporte industrial) son las que se muestran en la tabla a continuación (Galvín, 2014).

Tabla 6
Características medias del agua residual española

Parámetro	Unidad	Valor	Parámetro	Unidad	Valor
Temperatura	°C	24.5	Cianuros	mg/L	<0.002
pH	-	6.8	Fenoles	mg/L	<5
Conductividad	µs/cm	950	Hierro	mg/L	1.204
Oxígeno disuelto	mg/L	1	Manganeso	mg/L	0.302
Sólidos sedimentables	mg/L	14	Arsénico	mg/L	0.007
Sólidos suspendidos		409	Plomo	mg/L	0.079
Sólidos disueltos	mg/L	450	Selenio	mg/L	<0.010
Sólidos disueltos volátiles	mg/L	196	Cobre	mg/L	0.200
DQO	mg/L	700	Zinc	mg/L	0.110
DBO ₅	mg/L	400	Níquel	mg/L	0.006
Amoníaco	mg/L	46.5	Cadmio	mg/L	<0.001
Nitratos	mg/L	<5	Mercurio	mg/L	0.051
N-Kjeldahl	mg/L	61.6	Cromo total	mg/L	0.012
Fósforo total	mg/L	2.9	Coliformes totales	col/mL	2.0x10 ⁸
Detergentes	mg/L	15	Coliformes fecales	col/mL	1.0x10 ⁶
Aceites-grasas	mg/L	109	Dureza (CaCO ₃)	mg/L	162
Cloruros	mg/L	114	Fluoruros	mg/L	0.139
Sulfatos	mg/L	93			

Nota. Tomado de Galvín (2014)

Muchos de los parámetros característicos del agua residual se consideran contaminantes, tal y como se ha descrito previamente. Aun así, la presencia de un contaminante en el agua no determina que haya riesgo ambiental o sanitario, definido como la posibilidad que se produzcan daños en el medio ambiente o perjuicios para la salud de una población.

1.3.1. Riesgos asociados a los contaminantes del agua residual urbana

Para determinar si la presencia de un contaminante en el agua conlleva riesgos para el medio ambiente, animales o población, es necesario basarse en indicaciones que establecen organismos como la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental, la Organización Mundial de Sanidad Animal o la OMS.

Concretamente para este estudio, centrado en riesgos asociados a la salud humana, se siguen indicaciones establecidas por la OMS en su Guía para la calidad del agua de consumo humano.

Para el caso de agentes patógenos, la OMS determina una meta de salud de 10^{-6} AVAD por persona y por año (OMS, 2018). Un AVAD está definido como “Años de Vida Ajustados por Discapacidad”. Entonces, teniendo la probabilidad de infección por un agente patógeno y traducido a AVAD, se puede considerar que valores por debajo de la meta objetivo son tolerables para la salud humana.

Igualmente, la OMS establece valores límite de otros parámetros físico-químicos como los que se observan en la *Tabla 7*. Cabe destacar que en la Guía para la calidad del agua de consumo humano no se detallan valores de referencia para todos los parámetros característicos mencionados previamente para el agua residual, para los cuales se utilizan valores típicos (CIDTA, s.f.). Así, a pesar de que el caso de estudio no contempla un consumo directo del agua residual, estos valores se usan como referencia con el fin de permanecer conservadores ante los riesgos que puedan suponer los peligros para la salud humana.

Tabla 7

Valores de referencia basado en efectos para la salud en aguas de consumo humano

Parámetro	Unidad	Valor de referencia OMS	Valor típico/recomendado
Temperatura	°C	-	10-21
pH	-	No propuesto	6.5-8
Conductividad	µs/cm	-	-
Oxígeno disuelto	mg/L	No propuesto	-
Turbidez	UNT	-	< 0.5
Microplásticos	mg/L	-	-
NH ₄	mg/L	No propuesto	0.5**
NO ₃	mg/L	50	-
NO ₂	mg/L	3	-
Fosfato	mg/L	-	0.1 – 0.2***
Níquel	mg/L	0.07	-
Cromo	mg/L	0.05	-
Cobre	mg/L	2	-

Parámetro	Unidad	Valor de referencia OMS	Valor típico/recomendado
Plomo	mg/L	0.01	-
Zinc	mg/L	No propuesto	< 3
Cadmio	mg/L	0.003	-
Mercurio	mg/L	0.006	-
Arsénico	mg/L	0.01	-
Selenio	mg/L	0.04	-
Boro	mg/L	2.4	-
Manganeso	mg/L	0.4	-
Hierro	mg/L	No propuesto	-
Detergentes	mg/L	0.2*	-
Aceites-grasas	mg/L	-	-
Cloruros	mg/L	No propuesto	< 250
Sulfatos	mg/L	No propuesto	< 250

*Basado en el valor de referencia del ácido nitrilotriacético

**Límite OMS agua potable

***Límite en agua potable

Nota. Tomado de OMS (2018) y CIDTA

1.4. Plan de Gestión del Riesgo

Un Plan de Gestión del Riesgo, obligatorio en la actualidad según la legislación descrita, es un documento para anticipar riesgos, estimar o cuantificar sus impactos y probabilidad, y define respuestas para mitigarlos (ISO, 2018).

Según la Guía Técnica del Centro Común de Investigación para la Gestión de Riesgos de Reutilización del Agua en Riego Agrícola en Europa (Maffettone and Gawlik, 2022), que sirve de ayuda para la elaboración del Plan de Gestión del Riesgo, debe comprender la identificación y gestión de los riesgos asociados al uso de agua regenerada, con el fin de garantizar que las aguas regeneradas se usen y gestionen de forma segura y que asegure no tener riesgo para el medio ambiente ni para la salud humana ni la sanidad animal.

Para elaborar un Plan de Gestión del Riesgo, existen muchas directrices como pueden ser la norma ISO 31000, el Análisis de Peligros y Puntos Críticos de Control (APPCC), la Planificación de Seguridad y Saneamiento (SSP) de la OMS, directrices australianas, etc. Todas ellas comparten tres partes fundamentales que son la evaluación del sistema, el seguimiento operacional y la gestión y comunicación (Radini et al., 2023). No obstante, es el Reglamento (UE) 2020/741 el que establece exactamente los elementos que debe contener el Plan de Gestión del Riesgo.

Según el Reglamento (UE) 2020/741 en su Anexo II, existen 11 principios grave de gestión de riesgos en los que debe basarse el Plan distribuidos en 3 grupos. Estos elementos son:

- la descripción del sistema
- la identificación de las partes que intervienen en él
- la identificación de agentes peligrosos, considerando los posibles efectos negativos
- la identificación de grupos de exposición y rutas de exposición
- la evaluación de los riesgos

- vi) la consideración de requisitos adicionales en función de la calidad del agua o de los resultados de la evaluación de riesgos
- vii) el establecimiento de medidas preventivas
- viii) el establecimiento de procedimientos de control de calidad
- ix) los sistemas de control medioambiental
- x) la gestión de incidentes y emergencias
- xi) los mecanismos de coordinación

Estos mismos elementos de gestión del riesgo se mencionan en el Anexo III de la propuesta del Real Decreto publicado a fecha de 27 de noviembre de 2023, siendo esta la trasposición del Reglamento (UE) 2020/741, donde se describen los elementos clave de gestión del riesgo para utilizar agua residual tratada para regadío.

Con el fin de simplificar el enfoque y ofrecer una guía de aplicación más práctica y sencilla, Maffetone y Gawlik (2022) propusieron la Guía Técnica del Centro Común de Investigación para la Gestión de Riesgos de Reutilización del Agua en Riego Agrícola en Europa, en la que se mantuvieron los 11 elementos clave de la gestión del riesgo que establece la normativa, pero agrupándolos en cuatro módulos diferenciados: El sistema de reutilización del agua, Evaluación de riesgos, Monitoreo, y Gestión y coordinación.

Seguidamente, se muestra un esquema resumen de las diferencias de agrupación entre las normativas (Reglamento (UE) 2020/741 y propuesta del Real Decreto) y la Guía Técnica del Centro Común de Investigación para la Gestión de Riesgos de Reutilización del Agua en Riego Agrícola en Europa. Sin embargo, los 11 elementos se mantienen en ambos casos (*Figura 2*).



Figura 2

Elementos clave de la gestión del riesgo

Nota. Elaboración propia (2024)

1.4.1. Guía Técnica del Centro Común de Investigación para la Gestión de Riesgos de Reutilización del Agua en Riego Agrícola en Europa

Tal y como se ha comentado, la Guía Técnica del Centro Común de Investigación para la Gestión de Riesgos de Reutilización del Agua en Riego Agrícola en Europa (Maffetone y Gawlik, 2022) nace con el fin de aportar unas pautas de aplicación para la elaboración de un Plan de Gestión del Riesgo, en consonancia con lo que establece el Reglamento (UE) 2020/741.

En esta guía se explican los cuatro módulos a seguir para la elaboración del Plan de Gestión del Riesgo para un sistema de forma genérica, destacando que para cada paso particular las condiciones son variables y debe existir un estudio exhaustivo de cada instalación concreta. A continuación, se describen las pautas a seguir según Maffetone y Gawlik (2022).

1.4.1.1. Módulo I. El sistema de reutilización del agua (elementos nº 1 y nº2)

Para poder prever adecuadamente los riesgos asociados a un sistema de Reutilización del Agua es necesario conocerlo e identificar sus partes. De forma genérica, el sistema engloba desde la recogida de las aguas de donde se generan hasta el punto de uso, incluyendo la descripción de la planta regeneradora de agua en sí misma.

Además, los sistemas están gestionados por medios humanos, que tienen responsabilidades y desempeñan roles debidamente diferenciados.

De modo que este módulo engloba los dos primeros elementos clave en la gestión del riesgo: 1) descripción del sistema; e 2) identificación de las partes involucradas, roles y responsabilidades.

- Elemento 1. Descripción del sistema

La descripción del sistema debe incluir:

1.- *Los orígenes de las aguas residuales urbanas* que entran en la estación depuradora

2.- *La referencia o nombre* de la instalación regeneradora de aguas

3.- *Una caracterización de la calidad de las aguas que entran y en diferentes puntos del sistema*, para permitir identificar los parámetros que son relevantes para la calidad del agua regenerada y que, por tanto, pueden convertirse en peligros. Esta caracterización abarca los parámetros que se mencionan en el Anexo al Reglamento Delegado que completa el Reglamento (UE) 2020/741

Destacan entre estos parámetros los establecidos en los anexos I y II del Reglamento 2020/741 (ver apartado *Normativa aplicable*) como requisitos y obligaciones, parámetros específicos de la planta (controlados en el efluente, indicados en permisos de vertido o de conformidad con el Registro Europeo de Emisiones y Transferencia de Contaminantes).

4.- *Los flujos de agua*, identificando el punto de cumplimiento en el sistema de reutilización

5.- *Los sistemas de almacenamiento, distribución y métodos de riego*, especificando usos del agua regenerada

- Elemento 2. Identificación de las partes involucradas

Se deben identificar las partes involucradas en el sistema (medios humanos), así como describir sus funciones y responsabilidades. Así, para cada puesto de trabajo/persona encargada se describirán las acciones de las que es responsable, el lugar o la etapa del sistema donde se deben realizar y el momento. Pueden participar operadores de las instalaciones, regantes, autoridades, etc.

1.4.1.2. Módulo II. Evaluación de Riesgos (elementos nº3, nº4, nº5, nº6 y nº7)

Es necesario para adentrarse en este módulo conocer qué se considera un riesgo. El riesgo se define como la probabilidad de que agentes peligrosos detectados causen un daño en un plazo determinado y la gravedad de las consecuencias. Así, se puede entender riesgo como probabilidad x exposición x consecuencia.

Por su parte, la probabilidad se define como la posibilidad de que un evento ocurra o no y la gravedad es la importancia de las consecuencias asociadas al peligro identificado (Leal, 2020).

Por tanto, la evaluación de riesgos implica cinco elementos (elementos del nº3 al nº7) clave:

- iii) la identificación de agentes peligrosos (contaminantes químicos, patógenos, agronómicos, etc.) y de sucesos peligrosos
- iv) la identificación de grupos de exposición y rutas
- v) la identificación de requisitos adicionales (metales, contaminantes prioritarios, etc.)
- vi) la caracterización del riesgo para la salud humana y animal y para el ambiente
- vii) la proposición de medidas en base al riesgo evaluado

- Elemento 3. Identificación de agentes y sucesos peligrosos

Un agente peligroso es un agente biológico, químico, físico o radiológico que tiene el potencial de causar daños a las personas, los animales, los cultivos o las plantas, la biota terrestre, la biota acuática, los suelos o el medio ambiente en general (Leal, 2020).

Un suceso peligroso es la situación que introduce uno o varios agentes peligrosos en el sistema o que no puede eliminarlos (Leal, 2020).

Los peligros pueden incluir, según el Anexo al Reglamento Delegado que completa el Reglamento (UE) 2020/741 “peligros presentes en el agua regenerada, incluidos contaminantes, patógenos u otras sustancias, que podrían suponer un riesgo para la salud humana y animal, los cultivos y el medio ambiente”.

Por su parte, los eventos peligrosos deben incluir como mínimo los fallos de las medidas preventivas, los vertidos accidentales, los errores humanos, cambios estacionales, sucesos sísmicos o actos de vandalismo o terrorismo.

- Elemento 4. Identificación de los grupos y rutas de exposición

Los grupos de exposición son las personas, animales o ambientes que pueden estar expuestos a un agente peligroso específico (Leal, 2020), y las rutas de exposición la forma en la que el agente peligroso llega al grupo de exposición.

De forma genérica, deben contemplarse entre los grupos de exposición la afección a las aguas superficiales y resto de recursos hídricos, suelos, cultivos, ecosistemas, poblaciones, etc.

Por su parte, las rutas de exposición van a depender de los grupos de afección. La afección a los suelos puede ser, por ejemplo, por infiltración o por riego, la afección a las aguas por trasvase y la afección a la población por inhalación, ingestión o contacto directo (Leal, 2020).

- Elemento 5. Identificación de requisitos adicionales

Los requisitos adicionales pueden referirse a metales pesados, plaguicidas, subproductos de la desinfección, productos farmacéuticos y otras sustancias de preocupación emergente.

Se deben tener en cuenta cuando sea necesario y apropiado para garantizar la protección del medio ambiente, personas y animales, y en función de los resultados de la evaluación de riesgos.

- Elemento 6. Evaluación del riesgo

La evaluación del riesgo consiste en la obtención de un nivel de riesgo para cada uno de los agentes peligrosos identificados evaluados por grupo y ruta de exposición, y se puede hacer, según los objetivos del estudio, de forma cualitativa, semicuantitativa o cuantitativa. Cada una de ellas tiene una estructura diferente, tal y como se describe en el apartado *Evaluación del riesgo*. Se utilizará la evaluación cuantitativa de los riesgos cuando existan datos de apoyo suficientes o en proyectos que presenten un alto riesgo potencial para el medio ambiente o la salud pública.

Debe constar de los siguientes elementos:

1.- *Una evaluación de los riesgos para el medio ambiente*

2.- *Una evaluación de los riesgos para la salud humana y la sanidad animal*

Asimismo, de forma genérica, se deben tener en cuenta, como mínimo, los requisitos y obligaciones establecidos por las siguientes normativas para los diferentes grupos de exposición:

- 1.- *Directiva 91/676/CEE*, relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en la agricultura
- 2.- *Directiva 98/83/CE*, relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano
- 3.- *Directiva 2000/60/CE*, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas
- 4.- *Directiva 2006/118/CE*, relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro
- 5.- *Directiva 2008/105/CE*, relativa a las normas de calidad ambiental en el ámbito de la política de agua
- 6.- *Directiva 2006/7/CE*, relativa a la gestión de la calidad de las aguas de baño
- 7.- *Directiva 86/278/CEE*, relativa a la protección del medio ambiente y, en particular, de los suelos, en la utilización de los lodos de depuradora en agricultura
- 8.- *Reglamento (CE) nº 852/2004*, relativo a la higiene de los productos alimenticios
- 9.- *Reglamento (CE) nº 183/2005*, por el que se fijan requisitos en materia de higiene de los piensos
- 10.- *Reglamento (CE) nº 2073/2005*, relativo a los criterios microbiológicos aplicables a los productos alimenticio
- 11.- *Reglamento (CE) nº 1881/2006*, por el que se fija el contenido máximo de determinados contaminantes en los productos alimenticios
- 12.- *Reglamento (CE) nº 396/2005*, relativo a los límites máximos de residuos de plaguicidas en alimentos
- 13.- *Reglamentos (CE) nº 1069/2009 y (UE) n.o 142/2011*, por el que se establecen las normas sanitarias aplicables a los subproductos animales y los productos derivados no destinados al consumo humano

- Elemento 7. Medidas preventivas y control de calidad

Una vez caracterizados y/o cuantificados los riesgos por alguna de las evaluaciones (cuantitativa, semicuantitativa o cualitativa), se deben establecer medidas según el riesgo asociado, con el principal objetivo de transformar los riesgos no aceptables en aceptables al implantar estas medidas, que pueden incluir:

- 1.- *Controles de acceso*
- 2.- *Tratamientos adicionales de eliminación de contaminantes o tecnologías específicas en el riego para la aerosolización*

3.- *Requisitos específicos* para riego o campos agrícolas (distancia entre aspersor y cultivo sensible o inclinación del campo, por ejemplo)

4.- *Establecimiento de distancias de seguridad*

5.- *Señalización*

1.4.1.3. Módulo III. Monitoreo (elementos nº 8 y nº9)

El monitoreo es la implantación de procedimientos y protocolos para el control del sistema de reutilización de agua (Maffetone y Gawlik, 2022), que garantizan su adecuado funcionamiento (señales de alarma y paro en caso de existir riesgo elevado para reutilizar, plan de análisis de patógenos y parámetros físico-químicos en el efluente, etc.). Estos protocolos deben basarse en los resultados obtenidos con la evaluación de riesgos previa y proporcionan garantías a los trabajadores, al público y a las autoridades sobre el rendimiento adecuado del sistema.

Se trata de llevar a cabo un seguimiento a través de un muestreo o caracterización, tanto de las aguas regeneradas como del medio ambiente afectado. Para ello, se deben instaurar procedimientos y sistemas de control de calidad, en relación a los parámetros identificados y mantenimiento de equipos que participan en el sistema y en relación al control medioambiental.

El sistema de vigilancia ambiental debe, según el Anexo al Reglamento Delegado que completa el Reglamento (UE) 2020/741 previamente citado:

- 1.- Basarse en los resultados de la evaluación de riesgos
- 2.- Incluir procedimientos para cumplir al menos los requisitos mínimos de seguimiento rutinario
- 3.- Incluir procedimientos de seguimiento para el muestreo y análisis del agua recuperada, con indicación de ubicación y frecuencia, y procedimientos para el muestreo y análisis de parámetros mediante análisis de laboratorio, sensores o analizadores en tiempo real

Los resultados del seguimiento se podrán utilizar para reevaluar los riesgos y si la aplicación de medidas contribuye realmente a reducir los mismos. De modo que el Plan se debe considerar un proceso dinámico, en el que los resultados de la implementación de las medidas puede servir de retroalimentaciones para establecer nuevas medidas, y de esta forma, actualizar el Plan de Gestión del Riesgo.

1.4.1.4. Módulo IV. Gestión y Comunicación (elementos nº 10 y nº 11)

El Plan de Gestión del Riesgo finaliza con dos elementos de gestión esenciales, como son la implantación de sistemas de gestión e incidencias y la coordinación entre las distintas partes involucradas, con el fin de favorecer la información entre los actores y de esta manera garantizar la utilización segura de las aguas regeneradas.

Por un lado, se debe elaborar un sistema de gestión de emergencias e incidentes, donde se deben establecer procedimientos, diagramas de flujo y herramientas o controladores en línea que activen alarmas.

Por otro, se debe garantizar la coordinación y comunicación entre los diferentes actores implicados en el sistema de reutilización del agua, teniendo en cuenta el resultado de respuestas a incidentes y emergencias y cualquier cambio de las personas y partes responsables. Para ello, se puede generar una lista con la información de contacto, procedimiento de información, procedimientos de entrega de avisos de advertencia, etc.

1.4.2. Evaluación del riesgo

La evaluación del riesgo, tal y como se ha explicado, se puede realizar mediante un análisis cualitativo, semicuantitativo o cuantitativo. Próximamente, se desarrolla la norma UNE-EN 15975-2 como análisis cualitativo y semicuantitativo, y el QMRA como análisis cuantitativo escogidos para el presente estudio.

1.4.2.1. Análisis Cuantitativo del Riesgo Microbiológico (QMRA)

El Análisis Cuantitativo del Riesgo Microbiológico (QMRA, del inglés Quantitative Microbial Risk Assessment) es una forma de abarcar parte del módulo II del Plan de Gestión del Riesgo y evaluar cuantitativamente los riesgos microbiológicos o los riesgos asociados a los agentes patógenos (bacterias, virus y protozoos). Es utilizado para los efectos que provocan en la salud humana, por lo que es la parte central del caso de estudio.

Caracterizar el riesgo en un análisis QMRA significa hallar la probabilidad de infección existente para un individuo frente a un agente patógeno. Esa probabilidad de infección viene dada por los modelos dosis-respuesta.

Esta metodología consta de cuatro etapas: i) la identificación de peligros, ii) la caracterización del peligro, iii) la evaluación de la exposición y iv) la caracterización del riesgo (QMRA, 2024). Por tanto, esta metodología requiere en primer lugar identificar los agentes peligrosos objeto de estudio, así como las rutas de exposición y posteriormente, caracterizar el riesgo mediante un modelo dosis-respuesta. Algunas de estas etapas coinciden con elementos del Plan de Gestión del Riesgo, aunque el objetivo es diferente, pudiendo complementarse parte de la información. Seguidamente, se detalla el objetivo a alcanzar en cada una de las etapas del QMRA.

- Identificación de peligros

Esta etapa trata de seleccionar qué microorganismos son de interés en cada caso particular, es decir, en cada sistema de gestión del riesgo, así como los efectos adversos que provoca la infección de estos microorganismos.

La identificación abarca información general como la taxonomía del agente patógeno, las etapas de la vida, métodos de detección, modo de transmisión, periodos de incubación y duración de la enfermedad, tasa de letalidad, signos y síntomas, efectos en personas vulnerables, etc.

- Caracterización del peligro

La caracterización del peligro, o fase de evaluación de la respuesta a la dosis, es una de las etapas clave en un análisis QMRA, pues relaciona mediante una función matemática la dosis a la que una persona está expuesta al peligro con la probabilidad de sufrir infección. Se parte de estudios realizados, ya que la relación viene influenciada por el estado inmunológico del huésped, su salud, etc. (Sanz, 2012). No obstante, la relación dosis-respuesta para todos los posibles agentes infecciosos no está estudiada en profundidad y los datos disponibles son limitados, además de que los modelos predicen la probabilidad de infección, no de contraer la enfermedad (Haas et al., 1999).

Para que un modelo dosis-respuesta sea plausible, debe considerar la naturaleza de los organismos y basarse en el concepto de infección de uno o más “sobrevivientes”, y en base a estas necesidades existen dos modelos para la relación dosis-respuesta QMRA: el modelo exponencial y el modelo de distribución de Poisson (QMRA, 2024).

a) Modelo exponencial

El modelo exponencial considera que la probabilidad del microorganismo a sobrevivir a las barreras defensivas de los individuos y por tanto a generar infección es igual para cualquier microorganismo en cualquier individuo (Haas et al., 1999). Se considera, por tanto, un modelo más limitante que el modelo de distribución de Poisson, y que su uso es aconsejable únicamente en caso de no ser posible el uso del modelo de distribución de Poisson.

La probabilidad de infección en este modelo depende de la dosis de patógeno y el parámetro de distribución r (ver apartado *Evaluación de riesgos*), y puede obtenerse en bibliografía para ciertos agentes patógenos.

b) Modelo de distribución de Poisson

Este modelo asume que los microorganismos en el medio están distribuidos al azar y por tanto la probabilidad de infección no es constante (Haas et al., 1999).

Según el modelo de distribución de Poisson, la probabilidad de infección viene dada por la dosis de patógeno, y los parámetros de distribución α y β (ver apartado *Evaluación de riesgos*). Estos parámetros de distribución pueden obtenerse en bibliografía para ciertos agentes patógenos.

- Evaluación de la exposición

La evaluación de la exposición es en realidad la dosis del patógeno que un individuo ingiere, inhala o entra en contacto. Por tanto, es uno de los parámetros que alimenta al modelo dosis-respuesta para obtener la probabilidad de infección, a pesar de que sea una etapa posterior.

En realidad, esta etapa del QMRA está muy interconectada con la caracterización del peligro, tal y como se puede observar en la *Figura 3*.

El volumen de exposición es variable según la ruta de exposición, y principalmente su determinación se basa en referencias bibliográficas.

Cabe destacar que los modelos dosis-respuesta son capaces de considerar la exposición al patógeno de manera prolongada en el tiempo, obteniéndose una probabilidad de infección combinada (a lo largo de un año, por ejemplo), como se explica a continuación.

- Caracterización del riesgo

Consiste en integrar la información de la dosis recibida con el riesgo asociado a diferentes dosis, y se suele realizar de forma iterativa, aunque se podría comenzar con estimaciones puntuales de valores medios, y luego estimar para valores altos y bajos (QMRA, 2024). Se obtiene con esto la probabilidad de infección combinada.

Tal y como se ha comentado, el modelo dosis-respuesta no ofrece como resultado la probabilidad de contraer la enfermedad. No obstante, la probabilidad de infección y la probabilidad de contraer la enfermedad se relacionan con factores constantes de referencias bibliográficas.

En este punto se termina el análisis QMRA, con la obtención de la probabilidad de contraer la enfermedad por cada uno de los agentes patógenos.

Sin embargo, para valorar el nivel de riesgo y saber si es tolerable o no, es necesario el cálculo de los Años de Vida Ajustados por Discapacidad definidos por la OMS para cada uno de los agentes patógenos, y compararlo con sus recomendaciones de salud.

En la *Figura 3* se puede observar la relación entre las etapas del análisis QMRA.

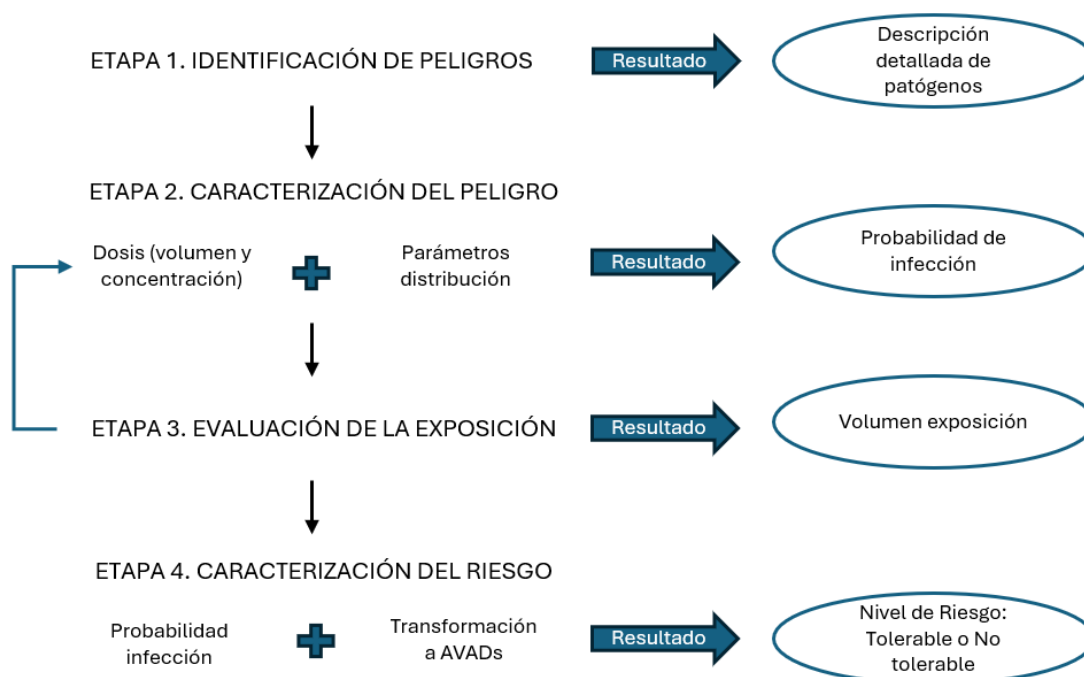


Figura 3

Etapas del análisis QMRA

Nota. Elaboración propia (2024)

1.4.2.2. Análisis de riesgos cualitativo o semicuantitativo según la norma UNE-EN 15975

Otra forma de evaluar los riesgos en el Plan de Gestión del Riesgo es mediante un análisis cualitativo o semicuantitativo.

La norma UNE-EN 15975 Directrices para la gestión del riesgo y las crisis, en la segunda parte, referida a la gestión del riesgo, plantea el procedimiento de la gestión de riesgos en cinco fases: i) descripción del sistema, ii) identificación de peligros y sucesos peligrosos, iii) apreciación de riesgos, iv) control de riesgos y v) verificación del procedimiento de gestión de riesgos.

Se puede observar, según dicho planteamiento, que las fases se asemejan en gran medida con lo descrito para el desarrollo de un Plan de Gestión del Riesgo para aguas regeneradas del Reglamento. Es por ello que se introduce la norma UNE-EN 15975 como parte del Plan de Gestión del Riesgo; en concreto, para la fase de evaluación de riesgos físico-químicos.

Por tanto, de la norma UNE-EN-15975-2 nos centramos en la fase de apreciación de riesgos, por estar el resto incluidas en otras partes del Plan de Gestión del Riesgo según la Guía Técnica del Centro Común de Investigación.

La apreciación de riesgos la define como *“el proceso global de análisis de riesgos y evaluación de riesgos”*, y además, como *“una herramienta valiosa para apoyar a la toma de decisiones que permite priorizar las necesidades de mejora y de actualización que se requieren para poder cumplir con los objetivos definidos”*. Es aquí donde entra el concepto de análisis semicuantitativo o cualitativo, pues esta norma, en el Anexo A, plantea alternativas de matrices de apreciación de riesgos, enfrentando la probabilidad con la severidad de las consecuencias. A continuación, se muestran dos matrices de apreciación de riesgo, diferenciadas principalmente en su simplicidad.

Tabla 8

Matriz 3x3 de apreciación de riesgos cualitativo

		Severidad de las consecuencias		
		BAJA	MEDIA	ALTA
Probabilidad de ocurrencia	BAJA	Riesgo bajo	Riesgo medio	Riesgo alto
	MEDIA	Riesgo bajo	Riesgo medio	Riesgo alto
	ALTA	Riesgo medio	Riesgo alto	Riesgo alto

Nota. Tomado de norma UNE-EN 15975-2

Tabla 9

Matriz 5x5 de apreciación de riesgos semicuantitativo

			Severidad de las consecuencias				
			Insignificante	Menor	Moderada	Mayor	Muy severa
		Índice	1	2	3	4	5
Probabilidad de ocurrencia	Muy poco probable	1	1	2	3	4	5
	Poco probable	2	2	4	6	8	10
	Media	3	3	6	9	12	15
	Probable	4	4	8	12	16	20
	Casi segura	5	5	10	15	20	25

Nota. Tomado de norma UNE-EN 15975-2

Se puede ver que el nivel de riesgo en el análisis semicuantitativo según la norma UNE-EN 15975-2 viene dado por la probabilidad y gravedad de las consecuencias de que pueda aparecer el riesgo, incluso teniendo en cuenta las medidas preventivas definidas para el control de los riesgos.

No obstante, esta metodología es flexible y la norma UNE-EN 15975-2 expone algunos ejemplos de matrices de riesgo, pudiéndose adaptar a cada caso particular (ver apartado *Evaluación de riesgos*).

La forma de denominar a este análisis como cualitativo o semicuantitativo va a depender de cómo se asigne el nivel de probabilidad y nivel de gravedad de cada uno de los potenciales peligros identificados. Esto se refiere a que, si la asignación del nivel de gravedad o probabilidad de un parámetro viene dada por referencias numéricas, valores de referencia dados, etc. se definirá como semicuantitativo, mientras que si viene dada por experiencia propia o únicamente referencias bibliográficas de forma teórica, se definirá como análisis cualitativo del riesgo.

1.5. Tratamientos basados en microalgas

En relación al caso de estudio que se presenta, el tratamiento de agua se basa en un cultivo de microalgas combinado con un tratamiento convencional de fango activado, con el objetivo de maximizar la producción de agua regenerada, recuperación de nutrientes y minimización de la contaminación ambiental, dentro del marco del proyecto *MSCA-“MicroAlgae 4.0” (101067621)*. Se considera, sin embargo, que únicamente se reutiliza el agua tratada con el cultivo de microalgas.

Los cultivos de microalgas recientemente han crecido en popularidad, demostrando alta eficacia en la eliminación de nutrientes y otros contaminantes (Arbib et al., 2022). Esta tecnología se engloba dentro de las sostenibles, eficientes energéticamente y en consonancia con la economía circular (Acién et al., 2023), reduciendo la emisión de gases de efecto invernadero respecto a tecnologías convencionales (Arashiro et al., 2018).

Una de las razones por las que se tiene interés en esta tecnología es porque puede ser utilizada tanto para aguas residuales urbanas como para aguas residuales en diferentes industrias (Ortega-Pérez, 2023). Además, las microalgas aparecen como una alternativa a los sistemas convencionales debido a que el agua influente de las EDARs puede ser utilizada por ellas como fuente de alimento (alto contenido en nitrógeno, fósforo y materia orgánica), y la biomasa generada de algas es una fuente sostenible que puede ser usada como biocombustible, biofertilizante, etc. (Odjadjare et al., 2017). Según Acién et al. (2016), se puede llegar a producir 1 kg de biomasa de algas por m³ de agua residual.

Respecto a la viabilidad energética y de costes, dependiendo del tipo de biorreactor de microalgas, esta tecnología puede ser viable o no. Por ejemplo, los fotobiorreactores y su necesidad de dotar de luz natural y/o artificial al tratamiento de microalgas implica que el consumo de energía y costes de inversión requeridos sean inviables para sistemas de tratamiento de agua residual a gran escala (Acién et al., 2016). Sin embargo, la alternativa de reactores al aire libre ("open ponds") son atractivos para poblaciones pequeñas y medianas, consumiendo menos energía que los procesos convencionales de lodos activados (es decir, 0.2 kWh/m³ frente a 0.5-0.7 kWh/m³) y con un coste menor (es decir, 0.1€/m³ frente a 0.3€/m³) al de lodos activados con tratamiento terciario (Pastor et al., 2023). De hecho, considerando el valor de la biomasa de 1€/kg, se podría llegar a cubrir el coste total del tratamiento ampliamente (Acién et al., 2016).

A pesar de lo comentado previamente, la tecnología de las microalgas para el tratamiento de aguas es una tecnología aún en desarrollo, estudiada principalmente en proyectos piloto y con pocos casos de estudio a nivel industrial, que se espera poder implementar en un futuro próximo.

Algunos de sus problemas más relevantes son la dificultad para alcanzar y mantener la estabilidad en los cultivos porque las condiciones climáticas, luz, pH, la temperatura y los nutrientes son factores determinantes en el proceso (Marazzi et al., 2019).

Además, los parámetros operativos, de configuración del reactor (Viruela et al., 2018), el monitoreo y automatización del proceso, la falta de información en relación con la eliminación de contaminantes emergentes, los posibles riesgos en el uso de agua recuperada y nutrientes aplicados en la agricultura y, por último, las barreras aún existentes legales, políticas y sociales (González-Camejo, 2019) hace que esta tecnología sea una tecnología con un margen elevado de mejora, que aún está en desarrollo.

Puesto que no se conocen con seguridad los parámetros óptimos para el crecimiento de los cultivos de algas dado que cada especie exhibe características distintas, los esfuerzos deben centrarse en la mejora del modelado, optimización del diseño y operación, implementación de sistemas de control avanzados y en el procesamiento de la biomasa producida (Barceló-Villalobos et al., 2022; Casagli et al., 2021; Fernández et al., 2021; Morillas-Espana et al., 2022; Sánchez-Zurano et al., 2021).

La separación de esta biomasa es también un reto debido al pequeño tamaño de las microalgas y la baja capacidad de sedimentación (Rojas-Castillo, 2023). Por su parte, la flotación solo es posible para algunas especies o con agregación de químicos, con riesgo de que estos químicos hagan que la biomasa pierda valor.

Por tanto, y como se detalla posteriormente (ver apartados *Caso de estudio* y *Descripción del Sistema de Reutilización*), se cuenta en este caso de estudio con una separación con membranas, lo cual supone una ventaja para procesar la biomasa producida.

Asimismo, para que un sistema con microalgas sea una alternativa real a un sistema convencional, por ejemplo de fangos activos, debe ser capaz de aprovechar los recursos, tanto del agua como la biomasa. Según lo comentado anteriormente, el agua podrá ser aprovechada y reutilizada si es segura para su uso y el riesgo es aceptable. Por tanto, es necesario establecer un Plan de Gestión del Riesgo, que tenga en cuenta alternativas de monitoreo, evaluación de riesgos, gestión y coordinación, etc.

2. OBJETIVOS

Teniendo en cuenta el contexto que nos encontramos en la actualidad en relación con la reutilización de aguas y la adaptación a la normativa reciente, se propone un Plan de Gestión del Riesgo para las Aguas Reutilizadas utilizando la EDAR de Carraixet como caso de estudio, que aportará claridad a la viabilidad legal que tiene un sistema de microalgas como tratamiento de aguas residuales para su reutilización.

Desde un punto de vista científico, el principal objetivo de este Trabajo Fin de Máster es evaluar el riesgo para la salud humana que tendría utilizar un agua tratada mediante un sistema de microalgas para su reutilización para riego agrícola, planteando un caso de estudio hipotético, utilizando datos experimentales de estudios previos, y teniendo en cuenta el contexto actual en relación a la reutilización de aguas y la adaptación a la normativa reciente. Este objetivo se desarrolla principalmente mediante la realización de un Plan de Gestión del Riesgo en consonancia con la reciente normativa existente (a escala nacional y Europea).

Para ello se plantean los siguientes objetivos secundarios:

- Comprobar que el tratamiento con microalgas es un sistema que reúne las características necesarias para alcanzar un efluente de calidad suficiente para poder ser reutilizado acorde a las normativas vigentes y futuras (en línea con las nuevas directivas de tratamiento de aguas residuales urbanas y de reutilización).
- Analizar y unificar la metodología de análisis de riesgos para hacer cumplir al sistema con el Reglamento (UE) 2020/741 del Parlamento Europeo y del Consejo, relativo a los requisitos mínimo de reutilización de agua.
- Evaluar los riesgos (patógenos, físico-químicos, etc.) de forma cualitativa, semicuantitativa y/o cuantitativa con una metodología fiable y contrastada.
- Proponer barreras, sistemas de control u otras tecnologías para minimizar los posibles riesgos presentes en el caso de estudio.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

En este apartado se va a explicar la aplicación de la metodología al caso de estudio, así como los métodos para su elaboración, estudios previos y explicación del caso de estudio que se presenta.

3.1. Metodología

La metodología que se sigue para el desarrollo del Plan de Gestión del Riesgo aplicado al caso de estudio es la que marca la Guía Técnica del Centro de Investigación (ver apartado *Guía Técnica del Centro Común de Investigación para la Gestión de Riesgos de Reutilización del Agua en Riego Agrícola en Europa*). Dentro de esta, y concretamente para la evaluación de los riesgos, se sigue la metodología QMRA para los agentes patógenos y la norma UNE-EN 15975-2 para los parámetros físico químicos.

Los estudios previos consisten en realizar una revisión bibliográfica sobre la normativa a cumplir para incorporar la gestión del riesgo, y las diferentes visiones de las guías para la elaboración del Plan de Gestión del Riesgo. En las próximas secciones se detalla la aplicación de las metodologías mencionadas en el apartado *Plan de Gestión del Riesgo* para el caso concreto de estudio.

3.1.1. Alcance del Plan de Gestión del Riesgo

Se debe definir el alcance del Plan de Gestión del Riesgo, pues el establecimiento del plan puede llegar a ser un proceso complejo que requiere de un enfoque multidisciplinar, cuyo análisis en detalle va más allá de los objetivos de este trabajo. En este caso, se quiere evaluar el riesgo para la salud humana de la utilización en agricultura del agua regenerada obtenida mediante un sistema de microalgas.

3.1.2. Módulo I. El Sistema de Reutilización

Este módulo abarca, según lo comentado de forma genérica, la descripción detallada del sistema de reutilización y la identificación de las partes que intervienen, incluyendo sus funciones y responsabilidades.

3.1.2.1. Descripción del Sistema

En concreto para el presente caso de estudio, en este apartado se va a describir el sistema que forma parte del alcance del Plan de Gestión del Riesgo. Esto es el sistema de tratamiento con cultivo de microalgas, y concretamente los riesgos asociados al agua regenerada con este tratamiento.

Además, se detalla el método de riego escogido, la caracterización del influente a la EDAR y al sistema de microalgas, con el fin de identificar posteriormente los peligros potenciales del caso estudio específico. La caracterización proviene de estudios previos de la EDAR Cuenca del Carraixet escalables a este caso de estudio (ver apartado *Estudios previos*).

No se tiene en cuenta, por tanto, la descripción del almacenamiento del agua, distribución y punto de riego, ya que debido a su complejidad y a los distintos actores que intervienen en estos puntos, no se posee información detallada de ellos.

3.1.2.2. Identificación de las partes que intervienen en el Sistema

Este elemento de gestión no se va a desarrollar en el Plan de Gestión del Riesgo de este estudio al no conocer las partes responsables de las instalaciones concretas, ni las funciones que desempeñan en sus jornadas laborales. Además, no se considera información relevante respecto a la viabilidad de un sistema basado en microalgas, ya que se asume que esta información sería análoga a cualquier otro sistema de tratamiento y reutilización de agua.

En resumen, el módulo I lo comprenderán dos apartados: la descripción del sistema y la caracterización del agua residual influente y efluente.

3.1.3. Módulo II. Evaluación de Riesgos

Incluye la identificación de peligros, eventos peligrosos, ambientes y poblaciones en riesgo, rutas de exposición, la evaluación de riesgo y el establecimiento de medidas y sistemas de control de calidad.

3.1.3.1. Identificación de peligros y eventos peligrosos

En esta etapa del Plan de Gestión del Riesgo se realiza un listado de peligros potenciales, que vendrá generado por los requisitos por normativa (R2020/741 y RD1620/2007) y por la propia caracterización del agua residual del caso de estudio concreto, justificando la elección de los distintos parámetros. Además, se describen los riesgos asociados a los peligros potenciales identificados.

Por otra parte, y puesto que únicamente es relevante según el alcance de estudio que los peligros alcancen a la población humana, se considera el evento como la presencia de contaminante, sin importar qué haya causado su presencia en el agua.

3.1.3.2. Identificación de entornos, grupos y rutas de exposición

Puesto que el alcance del Plan de Gestión del Riesgo está asociado únicamente a la población expuesta, no se tienen en cuenta otros grupos de exposición como son los animales o el ambiente (recursos hídricos, suelos, cultivos, etc.). Por la misma razón, las rutas de exposición están asociadas a la población, sin tener en cuenta las rutas que afectan al ambiente (escorrentías, infiltración, etc.).

Así, en este apartado se tienen en cuenta diferentes grupos de población, y las rutas de exposición al peligro por parte de esos grupos de exposición. Se realizará un listado con los diferentes escenarios, entrecruzando los grupos de exposición con las rutas.

3.1.3.3. Evaluación de riesgos

Para la elaboración del Plan de Gestión del Riesgo en este caso de estudio se han escogido metodologías estándar contrastadas en el análisis de riesgos, como son: la metodología QMRA para agentes patógenos y el análisis semicuantitativo propuesto por la normativa UNE-EN 15975-2 para parámetros físico-químicos.

Esto es así debido a que se prioriza el análisis cuantitativo si existen datos reales (es el caso de los agentes patógenos) frente al análisis semicuantitativo. Además, al ser métodos estándar de análisis, los resultados obtenibles son fiables y cabe la posibilidad de comparar fácilmente entre distintos estudios.

- Análisis QMRA para agentes patógenos

Según se ha comentado, el análisis cuantitativo de riesgo microbiológico (QMRA) está basado en la relación dosis-respuesta de los agentes patógenos y se van a utilizar dos modelos: el modelo exponencial y el modelo de distribución de Poisson, priorizando el uso del modelo de Poisson por considerarse menos limitante al tener en cuenta que la probabilidad de infección no es constante.

El modelo exponencial establece que:

$$P_{inf} = 1 - e^{-r \cdot D} \quad [1]$$

Donde:

P_{inf} : probabilidad de infección

r : parámetro de distribución

D : dosis de patógeno

Por su parte, el modelo de distribución de Poisson dice que:

$$P_{inf} = 1 - \left(1 + \frac{D}{\beta}\right)^{-\alpha} \quad \beta \geq 1; \alpha \leq \beta \quad [2]$$

Donde:

P_{inf} : probabilidad de infección

D : dosis de patógeno

β : parámetro de distribución

α : parámetro de distribución

Para alimentar el modelo, los parámetros de distribución (α , β y r) se obtienen de referencias bibliográficas. Seguidamente, se muestran en la *Tabla 10* los parámetros de distribución de los agentes patógenos indicadores de bacterias, virus y protozoos.

Tabla 10

Valores de los parámetros que alimentan al modelo dosis respuesta

Patógeno	α	β	r	Referencia
<i>E. coli</i>	0.1778	$8.6 \cdot 10^7$	-	Haas et al. 1999
<i>Campylobacter</i>	0.145	7.58		Haas et al. 1999
Rotavirus	0.253	0.426	-	EPHC, NRMMC, AHMC, 2006
<i>Cryptosporidium</i>	-	-	0.059	EPHC, NRMMC, AHMC, 2006

Por su parte, la dosis de patógeno viene definida por la siguiente ecuación:

$$D = \frac{c \cdot \frac{\text{exposición}}{\text{evento}}}{\log \text{reducción}} \quad [3]$$

Donde:

D: dosis de patógeno

c: concentración de patógeno

exposición/evento: volumen de exposición (mL)

log reducción: reducción del agente en el tratamiento

Entonces, es necesario conocer el volumen de exposición (mL) por ruta de exposición identificada, basándose también en referencias bibliográficas, así como la concentración de patógenos y el logaritmo de reducción propios del sistema del caso de estudio, obtenidos de los estudios previos de tratamiento escalables al caso de estudio (ver apartados *Caracterización del agua residual influente y efluente* y *Análisis QMRA de agentes patógenos*).

En la *Tabla 11* se observan los volúmenes de exposición de las rutas que se evaluarán en la sección *Análisis QMRA de agentes patógenos*.

Tabla 11

Volúmenes de exposición según la ruta

Rutas de exposición	Volumen ingestión por evento (mL)	Referencia
<i>Ingestión del cultivo para la población en general</i>	1	EPHC, NRMMC, AHMC, 2006
<i>Ingestión indirecta por parte de los regantes</i>	0.01	Murtas et al., 2023
<i>Inhalación por parte de la comunidad vecina</i>	0.0045-0.0069	Murtas et al., 2023
<i>Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina</i>	0.02-0.1	Murtas et al., 2023

Obtenida la probabilidad de infección con el modelo dosis-respuesta, esta se relaciona con la probabilidad de contraer una enfermedad a través de una ratio, también definida por bibliografía, como se puede observar en la *Tabla 12*.

Por último, se caracteriza el riesgo asociado a cada uno de los agentes patógenos como riesgo tolerable o no a través de una comparativa de los AVAD de cada patógeno y lo establecido por la OMS como meta de salud (10^{-6} Años de Vida Ajustados por Discapacidad).

Con el fin de traducir la probabilidad de enfermedad en estas unidades (AVAD) se establece la siguiente ecuación:

$$AVAD_{patógeno} = P_{enfermedad} \cdot AVAD_d \cdot fs \quad [4]$$

Donde

AVAD_{patógeno}: Años de Vida Ajustados por Discapacidad de cada patógeno

P_{enfermedad}: Probabilidad de contraer la enfermedad

AVAD_d: Carga de morbilidad

fs: Fracción susceptible

Cabe destacar que la carga de morbilidad y la fracción susceptible quedan fijadas por bibliografía para cada uno de los agentes patógenos, según se refleja en la *Tabla 12*.

Tabla 12

Parámetros bibliográficos para caracterizar el riesgo de los agentes patógenos

Patógeno	Ratio enf/inf	AVADd	fs	Referencia
<i>E. coli</i>	-	-	-	-
<i>Campylobacter</i>	0.3	0.0046	100	OMS, 2018
Rotavirus	0.5	0.0014	6	OMS, 2018
<i>Cryptosporidium</i>	0.7	0.0015	100	OMS, 2018

De esta forma se obtienen dos niveles posibles tras la evaluación de riesgos asociados a patógenos: riesgo aceptable y riesgo no aceptable. Así, para cada patógeno y ruta de exposición se tendrá un nivel de riesgo asociado.

- Análisis semicuantitativo según norma UNE-EN 15975-2 para parámetros físico-químicos

El análisis semicuantitativo para los parámetros físico-químicos se hace según la fase de apreciación de riesgos de la norma UNE EN 15975-2, que viene dada por la probabilidad del riesgo y la gravedad de sus consecuencias. Concretamente para el caso de estudio, la probabilidad será la combinación de dos factores: probabilidad de exposición humana y probabilidad de que el peligro esté presente. Así, esta evaluación semicuantitativa se va a dividir en tres etapas:

- i) probabilidad de presencia y de exposición
- ii) gravedad de las consecuencias
- iii) evaluación del riesgo por niveles

Cabe destacar que esta metodología, aunque contrastada, lleva asociado un alto grado de subjetividad.

En la primera etapa se van a definir cinco niveles de probabilidad de que el peligro esté presente (ordenados desde “Muy improbable” hasta “Seguro”) y cinco niveles con el mismo orden de probabilidad de exposición humana. Entonces, a cada uno de los agentes peligrosos se le asignarán dos niveles de probabilidad: uno por presencia y otro por exposición. La probabilidad por presencia vendrá dada por la concentración del agente peligroso en el agua regenerada y dependerá de si el tratamiento es capaz de eliminar dicho contaminante del agua residual. Por otra parte, la probabilidad de exposición se determinará de manera teórica, según la descripción de los diferentes agentes peligrosos.

Se podría tener en cuenta, para este factor, la formación de los trabajadores, la ruta del agua de salida o las posibles barreras (por ejemplo, vallas) que dificultarían la exposición humana. No obstante, como caso de estudio y por no tener acceso a esta información, el nivel de probabilidad asociada a la exposición humana se va a hacer según lo comentado (descripción de los distintos agentes peligrosos).

Para la obtención de la probabilidad combinada de peligro y exposición de cada uno de los agentes físico-químicos, se plantea una tabla, en la que el grado de verdad varía del 1 al 5 (en la que 1 significa “Muy Improbable” y 5 significa “Seguro”), según se muestra a continuación.

Tabla 13

Grado de verdad de la probabilidad combinada del riesgo

		Probabilidad de peligro presente				
		<i>Muy improbable</i>	<i>Improbable</i>	<i>Probable</i>	<i>Casi Seguro</i>	<i>Seguro</i>
Probabilidad de exposición humana	<i>Muy improbable</i>	1	2	3	4	5
	<i>Improbable</i>	2	4	6	8	10
	<i>Probable</i>	3	6	9	12	15
	<i>Casi Seguro</i>	4	8	12	16	20
	<i>Seguro</i>	5	10	15	20	25

Nota. Elaboración propia (2024)

Teniendo en cuenta que la probabilidad es una combinación de dos factores con la misma escala de medida, se observa que los niveles de la tabla de verdad abarcan desde el 1 hasta el 25. No obstante, y debido a que se quiere que el rango de probabilidad abarque cinco niveles (desde “Muy improbable” hasta “Seguro”) se divide los valores de verdad en 5 rangos, como se puede observar a continuación.

- Muy improbable (valor numérico de 1): del 1 al 5
- Improbable (valor numérico de 2): del 6 al 10
- Probable (valor numérico de 3): del 11 al 15
- Casi Seguro (valor numérico de 4): del 16 al 20
- Seguro (valor numérico de 5): del 21 al 25

De modo que la tabla de probabilidad combinada resultante es de la siguiente forma:

Tabla 14

Grado de verdad de la probabilidad combinada del riesgo

		Probabilidad de peligro presente				
		Muy improbable	Improbable	Probable	Casi seguro	Seguro
Probabilidad de exposición	Muy improbable	Muy improbable (1)				
	Improbable	Muy improbable (1)	Improbable (2)			
	Probable			Probable (3)		
	Casi Seguro			Casi seguro (4)		
	Seguro			Probable (3)	Seguro (5)	

Nota. Elaboración propia (2024)

En la siguiente etapa (gravedad de las consecuencias), se diferenciarán cinco niveles: “Insignificante”, “Leve”, “Moderada”, “Grave” y “Muy grave”. Cabe destacar que, los niveles de gravedad se van a ponderar del 1 al 5, desde “Insignificante” hasta “Muy grave”, para facilitar la posterior evaluación del riesgo.

En este caso, asignar el agente peligroso dentro de un nivel u otro de gravedad va a depender de si la concentración del agente peligroso en el agua regenerada (ver apartado *Caracterización del agua residual influente y efluente*) supera niveles admitidos para la salud establecidos por la OMS (ver apartado *Riesgos asociados a los contaminantes del agua residual urbana*).

Si no se encuentran dichos niveles de la OMS se establecerá el nivel de gravedad de forma teórica, por ejemplo, un agente peligroso que pueda provocar que una persona contraiga una enfermedad crónica o que entre sus síntomas se encuentre la mortalidad se va a asociar con un nivel de consecuencia “Muy grave”, mientras que un agente peligroso con síntomas como puede ser dolor abdominal o diarrea en un periodo corto de tiempo se considera una gravedad “Leve” y un agente peligroso con síntomas mínimos o sin síntomas se considera “Insignificante”.

En la última etapa de la evaluación semicuantitativa de riesgos físico-químicos y de reciente preocupación se combina la probabilidad combinada (peligro y exposición) obtenida con la gravedad de las consecuencias.

Existen multitud de combinaciones posibles para determinar el nivel de riesgo, dependiendo del número de niveles que se pretendan conseguir o de los objetivos del análisis.

En este caso se trabaja con la matriz propuesta por la norma UNE-EN descrita previamente (*Tabla 9*), 5x5, adaptada a los niveles de probabilidad y gravedad concretos del caso de estudios. A continuación, se muestra la matriz de riesgos utilizada.

Tabla 15

Matriz de riesgos adaptada al caso de estudio

		Probabilidad combinada (1-5)				
		Muy improbable	Improbable	Probable	Casi seguro	Seguro
Gravedad de las consecuencias (1-5)	Insignificante	1	2	3	4	5
	Leve	2	4	6	8	10
	Moderada	3	6	9	12	15
	Grave	4	8	12	16	20
	Muy grave	5	10	15	20	25

Nota. Elaboración propia (2024)

Como se puede ver en la *Tabla 15*, la combinación que se ha escogido para obtener un nivel de riesgo es por multiplicación del nivel de probabilidad y el nivel de gravedad, según lo ejemplificado en la norma UNE-EN. Los valores van de 1 a 25, pero para el presente caso de estudio se opta por establecer un requisito de obtención de tres niveles en la evaluación del riesgo: aceptable, asumible, pero aconsejable adoptar medidas, y no aceptable, con necesidad de adopción de medidas. Por tanto, es necesario clasificar en rangos para la obtención del nivel del riesgo descrito.

Con el fin de dar prioridad a la seguridad y salud de los trabajadores y personas que puedan verse afectadas por las consecuencias causadas por los agentes contaminantes, se da más peso al nivel de riesgo descrito como no aceptable, con necesidad de adopción de medidas. El criterio propuesto la clasificación en tres niveles es el siguiente:

- Nivel aceptable: rango de valores 1 al 5
- Nivel asumible, pero aconsejable adopción de medidas: rango de valores 6 al 13
- Nivel no aceptable: rango de valores 14 al 25

A continuación, se muestra la tabla de evaluación de riesgos asociadas a los agentes físico-químicos y de preocupación emergente, tras la combinación de probabilidad combinada y gravedad, así como la distinción en niveles.

Tabla 16

Matriz de riesgos para los tres niveles establecidos

		Probabilidad combinada				
		Muy improbable (1)	Improbable (2)	Probable (3)	Casi seguro (4)	Seguro (5)
Gravedad de las consecuencias	Insignificante (1)	NIVEL ACEPTABLE				
	Leve (2)	NIVEL ACEPTABLE				
	Moderada (3)	NIVEL ASUMIBLE, PERO ACONSEJABLE ADOPCIÓN DE MEDIDAS				
	Grave (4)	NIVEL ASUMIBLE, PERO ACONSEJABLE ADOPCIÓN DE MEDIDAS				
	Muy grave (5)	NIVEL NO ACEPTABLE				

Nota. Elaboración propia (2024)

Así quedarían evaluados los riesgos asociados a los contaminantes físico-químicos y de creciente preocupación que se identifiquen para el caso de estudio en concreto y para cada una de las rutas de exposición establecidas.

La tabla previa expresa la necesidad de adoptar medidas para los contaminantes físico-químicos con un nivel “No aceptable de riesgo”, a los que se le debe dar prioridad en la adopción de medidas. En consecuencia, las posteriores etapas, no solo de establecimiento de medidas, sino también de monitorización y vigilancia deben ir más enfocadas a los riesgos considerados prioritarios (en este caso los de nivel no aceptable), aunque también se deben tener en cuenta los riesgos de nivel asumible.

3.1.3.4. Requisitos adicionales

Los requisitos adicionales tales como metales, contaminantes prioritarios o cualquier otro contaminante propio de la instalación se tienen en cuenta ya en la identificación de peligros y su posterior evaluación. Por tanto, este apartado está incluido en etapas previas del Plan de Gestión del Riesgo, con el fin de facilitar su elaboración y entendimiento.

3.1.3.5. Identificación de medidas

Esta sección conlleva el establecimiento de medidas y los sistemas de control de calidad. Concretamente para el caso de estudio, no se plantean procedimientos de control de calidad, pues son protocolos de operación que no son objeto de estudio. Por su parte, se proponen medidas según el riesgo asociado como resultado de la evaluación de riesgos, suponiendo que no existen actualmente medidas preventivas.

Asimismo, se va a estimar el riesgo residual tras la implantación de medidas para establecer los parámetros críticos a monitorizar, así como los requisitos a alcanzar en el efluente para la consecución de riesgos aceptables para la salud humana.

En resumen, este módulo se desarrollará en las siguientes etapas: identificación de peligros y rutas de exposición, elección del tipo de análisis, la evaluación de los riesgos patógenos y físico-químicos, y la propuesta de medidas.

3.1.4. Módulo III. Monitoreo

El módulo III incluye procedimientos de control para cumplir los requisitos de seguimiento establecidos por normativa (ver apartado *Normativa aplicable*), muestreos y análisis con ubicación y frecuencia, e implantación de sensores o analizadores en tiempo real, así como un sistema de vigilancia ambiental.

3.1.4.1. Procedimientos y sistemas de control

Concretamente para el caso de estudio, puesto que el sistema es teórico y no se han establecido puntos de muestreo específicos, como procedimientos y sistemas de control se van a establecer los parámetros a monitorizar y estrategias de control y análisis de una forma teórica, que formarían parte del diseño del sistema.

Además, se incluye la importancia del rol que pueden desarrollar las herramientas digitales como sistemas de detección temprana, sin las cuales difícilmente se podrá cumplir con el objetivo de asegurar el uso seguro del agua residual reutilizada, aunque sí se cumpla la legislación (Radini et al., 2023).

3.1.4.2. Sistemas de control medioambiental

Teniendo en cuenta el alcance del Plan de Gestión del Riesgo (agua regenerada para cultivo agrícola y riesgos asociados a la salud humana) no se considera objeto de estudio el establecimiento de un sistema de vigilancia ambiental.

Por tanto, este módulo consta únicamente del primero de los elementos (procedimientos y sistemas de control).

3.1.5. Módulo IV. Coordinación y Gestión

Este módulo consta del establecimiento de sistemas de gestión de incidencias y emergencias, así como mecanismos de coordinación entre las partes involucradas en el sistema.

Sin embargo, para este caso de estudio esta sección no es de alcance del Plan de Gestión del Riesgo, puesto que no se considera información relevante respecto a la viabilidad de un sistema basado en microalgas, ya que se asume que esta información sería análoga a cualquier otro sistema de tratamiento y reutilización de agua.

Finalmente, se identifican las limitaciones encontradas a lo largo del estudio con el propósito de poder mitigarlas o minimizarlas en futuros estudios, desarrollándolas en el apartado *Limitaciones y futuros estudios*.

En resumen, los pasos a seguir para la elaboración del Plan de Gestión del Riesgo en el caso concreto de estudio y con las suposiciones y limitaciones mencionadas son los que se muestran en la figura a continuación.

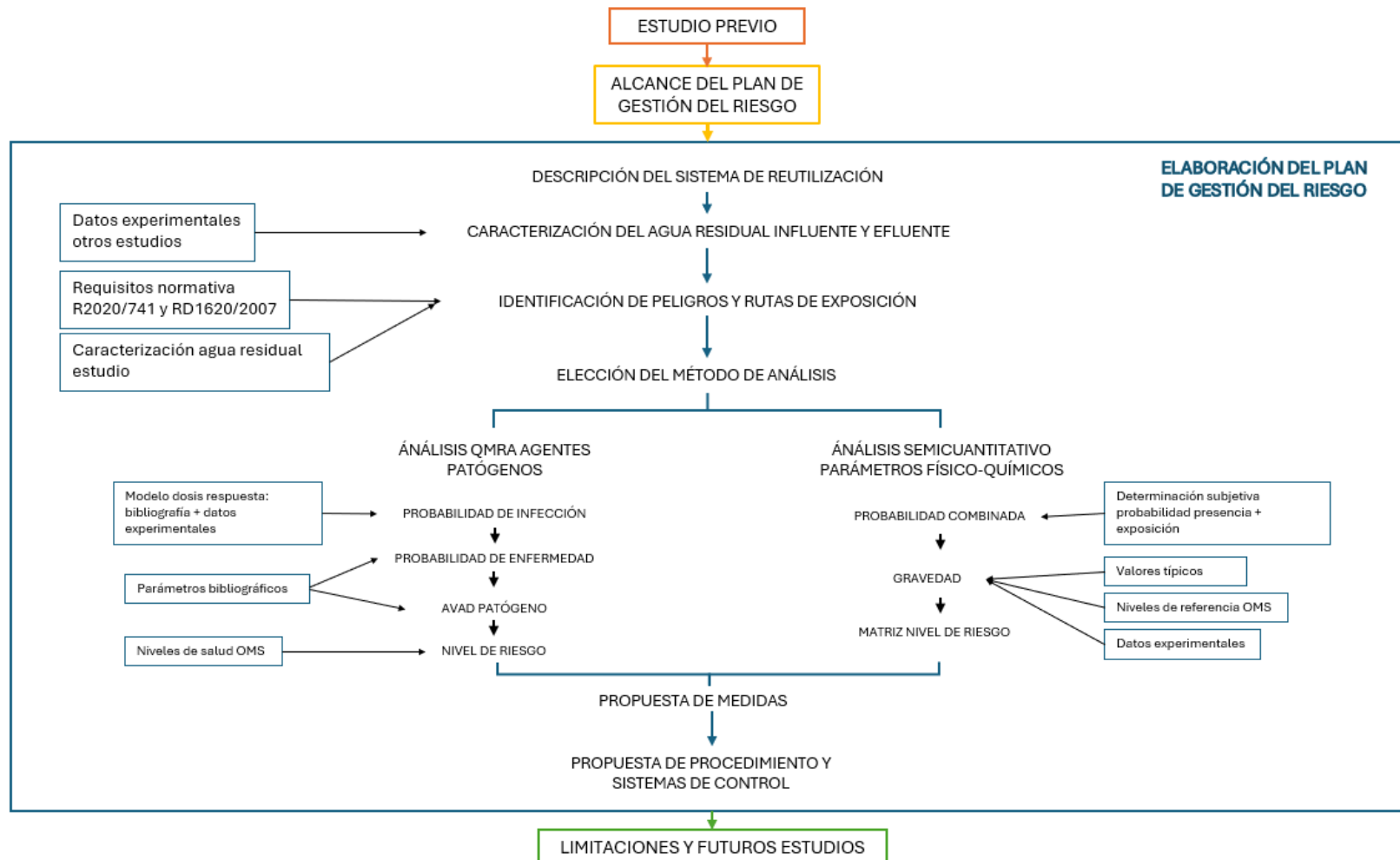


Figura 4

Esquema resumen de la metodología aplicada al caso de estudio

Nota. Elaboración propia (2024)

3.2. Caso de estudio

El caso de estudio se plantea como instalación alternativa a la actual EDAR del Carraixet.

La EDAR Cuenca de Carraixet, en Alboraya (Valencia), prestar servicio a 13 municipios de la provincia de Valencia, sumando un total de 153 330 habitantes equivalentes en 2022, según datos de la Entidad Pública de Saneamiento de Aguas Residuales (EPSAR).

Las aguas residuales y pluviales son recogidas mediante una red de colectores, y una vez llegan a planta son pretratadas en la etapa de desbaste, constituido por rejillas de sólidos gruesos, medios y finos. Posteriormente, el agua pasa por un desarenador-desengrasador con aportación de aire, y una decantación primaria mediante tres decantadores. El tratamiento biológico es un sistema de fangos activos de media carga y aporte de oxígeno, con cuatro reactores. Cabe destacar que dos de los reactores fueron posteriormente construidos para permitir la eliminación de nitrógeno de las aguas residuales. El efluente de los reactores llega a dos decantadores, que reparten el agua para su vertido al cauce del Barranco del Carraixet previo paso por el canal de cloración o al tratamiento terciario. Este tratamiento terciario cuenta con cámaras de mezcla y coagulación-floculación, decantadores lamelares, discos filtrantes de tela y desinfección ultravioleta complementada con dosis de hipoclorito. El punto de entrega de la salida del tratamiento terciario es la Acequia de Rascanya, para su uso por la Comunidad de Regantes.

Por su parte, la línea de fangos, consta de espesadores de fango primario y secundario por gravedad y flotación respectivamente, digestión anaerobia de fangos y deshidratación mediante decantadores centrífugos.

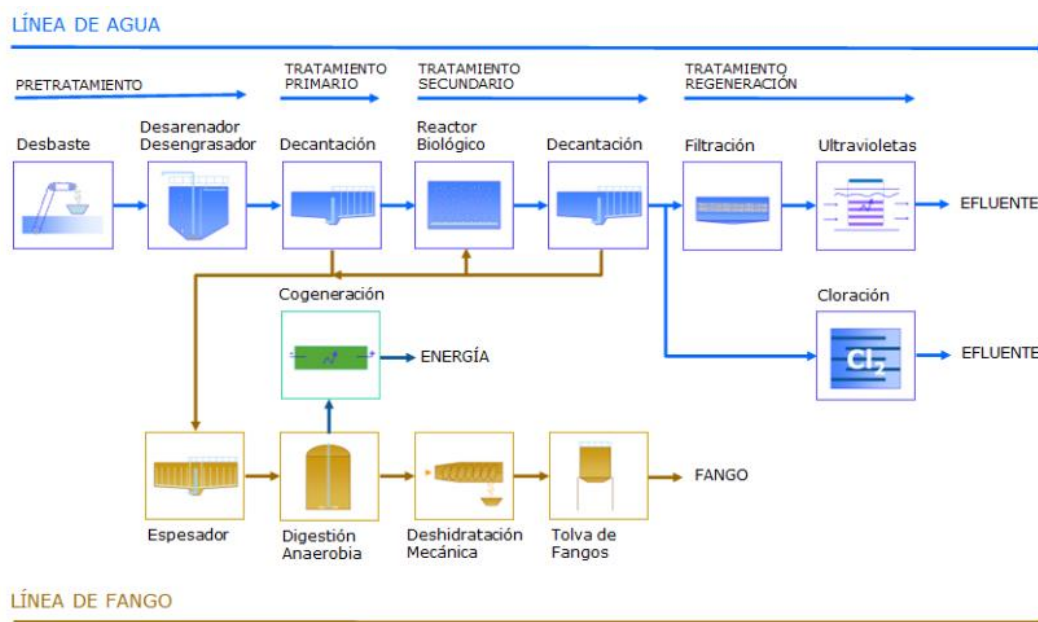


Figura 5

Diagrama de bloques del proceso en la EDAR Cuenca del Carraixet

Nota. Tomado de EPSAR (<https://www.epsar.gva.es/index.php/va/cuenca-del-carraixet>)

Descrita la instalación real, el caso de estudio es una simulación de esta instalación en paralelo con un sistema de algas. A continuación, se desarrolla cómo se introduce el sistema de microalgas dentro de esta instalación.

Las etapas de pretratamiento y tratamiento primario son idénticas a las comentadas previamente. A partir de este punto, una fracción del flujo de entrada al tratamiento biológico se deriva a un estanque de canal abierto con cultivo de microalgas seguido de una etapa de ultrafiltración (en adelante, UF). Esta fracción al sistema de microalgas sería variable, dependiendo de la capacidad de tratamiento de las algas respecto a las condiciones ambientales y a el estado biológico del cultivo (Mora-Sánchez et al., 2024).

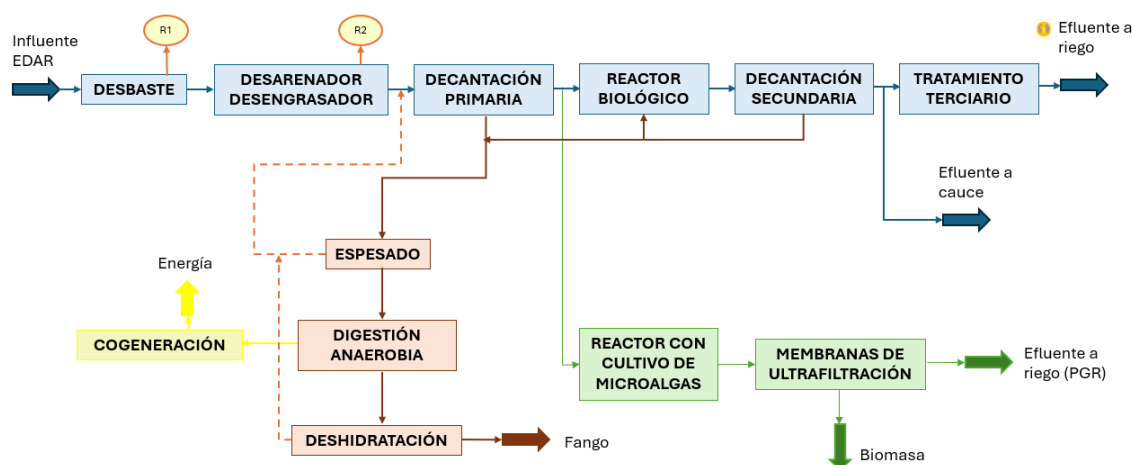


Figura 6

Diagrama de bloques del caso de estudio

Nota. Elaboración propia (2024)

Se puede observar que ambos efluentes (el generado por sistema de fangos activados con tratamiento terciario y el generado por el tratamiento con microalgas) serían en principio aptos para riego. Sin embargo, el Plan de Gestión del Riesgo se centra solo en el efluente del tratamiento con microalgas, tal y como se puede entender en el apartado *Descripción del Sistema de Reutilización*.

En la *Figura 7* se puede observar con claridad el sistema alcance de estudio del Plan de Gestión del Riesgo. A pesar de que el sistema que abarca el Plan de Gestión del Riesgo es el encuadrado en color morado, los datos recogidos en *Estudios previos* se obtienen de diferentes puntos del sistema (tras el pretratamiento, decantación primaria y decantación secundaria). Esto es así debido a que no se posee información sobre la caracterización del agua bruta, y solo afecta al análisis QMRA, debiendo utilizarse la entrada a la EDAR como valor referencia para el cálculo del log reducción. Esto quiere decir que se tendrán reducciones de patógenos inferiores a las que se tendrían realmente, quedándose del lado de la seguridad en la evaluación de riesgos patógenos.

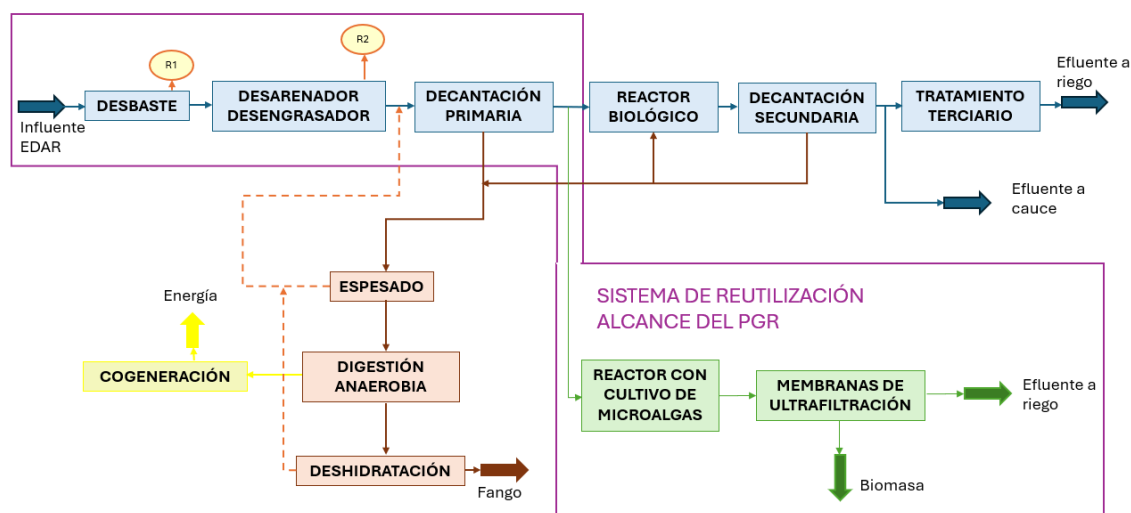


Figura 7

Diagrama de bloques del sistema de reutilización del Plan de Gestión del Riesgo

Nota. Elaboración propia (2024)

3.3. Estudios previos

Para poder elaborar el Plan de Gestión del Riesgo, así como ayudar en la identificación de los parámetros de riesgo y en la evaluación del riesgo asociado a ellos, se debe estudiar la caracterización del agua de la EDAR Cuenca del Carraixet, tanto en el influente como en el efluente y puntos intermedios.

Teniendo en cuenta que el sistema de reutilización alcance del Plan de Gestión del Riesgo es el que se muestra en la *Figura 7*, será de especial interés, además del efluente a riego, la corriente de bruta entrada de agua y de entrada al reactor de microalgas. Puesto que no se posee información sobre la caracterización del agua bruta, los datos recogidos son del efluente de la decantación y del pretratamiento, también válidos para la identificación de potenciales peligros. Sí afecta a los rendimientos de eliminación en el QMRA, que serán inferiores, y, por lo tanto, el análisis más conservador.

Los datos mostrados en este apartado son resultados experimentales llevados a cabo en un reactor piloto de microalgas (8L) con filtración (0.2 μm) a escala de laboratorio (Rojas-Castillo, 2023), y resultados tras el uso de diferentes membranas (Celina-Barreiro, 2020; De León, 2023). Debido a que el sistema de estudio es un sistema de cultivo de microalgas con posterior etapa de membranas, son datos que se consideran escalables a este caso de estudio y por tanto, se asumen válidos para el análisis del riesgo.

Estos datos van a ser utilizados para la etapa de caracterización del agua residual, así como para la evaluación de riesgos dentro del Plan de Gestión del Riesgo, contribuyendo a su vez para la identificación de potenciales peligros.

En el trabajo experimental, se hicieron diversas pruebas mezclando efluentes de diferentes etapas del proceso (tratamiento primario, tratamiento secundario y sobrenadante del digestato de la digestión anaerobia de fangos “digestato”) con el fin de observar el desarrollo de las microalgas (Rojas-Castillo, 2023).

En el caso concreto del sistema de estudio, el tratamiento con microalgas utiliza el efluente de la decantación primaria del sistema convencional solo, o mezclado con el sobrenadante del digestato de la digestión anaerobia de fangos. En la *Tabla 17* se muestra la caracterización del afluente a nuestro sistema de tratamiento de microalgas, mostrando los valores mínimos (correspondientes a efluente primario únicamente) y máximos (70% de primario mezclado con 30% de digestato). Esta caracterización corresponde a valores medios de 6 muestras de la EDAR Cuenca del Carraixet en diferentes fechas.

Tabla 17

Caracterización del afluente al sistema de microalgas (salida de la decantación primaria)

Parámetro	Unidad	Intervalo (mín-máx)
$N-NH_4$	mg N/L	20.20 – 134.20
$N-NO_3$	mg N/L	3.40 - 40.80
$P-PO_4$	mg P/L	2.30 – 4.90
Sólidos suspendidos totales	mg/L	82 – 200
Sólidos suspendidos volátiles	mg/L	64 – 130
pH	mg/L	8.10 – 7.60
DQO	mg/L	161 – 374
DQOs	mg/L	71 – 112
Turbidez	NTU	20 – 131
Conductividad	µs/cm	1574 - 2815

Nota. Tomado de Rojas-Castillo (2023)

En el trabajo experimental, el efluente fue llevado a un reactor de laboratorio con un cultivo de microalgas y posteriormente filtrado simulando el uso de membranas de microfiltración (en adelante MF), con tamaño de poro de 0.2 µm. Así, tras la filtración con un filtro de tamaño de poro de 0.2 µm, los resultados son los que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 18

Caracterización del efluente tras la MF

Parámetro	Unidad	Valor mínimo	Valor máximo
$N-NH_4$	mg N/L	0.16±0.01	5.13±0.10
$N-NO_3$	mg N/L	1.54±0.30	17.09±0.22
$P-PO_4$	mg P/L	0.10±0.04	0.40±0.01
Sólidos suspendidos totales	mg/L	< LD*	
Sólidos suspendidos volátiles	mg/L	< LD*	
pH	mg/L	7.57±0.01	8.66±0.01
DQO	mg/L	115±0.00	120±0.00
DQOs	mg/L	110±0.00	119±0.00
<i>E. coli</i>	UFC/100mL	Sin presencia	
Turbidez	NTU	0.10±0.14	0.21±0.12
Conductividad	µS/cm	1340±2.83	2235±7.07

*LD: límite de detección

Nota. Tomado de Rojas-Castillo (2023)

Además, se llevó a cabo la caracterización de metales tales como níquel, cromo, cobre, plomo, zinc, cadmio, mercurio, arsénico, selenio y boro en una de las muestras efluentes del fotobioreactor (*Tabla 19*).

Tabla 19*Caracterización de metales pesados a la salida del sistema*

Parámetro	Concentración	Límite Detección (LD)	Límite cuantificación (LC)	Límite RD1620/2007
Níquel	< LD	0.266 mg/L	0.888 mg/L	0.2 mg/L
Cromo	< LD	0.344 mg/L	1.148 mg/L	0.1 mg/L
Cobre	< LD	0.033 mg/L	0.109 mg/L	0.2 mg/L
Plomo	< LD	0.280 mg/L	0.933 mg/L	-
Zinc	0.060±0.0007 mg/L	0.007 mg/L	0.023 mg/L	-
Cadmio	< LD	0.009 mg/L	0.029 mg/L	0.01 mg/L
Mercurio	< LD	0.406 µg/L	1.353 µg/L	-
Arsénico	< LD	0.361 µg/L	1.204 µg/L	100 µg/L
Selenio	< LC	0.017 µg/L	0.058 µg/L	20 µg/L
Boro	1.76±0.063 µg/L	0.45 µg/L	1.5 µg/L	500 µg/L

Nota. Tomado de Rojas-Castillo (2023)

Se puede observar en el caso de los metales que en la mayoría de los casos el valor está situado por debajo del límite de detección, por lo que se puede asumir que el agua influente a la EDAR del Carraixet no contiene de forma genérica presencia de metales pesados. Además, para los metales sí detectados, los valores no están muy por encima del límite de cuantificación, por lo que, aunque sí están presentes, no parecen concentraciones demasiado relevantes. De hecho, la concentración del boro está por debajo de lo establecidos por la legislación actual (RD1620/2007), mientras que para el Zn no se establece límite máximo.

En realidad, el caso de estudio considera membranas de UF (González-Camejo, 2019), mientras que los valores expuestos en las tablas previas consideran un tamaño de poro de 0.2 µm (MF). Aunque el comportamiento no sea idéntico, se considera válida la caracterización del efluente, teniendo en cuenta que el tamaño de poro de las membranas de UF es más pequeño y que de esta forma la evaluación del riesgo para estos parámetros será más conservadora.

Por otra parte, en otro trabajo previo se determinaron los microorganismos patógenos *Escherichia coli*, *Salmonella* spp y huevos de helmintos tras una filtración por membranas de UF y membranas dinámicas (en adelante MD) de una planta piloto ubicada en la EDAR Cuenca del Carraixet (Celina-Barreiro, 2020). Los agentes patógenos se midieron en el influente a la UF y MD (proveniente de la decantación primaria), en el permeado y en el fango. En este punto se cree necesario describir las diferencias entre membranas y considerar si son o no escalables al presente caso de estudio.

Las MD consisten en un material soporte que puede ser de membrana, malla, filtro de tela que, durante la filtración, forma una capa de biomasa que impide que las partículas ensucien el material soporte (Alepu et al., 2016). Este soporte secundario generado, que tiene tamaños de poro mayores a 1 µm, hace que la frecuencia de limpieza sea menor a la que se requiere en membranas de UF (Nascimento et al., 2020). Las de UF, en cambio, tienen tamaños de poro menores a 0.1 µm, lo cual supone una eliminación de partículas más pequeñas que las MD o de MF, aunque la limpieza necesaria sea con mayor frecuencia.

Para el interés del caso de estudio, los resultados con MD se consideran escalables, teniendo en cuenta que el caso de estudio plantea membranas de UF y la eliminación de agentes peligrosos con UF será mayor. Entonces, la evaluación de riesgos será más conservadora. Además, la caracterización de riesgos con tres tipos de membrana diferentes (MD, MF y UF) permitirá realizar una comparación entre las mismas en cuanto a riesgos para la salud humana se refiere.

Se muestra en la *Tabla 20*, *Tabla 21* y *Tabla 22* el resultado obtenido para el permeado y el influente en diferentes fechas en marzo de 2020 para los patógenos *Escherichia coli*, *Salmonella* spp y huevos de helmintos.

Tabla 20

Recuento de E.Coli en UFC/100mL en planta piloto de membranas de UF y MD de la EDAR Cuenca del Carraixet con entrada el efluente de la decantación primaria

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Entrada a UF y MD	ND	8.92E+05	2.91E+06	2.82E+06	3.18E+06
Permeado UF	<1	9.09E+01	<1	<1	<1
Permeado MD	ND	2.27E+06	2.73E+06	1.45E+06	1.91E+06

ND: no disponible

Nota. Tomado de Celina-Barreiro (2020)

Tabla 21

Detección de Salmonella spp en planta piloto de membranas de UF y MD de la EDAR Cuenca del Carraixet con entrada el efluente de la decantación primaria

	Muestra 1	Muestra 2
Entrada a UF y MD	Ausencia/100mL	Ausencia/100mL
Permeado UF	Ausencia/100mL	Ausencia/100mL
Permeado MD	Ausencia/100mL	Ausencia/100mL

Nota. Tomado de Celina-Barreiro (2020)

Tabla 22

Recuento de huevos de helminto en planta piloto de membranas de UF y MD de la EDAR Cuenca del Carraixet expresado en huevos/L con entrada el efluente de la decantación primaria

	M1	M2	M3	M4
Entrada a UF y MD	<1*	20	<1*	20
Permeado UF	<0.5*	<0.5*	<0.5*	<0.5*
Permeado MD	<1*	<1*	<1*	<1*

*Ausencia de huevos de helminto en el volumen analizado

Nota. Tomado de Celina-Barreiro (2020)

Cabe señalar que otros estudios realizados en 2023 de control de patógenos para aguas regeneradas para uso agrícola para la EDAR Cuenca del Carraixet tras un tratamiento de membrana de UF (con agua proveniente de decantación secundaria) que sirve de tratamiento terciario y un tratamiento anaerobio de membrana, AnMBR, tras el pretratamiento, con membrana de UF (escalable por similitud en las membranas), arrojaron resultados similares.

En este caso se determinó, además de *E.coli*, huevos de helminto y *Salmonella* spp., otros patógenos como *Legionella* spp., *Clostridium perfringens* y colifagos somáticos (De León, 2023). Se concluyó en este estudio que no existía presencia en el efluente de *Salmonella* spp., *Legionella* spp. y huevos de helminto (De León, 2023). Los resultados obtenidos para colifagos somáticos y esporas de *Clostridium perfringens* se muestran en la tabla a continuación.

Tabla 23

Recuento de colifagos somáticos en planta piloto de membranas de UF y AnMBR de la EDAR Cuenca del Carraixet expresado en UFP/mL

	M1 UF	M2 UF	M3 AnMBR
Entrada a UF/AnMBR*	6	3.5	10
Permeado UF/AnMBR	0.5	Sin presencia	5

*Entrada a UF desde decantación y a AnMBR desde pretratamiento

Nota. Tomado de De León (2023)

Tabla 24

Recuento de esporas de Clostridium perfringens en planta piloto de membranas de UF y AnMBR de la EDAR Cuenca del Carraixet expresado en UFC/100mL

	M1 UF	M2 UF	M3 AnMBR	M4 AnMBR	M5 AnMBR
Entrada a UF/AnMBR	$9 \cdot 10^3$	422	$9 \cdot 10^4$	$1.2 \cdot 10^5$	$8.94 \cdot 10^4$
Permeado UF/AnMBR	Sin presencia	Sin presencia	1.5	Sin presencia	1.5

*Entrada a UF desde decantación y a AnMBR desde pretratamiento

Nota. Tomado de De León (2023)

En la sección *Caracterización del agua residual influente y efluente* se detallan los valores de parámetros del sistema utilizados para la evaluación de riesgos asociados a ellos. Puesto que no se observan diferencias relevantes entre las diferentes entradas (agua de pretratamiento, decantación primaria y decantación secundaria), se englobarán dentro de “influyente del sistema”, teniendo en cuenta en los resultados que el análisis QRMA es más restrictivo que si se evaluase el agua bruta.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se muestra el Plan de Gestión del Riesgo para el agua regenerada obtenida mediante un sistema de microalgas, diferenciando los cuatro módulos en los que se dividen los 11 elementos clave de gestión del riesgo establecidos en la normativa vigente (ver apartado *Plan de Gestión del Riesgo*), con las puntualizaciones detalladas en la metodología.

4.1. Módulo I. El Sistema de Reutilización

Este primer módulo engloba la descripción del sistema de reutilización y la caracterización del agua residual entrante al sistema objeto del Plan de Gestión del Riesgo y del efluente del mismo.

4.1.1. Descripción del Sistema de Reutilización

El Sistema de Reutilización objeto del Plan de Gestión del Riesgo es el que se muestra en la *Figura 8*, y consiste principalmente en un reactor de microalgas al que llega agua desde la decantación primaria, y una posterior etapa de UF. Así, el efluente (permeado) puede ser entregado para su uso por los regantes.

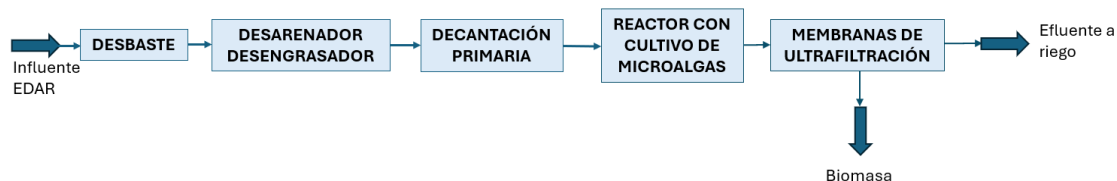


Figura 8

Sistema de reutilización de agua objeto del Plan de Gestión del Riesgo

Nota. Elaboración propia (2024)

Concretamente, se trata de un M-HRAP (del inglés “mebrane-coupled high-rate algae pond”), es decir, un reactor de microalgas de fácil operación y un acoplamiento de membranas de UF para la separación sólido-líquido (recolección de la biomasa) así como para producir un agua de alta calidad (con niveles insignificantes de patógenos y sólidos en suspensión) (Robles et al., 2020). El reactor de microalgas cuenta con una rueda de paletas para conseguir la mezcla.

El reactor dispone de sondas para la medición de parámetros clave para el control del proceso, es decir, un transmisor de pH-T, una sonda de oxígeno disuelto, un caudalímetro y un sensor de irradiación. Para el seguimiento del funcionamiento de la la membrana se cuenta con dos líquidos transmisores de caudal, tres transmisores de nivel, un transmisor de presión para controlar la presión transmembrana, un transmisor de presión de aire y un medidor de flujo de aire para el lavado de membranas (Robles et al., 2020). A continuación, se muestra una imagen del diagrama del sistema, así como una imagen real del sistema M-HRAP.

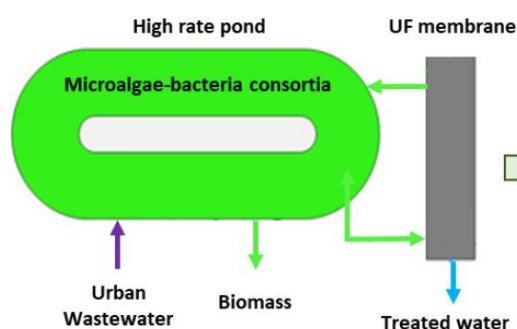


Figura 9

Diagrama de flujo del sistema

Nota. Tomado de Robles et al. (2020)



Figura 10

Sistema de microalgas (reactor “open raceway pond”)

Nota. Imagen real del reactor del proyecto “MicroAlgae 4.0 (Ancona, Abril 2024)”



Figura 11

Imagen genérica del acoplamiento al sistema de microalgas (tanques de membranas de UF)

El efluente de las membranas de UF, comúnmente llamado permeado, es el punto de interés en la elaboración del Plan de Gestión del Riesgo, pues se quiere evaluar su uso para riego agrícola en base a los riesgos asociados a la salud humana.

Teniendo en cuenta que según el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA) en la Encuesta sobre Superficies y Rendimientos de Cultivos (ESYRCE, 2023), los riegos por aspersión y automotriz, presentes en hortalizas, cereales y forrajeras, están prácticamente desapareciendo, y que los cultivos que mayor superficie ocupan en el territorio valenciano son los cítricos, se entiende que el modo de riego no es por aspersión, sino por goteo.

Así, según el cultivo receptor (cítricos), el tipo de sistema (microalgas con UF) y el método de riego (por goteo), la calidad del agua requerida es del tipo A, B o C. Cabe destacar que la calidad requerida no afecta al análisis de riesgos a realizar, pero sí al seguimiento y requisitos establecidos en la normativa.

4.1.2. Caracterización del agua residual influente y efluente

La caracterización del agua residual influente y efluente del tratamiento con microalgas queda descrita en el apartado *Estudios previos*. Aun así, se muestra en las siguientes secciones la caracterización de manera resumida en tablas.

4.1.2.1. Agentes patógenos

En la *Tabla 25* se muestra en resumen la caracterización de agentes patógenos de interés a la entrada y salida al sistema de reutilización. Tal y como se ha comentado en el apartado *Estudios previos*, en realidad, es la entrada al sistema de microalgas con datos aportados en otros puntos del sistema (tras la decantación primaria, decantación secundaria o tras el pretratamiento) al no poseer información sobre la entrada al sistema de reutilización y al no observarse diferencias relevantes entre ellas que vayan a afectar al análisis. De hecho, el análisis QMRA será más conservador.

Tabla 25

Caracterización de agentes patógenos del influente y efluente del sistema

Agente patógeno	Uds	N	Entrada	Permeado UF	Permeado MD	Referencia
<i>E. coli</i>	UFC/100mL	4*	2.97E+06± 1.87E+05	1.00±0.00	2.03E+06±6.4 8E+05	Celina-Barreiro (2020)
<i>Salmonella</i>	-/100mL	2	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Celina-Barreiro (2020)
Nemátodos	huevos/L	4	20	Ausencia	Ausencia	Celina-Barreiro (2020)
Agente patógeno	Unidades	N	Entrada	Permeado UF	Permeado AnMBR	Referencia
Colifagos somáticos	UFP/mL	2	4.75	0.25	-	De León (2023)
Colifagos somáticos	UFP/mL	1	10	-	5	De León (2023)
<i>Clostridium perfringens</i>	UFC/100mL	2	4.71E+03	Ausencia	-	De León (2023)
<i>Clostridium perfringens</i>	UFC/100mL	3	9.98E+04± 1.75E+04	-	1.0±0.87	De León (2023)

*Eliminado el outlier "M2" de *E. coli*

4.1.2.2. Parámetros físico químicos

A continuación, se muestran los valores disponibles de los parámetros físico-químicos para el análisis de riesgos, tanto en el influente al sistema de microalgas (salida de la decantación primaria) como en el efluente del mismo.

Tabla 26

Caracterización físico-química del influente (salida de la decantación primaria) y efluente del sistema

Parámetro	Unidad	Intervalo influente		Intervalo efluente		Referencia
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	
<i>N-NH₄</i>	mg N/L	20.20	134.20	0.16	5.13	Rojas-Castillo (2023)
<i>N-NO₃</i>	mg N/L	3.40	40.80	1.54	17.09	Rojas-Castillo (2023)
<i>P-PO₄</i>	mg P/L	2.30	4.90	0.10	0.40	Rojas-Castillo (2023)
<i>SST</i>	mg/L	82	200	< LD		Rojas-Castillo (2023)
<i>SSTV</i>	mg/L	64	130	< LD		Rojas-Castillo (2023)
<i>pH</i>	mg/L	8.10	7.60	7.57	8.66	Rojas-Castillo (2023)
<i>DQO</i>	mg/L	161	374	115	120	Rojas-Castillo (2023)
<i>DQOs</i>	mg/L	71	112	110	119	Rojas-Castillo (2023)
<i>Turbidez</i>	NTU	20	131	0.10	0.21	Rojas-Castillo (2023)
<i>Conductividad</i>	μs/cm	1574	2815	1340	2235	Rojas-Castillo (2023)
<i>Níquel</i>	mg/L	-		< LD		Rojas-Castillo (2023)
<i>Cromo</i>	mg/L	-		< LD		Rojas-Castillo (2023)
<i>Cobre</i>	mg/L	-		< LD		Rojas-Castillo (2023)
<i>Plomo</i>	mg/L	-		< LD		Rojas-Castillo (2023)
<i>Zinc</i>	mg/L	-		0.060		Rojas-Castillo (2023)
<i>Cadmio</i>	mg/L	-		< LD		Rojas-Castillo (2023)
<i>Mercurio</i>	μg/L	-		< LD		Rojas-Castillo (2023)
<i>Arsénico</i>	μg/L	-		< LD		Rojas-Castillo (2023)
<i>Selenio</i>	μg/L	-		< LC		Rojas-Castillo (2023)
<i>Boro</i>	μg/L	-		1.76		Rojas-Castillo (2023)

4.2. Módulo II. Evaluación de Riesgos

Este módulo conlleva desde la identificación de los peligros y rutas de exposición hasta la caracterización de riesgos e implantación de medidas. A continuación, se desarrollan los diferentes elementos de gestión del riesgo en el caso concreto de estudio.

4.2.1. Identificación de peligros y rutas de exposición

4.2.1.1. Identificación de peligros

La identificación de peligros se realiza atendiendo al agua de entrada al sistema, a la normativa vigente y al agua efluente del cultivo de microalgas y posterior tratamiento con membranas obtenida de los datos experimentales comentados anteriormente. Cabe destacar que según los municipios e industrias a los que se da servicio, se debe tener en cuenta la posible llegada al sistema de metales pesados, microplásticos y otros contaminantes emergentes, así como agentes patógenos, cuya evaluación cuantitativa/semicuantitativa será de interés por los posibles riesgos asociados a ellos.

A continuación, se listan los parámetros peligrosos identificados.

Tabla 27

Identificación de agentes peligrosos

Agente peligroso	Tipo de parámetro
N-NH ₄	Físico-Químico
N-NO ₃	Físico-Químico
P-PO ₄	Físico-Químico
Conductividad	Físico-Químico
Turbidez	Físico-Químico
Sólidos suspendidos	Físico-Químico
DQO	Físico-Químico
DBO ₅	Físico-Químico
Metales pesados	Físico-Químico
Microplásticos	Contaminante emergente
Fármacos	Contaminante emergente
Genes resistentes a antibióticos	Contaminante emergente
Disruptores endocrinos	Contaminante emergente
Indicador de bacterias	Patógeno
Indicador de virus	Patógeno
Indicador de protozoos	Patógeno
<i>Legionella</i>	Patógeno
Nemátodos intestinales	Patógeno
<i>Salmonella</i>	Patógeno

Nota. Elaboración propia (2024)

Para la elección de los parámetros previos se ha considerado que la normativa vigente (Reglamento 2020/741 de reutilización del agua que incorpora la obligatoriedad de elaboración del Plan de Gestión del Riesgo) incorpora en sus requisitos aquellos parámetros que considera que puedan conllevar algún riesgo.

En dicha normativa los requisitos de calidad y controles de validación vienen dados por los parámetros *E. Coli*, colifagos totales, esporas de *Clostridium perfringens* como indicadores de contaminación, DBO₅, sólidos suspendidos, turbidez y otros, entre los que destacan la *Legionella* y los nemátodos intestinales. Asimismo, el Real Decreto 1620/2007 considera *Salmonella* como un agente a controlar, aunque únicamente en determinadas ocasiones. Por su parte, la nueva Directiva de aguas presta especial atención a los contaminantes emergentes, destacando algunos como los productos farmacéuticos y de higiene personal, microplásticos, resistentes a antibióticos y disruptores endocrinos. El resto de parámetros (nutrientes y DQO) son requisitos de vertido a controlar en los tratamientos de aguas residuales.

No obstante, no se van a evaluar todos los agentes peligrosos identificados previamente debido a las siguientes puntualizaciones:

- Se garantiza cumplir los requisitos para sólidos suspendidos por el uso de la membrana de UF, por lo que las concentraciones a las que están presentes en el agua regenerada no deberían suponer un riesgo para la salud. Aun así, se incluyen otros parámetros relacionados como la turbidez.

- La DQO no se incluye en el análisis de riesgos puesto que no existen referencias de que dicho parámetro conlleve riesgos potenciales directos para la salud humana. Además, se puede observar en los datos experimentales que los valores cumplen con los límites de vertido requeridos por normativa (125 mg/L).
- El parámetro DBO₅ no se incluye por falta de datos medidos, aunque sería ideal incluirlo porque aunque no habría problemas en cumplir con el límite de vertido (25 mg/L) y, por tanto, ser suficiente para los requisitos exigidos en las clases B y C de calidad del agua, el límite de cumplimiento para aguas de clase A es muy bajo (10 mg/L). Es posible que se pueda superar este límite para aguas de clase A en ciertas ocasiones, puesto que las algas liberan moléculas orgánicas (González-Camejo et al., 2020). Por tanto, debería comprobarse con valores reales.
- Algunos parámetros han sido incluidos por considerarse de creciente preocupación y por posibilidad de estar presentes en el agua por vertidos inusuales, como lo son los metales pesados y los microplásticos, a pesar que la información que se tiene de estos compuestos no es clara, y en muchos de los casos, es contradictoria. No obstante, otros contaminantes emergentes citados en la *Tabla 27* (disruptores endocrinos, genes resistentes a antibióticos y productos farmacéuticos y de higiene personal) no se han evaluado en este estudio debido a que la cuantificación de su peligro es compleja, tanto por la dificultad de su medición y el tipo de análisis de riesgos a realizar (Lin et al., 2020). Para realizar un correcto análisis de los peligros para la salud de estos emergentes habría que realizar un análisis QCRA (Radini et al., 2023). Este análisis es complejo y va más allá de los objetivos del presente trabajo. Además, se espera que muchos de estos contaminantes no se encuentren en cantidades dañinas para la población en las dosis de exposición analizadas porque la carga que llega a la EDAR caso de estudio es predominantemente urbana, con poca carga de contaminantes químicos.
- Respecto a los indicadores de bacteria, virus y protozoo, se escoge *E. coli* como indicador de bacteria, y en lugar de parámetros como *Cryptosporidium* o rotavirus como patógenos de referencia según la OMS (*Cryptosporidium* como indicador de protozoos y rotavirus como indicador de virus), se escogen colifagos y esporas de *Clostridium perfringens* (colifagos como indicador de virus y *Clostridium perfringens* como indicador de protozoos), por ser los que destaca la normativa (R2020/741). De hecho, se usa colifagos somáticos y no totales, también válido según el Reglamento vigente.
- El parámetro *Legionella* únicamente es requisito cuando hay riesgo de aerosolización, y debido a que se considera que el riesgo no es por aspersión, no es necesaria su inclusión. Además, tal y como se puede ver en el apartado *Estudios previos*, no existe presencia de *Legionella* en el efluente.

- De la misma forma, nemátodos intestinales son requisito en caso de riego de pastos o forraje, y los valores recogidos en el apartado *Estudios previos* muestran que no son de relevancia para el estudio, por lo que se opta por su no evaluación.
- *Salmonella*, aunque está incluido en el Real Decreto aún vigente en la normativa española, no se plantea en las nuevas normativa (R2020/741), por lo que se considera su no inclusión. Además, tal y como se puede observar en el apartado *Estudios previos*, no se encuentra presente en el agua residual de estudio.

Teniendo en cuenta lo anterior, los agentes peligrosos a evaluar cuantitativa o semi-cuantitativamente en el presente estudio son los que se muestran en la *Tabla 28*.

Tabla 28

Identificación de agentes peligrosos a evaluar cuantitativa o semi-cuantitativamente

Parámetro	Tipo de parámetro
<i>N-NH₄</i>	Físico-químico
<i>N-NO₃</i>	Físico-químico
<i>P-PO₄</i>	Físico-químico
<i>Conductividad</i>	Físico-químico
<i>Turbidez</i>	Físico-químico
Microplásticos	Físico-químico
Metales pesados	Físico-químico
<i>E. coli</i>	Patógeno
<i>Colifagos somáticos</i>	Patógeno
<i>Esporas de Clostridium perfringens</i>	Patógeno

Nota. Elaboración propia (2024)

Además de identificar los agentes peligrosos, se debe determinar el peligro que conllevan dichos agentes, en este caso concreto, para la salud humana. Por tanto, a continuación, se describen los diferentes agentes peligrosos identificados, los riesgos que conllevan y su facilidad o no de que la población esté expuesta a ellos.

- N-NH₄

Elevadas concentraciones de nitrógeno amoniacal en sistemas acuáticos suponen un impacto ambiental porque puede provocar eutrofización. Sin embargo, no se han encontrado efectos significativos directos para la salud provocados por dicho parámetro.

Aun así, puesto que el contacto con agua eutrofizada puede transmitir enfermedades o contribuir a la distribución de vectores como los mosquitos (Cárdenas-Calvachi et al., 2013), se va a considerar un factor de riesgo para la salud de forma indirecta.

- N-NO₃

Los compuestos nitrogenados en forma de nitratos pueden inducir efectos adversos no solo en organismos acuáticos, sino también en la salud. De hecho, se ha comprobado que bebés menores de cuatro meses con una ingesta de agua rica en nitratos pueden llegar a contraer una enfermedad denominada metahemoglobinemia (Cárdenas-Calvachi et al., 2013), cuyos síntomas asociados son taquicardia, convulsiones, asfixia, e incluso la muerte.

Asimismo, la ingestión de nitritos y nitratos puede provocar el desarrollo de linfomas, cánceres y malformaciones en recién nacidos. Concretamente, los nitratos se han relacionado con un incremento de abortos, nacimientos prematuros y retardos en el crecimiento intrauterino (Cárdenas-Calvachi et al., 2013).

Indirectamente, por contacto del agua eutrofizada (a causa del exceso de nutrientes) pueden ocasionar trastornos fisiológicos, transmitir enfermedades como el cólera o distribuir vectores como los mosquitos, de transmisión de malaria (Cárdenas-Calvachi et al., 2013).

- P-PO₄

Generalmente los fosfatos no suponen un problema para la salud humana. No obstante, debido al impacto ambiental que provocan por eutrofización, se puede considerar, como efecto indirecto, la transmisión de vectores de enfermedades por contacto del agua eutrofizada. De hecho, el fósforo es el nutriente limitante de los ecosistemas mediterráneos, y por tanto de gran importancia para la eutrofización.

Además, varios científicos han observado numerosas relaciones de causa-efecto entre el consumo de aguas fosfatadas y el aumento de casos de cáncer y de enfermedades neuro-degenerativas (Lavie et al., 2010), aunque se necesitaría estudiar más en profundidad para aclarar los efectos reales del consumo de aguas fosfatadas sobre la salud humana.

- Conductividad

Este parámetro está muy relacionado con las sales contenidas en el agua residual, y puede ser un indicador para detectar altas concentraciones de detergentes o sales. A pesar de no conllevar un riesgo para la salud humana de forma directa, puede dar lugar a la degradación de la calidad del suelo y provocar que el cultivo no sea de calidad.

Por tanto, se tendrá en cuenta para el análisis de riesgos de este parámetro un efecto indirecto a través de la ingestión de productos regados con aguas residuales con alta conductividad.

- Turbidez

Puede ser causada por una gran variedad de materiales en suspensión, que varían en tamaño desde dispersiones coloidales hasta partículas gruesas, materia orgánica e inorgánica, microorganismos, etc., por lo que determinar sus efectos directamente en la salud humana no es sencillo.

No obstante, sí se debe tener en cuenta su riesgo de forma indirecta a la salud humana puesto que, gran parte de los contaminantes que generan esa turbidez provocan efectos adversos sobre la misma (microorganismos patógenos provocan enfermedades, por ejemplo, aunque estos contaminantes se evaluarán de forma específica por separado). De hecho, se ha visto una gran correlación entre la concentración de SST y la concentración de huevos de helminto en el agua residual (Armengol-Nadal, 2017).

Asimismo, determinar este parámetro es importante en aguas de consumo humano (Muñoz-Cruz, 2008), por lo que valores elevados de turbidez son muy problemáticos.

- Microplásticos

El ser humano tiene una interacción con los microplásticos directa e indirecta. Así, la vía de exposición puede ser por ingestión (alimentos que contengan microplásticos), inhalación o contacto con la piel. De las tres vías, la mayor fuente de exposición humana es la ingesta de alimentos. No obstante, solo los menores a 20 micras deberían poder penetrar en los órganos, y los de 10 micras atravesar membranas celulares y la barrera hematoencefálica (Campanale et al., 2020), que además son los más difíciles de eliminar y detectar.

Los principales impactos que generan los microplásticos se deben a la capacidad de adsorción de otros contaminantes como pueden ser metales pesados, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), bifenilos policlorados (PCB) e incluso antibióticos.

Así mismo, pueden ser acumulados, transportados o magnificarse, generando una entrada desde la base de la cadena trófica (Akdogan y Guven, 2019) a través del plancton, zooplancton y fitoplancton afectados el proceso de fotosíntesis (Rai et al., 2021). Aunque el plástico se excreta tras la ingestión, hay evidencias que sugieren que se pueden retener en el intestino en tiempos mayores a los esperados (Browne et al., 2008). No obstante, y de acuerdo con el informe de la OMS (2019), aún no hay evidencia del impacto sobre las escalas superiores de la cadena trófica o sobre la salud.

Aun así, respecto a su potencial toxicidad, la IARC (International Agency for Research on Cancer) incluye algunos de los componentes de los microplásticos en su lista de clasificación de carcinógenos (por ejemplo, cloruro de vinilo, estireno o ftalatos). Además, al tratarse de material particulado, las vías respiratoria y digestiva son muy preocupantes, y es probable que los microplásticos puedan producir una toxicidad crónica (Sanz et al., 2021).

- Metales pesados

Actualmente existe una preocupación globalizada debida al aumento de los índices de contaminación de efluentes industriales por parte de metales pesados. Debido a las actividades industriales y domésticas, es común la presencia de metales como hierro, cromo, zinc, plomo, níquel, cadmio y cobre en las corrientes de aguas residuales. Estas sustancias persisten en el ambiente y causan graves efectos no solo sobre la fauna y la flora sino también en la salud humana.

Si estos metales están presentes en concentraciones significativas en las corrientes de agua recuperadas y se riegan los terrenos de forma continuada, podrían acumularse en los suelos (Jaramillo y Restrepo, 2017; Seiler y Berendonk, 2012). Además, los metales afectan negativamente la productividad de los cultivos (Khalid et al., 2018; Shahid et al., 2015), y se acumulan en la cadena alimentaria (Becerra-Castro et al., 2015). Por estas razones, se deben evitar concentraciones significativas de metales en el agua regenerada.

En los seres humanos pueden causar erupciones cutáneas, úlceras, afección al sistema inmune, riñones e hígado, hipertensión, cáncer, alteraciones neurológicas e incluso la muerte (Tejada-Tovar et al., 2015).

La exposición a elementos metálicos se produce tanto a través del agua como de ingestión de alimentos.

- *Escherichia coli*

Escherichia coli es la especie más utilizada de la familia coliformes como indicador de contaminación fecal, pues se detecta más fácilmente (Celina-Barreiro, 2020). La mayoría de los serotipos identificados son inofensivos (Centers For Disease Control and Prevention [CDC], 2014). No obstante, varias cepas de *E. coli* pueden resultar patógenas, causando cuadros severos enterohemorrágicos o problemas renales, como el síndrome urémico hemolítico (SUH) (Percival y Williams, 2013).

Esta especie bacteriana ha sido incriminada en enfermedades infecciosas que involucran tejidos y órganos humanos. Otras formas comunes de infección son neumonía, meningitis, enteritis o gastroenteritis (De Jesús et al., 2013).

Según la OMS, los serotipos de ECEH producen diarrea desde leve y no hemorrágica hasta altamente hemorrágica. Entre el 2% y el 7% de los enfermos pueden desarrollar el síndrome hemolítico urémico (SHU), que puede ser mortal, siendo los niños menores de 5 años quienes tienen más riesgo. La ECET, por su parte, está asociada con diarrea no hemorrágica crónica e intensa, vómitos y fiebre en los lactantes, y las infecciones por ECEP son poco frecuentes en países desarrollados. Por último, la ECEI produce diarrea acuosa y en ocasiones hemorrágica (OMS, 2018). Además, estas bacterias pueden vivir en el agua entre 4 y 12 semanas, aunque con limitaciones a la hora de reproducirse y sobrevivir en procesos de desinfección (Larrea-Murrell et al., 2013).

- Colífagos somáticos

Los bacteriófagos (fagos) son virus que sólo utilizan bacterias como huéspedes para la replicación. Concretamente, los colifagos somáticos inician la infección uniéndose a receptores ubicados permanentemente en la pared celular de los huéspedes y suelen replicarse en el aparato digestivo de los animales de sangre caliente, pero también pueden hacerlo en medios acuáticos (OMS, 2018).

Infectan a cepas específicas de *E. coli* aunque no significa que los colífagos somáticos solo puedan infectar a *E. coli*, también puede infectar a *Shigella sp.* y *Klebsiella pneumoniae*.

- Esporas de *Clostridium perfringens*

El género *Clostridium* se caracteriza por ser bacilos GRAM positivos, anaerobios y sulfatoreductores. Asimismo, son productores de esporas, siendo estas resistentes a condiciones desfavorables en medios acuáticos (irradiación UV, temperatura y pH extremos, y cloración) (OMS, 2018). Según la OMS, es un indicador de la eficacia de la desinfección y de la remoción de virus y protozoos.

Puede encontrarse en el intestino de animales y humanos, causando gastroenteritis de leve a aguda e incluso septicemia (Adams et al., 2019).

La septicemia a día de hoy se define como una afección grave en la que el cuerpo responde de manera incorrecta a una infección, haciendo que los órganos no funcionen correctamente. Además, puede avanzar y convertirse en un choque séptico, una disminución de la presión arterial dañando pulmones, riñones, hígado y otros órganos. Si el daño es grave, puede llevar a la muerte. La tasa de mortalidad por sepsis ronda el 25% y la tasa de mortalidad por choque séptico puede ser superior al 50% (Cavaillon y Chrétien, 2019). Los supervivientes pueden sufrir síntomas posteriores a la sepsis, como debilidad neuromuscular, dolor crónico, trastorno de estrés postraumático, deterioro cognitivo y depresión (Cavaillon y Chrétien, 2019).

4.2.1.2. Grupos y rutas de exposición

Teniendo en cuenta el caso de estudio los grupos de población expuestos al agua a la salida del tratamiento con microalgas son los regantes, la comunidad vecina, particularmente los niños de la comunidad vecina, y la población en general.

Las rutas de exposición que dependen de cada grupo de exposición son la ingestión (directa o indirecta) y la inhalación. A continuación, se muestra una tabla con las rutas de exposición que afectan a cada grupo expuesto, siguiendo las indicaciones de las *Directrices Australianas* (EPHC, NRMCM, AHMC, 2006).

Tabla 29

Grupos y rutas de exposición para el caso de estudio

Grupos de exposición	Rutas
Población general	Ingestión del cultivo
Regantes	Ingestión indirecta
Comunidad vecina	Inhalación
Niños en comunidad vecina	Ingestión

Nota. Elaboración propia (2024)

De modo que los diferentes casos a evaluar son:

- Ingestión de cultivo por parte de la población
- Ingestión indirecta por parte de los regantes
- Inhalación por parte de la comunidad vecina
- Ingestión por parte de los niños de la comunidad vecina

4.2.2. Elección del método de análisis

Para la elección del método de análisis (cuantitativo o semicuantitativo) se tiene en cuenta la información recogida en bibliografía y los datos disponibles del caso de estudio (ver apartado *Caracterización del agua residual influente y efluente*). En cualquier caso, se prioriza el análisis cuantitativo si se dispone de suficiente información frente al análisis semicuantitativo.

Así, se escoge la realización de un análisis semicuantitativo para los parámetros físico-químicos a través de una matriz de riesgos y el análisis cuantitativo QMRA para los agentes patógenos.

Además, dentro del análisis QMRA, se distinguen, como ya se ha comentado, dos modelos dosis-respuesta, priorizando el uso del modelo de Poisson si se dispone de información sobre los agentes patógenos. A continuación, se muestra una tabla resumen de los parámetros a evaluar y la forma escogida para su evaluación.

Tabla 30

Modo de evaluación de los potenciales peligros

Parámetro	Tipo de análisis
$N-NH_4$	Semicuantitativo Matriz de Riesgos
$N-NO_3$	Semicuantitativo Matriz de Riesgos
$P-PO_4$	Semicuantitativo Matriz de Riesgos
Conductividad	Semicuantitativo Matriz de Riesgos
Turbidez	Semicuantitativo Matriz de Riesgos
Microplásticos	Semicuantitativo Matriz de Riesgos
Metales pesados	Semicuantitativo Matriz de Riesgos
<i>E. coli</i>	Cuantitativo QMRA - Poisson
Colifagos somáticos	Cuantitativo QMRA - Poisson
Esporas de <i>Clostridium perfringens</i>	Cuantitativo QMRA - Exponencial

Nota. Elaboración propia (2024)

4.2.3. Análisis QMRA de agentes patógenos

El análisis QMRA se va a hacer para los siguientes agentes patógenos: *E. coli*, colifagos somáticos y esporas de *Clostridium perfringens*, y para cada una de las rutas de exposición mencionadas.

En primer lugar, es necesario conocer los parámetros bibliográficos necesarios para entrar al modelo dosis-respuesta, tanto relacionados con los distintos patógenos como con las rutas de exposición. En este punto cabe destacar que no se han encontrado parámetros bibliográficos de todos los agentes patógenos a evaluar, así que se han asumido valores análogos para aquellos de los que faltaba información (ver *Tabla 31*). A continuación, se muestra una tabla resumen con las limitaciones encontradas y la decisión tomada para poder continuar con la evaluación.

Tabla 31

Decisión de parámetros bibliográficos a utilizar

Normativa (Reglamento (UE) 2020/741)	Datos experimentales disponibles	Parámetros bibliografía disponibles	Decisión
Indicador de bacteria: <i>E. coli</i> o <i>Campylobacter</i>	<i>E. coli</i>	$\alpha_{E.coli}$ $\beta_{E.coli}$ $\alpha_{Campylobacter}$ $\beta_{Campylobacter}$ $Ratio_{enfermCampylobacter}$ $AVAD_{dCampylobacter}$ $f_{sCampylobacter}$	Se usan parámetros de <i>E. coli</i> si es posible, y si no se asumen válidos los de <i>Campylobacter</i>

Normativa (Reglamento (UE) 2020/741)	Datos experimentales disponibles	Parámetros bibliografía disponibles	Decisión
Indicador de virus: Colífagos o Rotavirus	Colífagos somáticos	$\alpha_{\text{Rotavirus}}$ $\beta_{\text{Rotavirus}}$ Ratio_enferm _{Rotavirus} AVAD_d _{Rotavirus} fS _{Rotavirus}	Asumir parámetros bibliográficos válidos para todos virus
Indicador de protozoos: Esporas de <i>Clostridium perfringens</i> /bacterias formadoras de esporas reductoras de sulfato o <i>Cryptosporidium</i>	Esporas de <i>Clostridium perfringens</i>	r _{Cryptosporidium} Ratio_enferm _{Cryptosporidium} AVAD_d _{Cryptosporidium} fS _{Cryptosporidium}	Asumir parámetros bibliográficos válidos para todos protozoos

Nota. Elaboración propia (2024)

Una vez determinado los parámetros bibliográficos asumidos para cada agente patógeno, ya se puede evaluar el riesgo asociado a cada uno de los agentes patógenos, según los datos experimentales asociados a los mismos. Cabe destacar que en los casos en los que se tiene un intervalo de valores para los parámetros bibliográficos, para el cálculo de la probabilidad de infección se ha tenido en cuenta el valor máximo del rango.

Además, señalar que la eliminación de patógenos (log reducción) en el QMRA debe ser evaluada desde la entrada al sistema (agua bruta) y en este caso se evalúa con los datos de influente recogidos en *Estudios previos*. Esto conlleva que el log reducción sea menor, y por tanto, el análisis de riesgos más conservador.

- *Escherichia coli*

Para este agente patógeno se tienen dos condiciones: membrana UF y MD. Teniendo en cuenta que el estudio hace uso de membranas de UF, se valorarán los datos experimentales referidos a esta condición. Aun así, se obtiene el riesgo con MD por considerarse escalable (similitud en las membranas).

Los datos de la muestra 1 y de las muestra 2 (M1 y M2), tanto para UF como para MD, no han sido evaluados por diferentes razones. En M1 la razón es no estar disponible el valor a la entrada y por tanto no poder estimar reducción en el caso de UF y no disponer de valores en caso de MD. En M2 es la consideración de ser un outlier (ver *Anexo I. Cálculos completos*).

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para *E. coli* para membranas de UF en cada una de las rutas de exposición. Los valores promedio a la entrada son de $2.97 \cdot 10^6$ UFC/100mL y a la salida de 1 UFC/100mL (reducción logarítmica de 6.47).

Tabla 32

Riesgo promedio obtenido para E. coli con membranas de UF en cada ruta de exposición evaluada

Ruta de exposición	Dosis	Pinf	Penf	AVADp	Riesgo
Ingestión del cultivo para la población en general	1.545E-03	3.194E-12	9.582E-13	4.408E-15	Aceptable

Ruta de exposición	Dosis	Pinf	Penf	AVADp	Riesgo
<i>Ingestión indirecta por parte de los regantes</i>	1.545E-05	3.197E-14	9.592E-15	4.412E-17	Aceptable
<i>Inhalación por parte de la comunidad vecina</i>	1.066E-05	2.198E-14	6.595E-15	3.034E-17	Aceptable
<i>Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina</i>	1.545E-04	3.193E-13	9.579E-14	4.406E-16	Aceptable

Nota. Elaboración propia (2024)

Tal y como se puede observar en la *Tabla 32*, el riesgo asociado al patógeno *E. coli* es aceptable para todas las rutas de exposición evaluadas según lo que establece la OMS en metas de salud. De hecho, en el *Anexo I. Cálculos completos* se muestran los resultados puntuales de cada una de las mediciones de *E. coli*, y el riesgo es aceptable en todas ellas.

Por su parte, los resultados con MD, con entrada promedio de $2.97 \cdot 10^6$ UFC/100mL y salida de $2.03 \cdot 10^6$ UFC/100mL (reducción logarítmica de 0.165) han sido los que se muestran en la *Tabla 33*.

Tabla 33

Riesgo promedio obtenido para E. coli con MD en cada ruta de exposición evaluada

Ruta de exposición	Dosis	Pinf	Penf	AVADp	Riesgo
<i>Ingestión del cultivo para la población en general</i>	1.228E+05	2.537E-04	7.612E-05	3.502E-07	Aceptable*
<i>Ingestión indirecta por parte de los regantes</i>	1.228E+03	2.540E-06	7.619E-07	3.505E-09	Aceptable*
<i>Inhalación por parte de la comunidad vecina</i>	8.476E+02	1.752E-06	5.257E-07	2.418E-09	Aceptable*
<i>Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina</i>	1.228E+04	2.539E-05	7.618E-06	3.504E-08	Aceptable*

*Efluente por encima del límite legal

Nota. Elaboración propia (2024)

Según los resultados, el riesgo es mayor con el uso de MD, a pesar de que sigue resultando riesgo aceptable en todas las rutas. En el *Anexo I. Cálculos completos* se observan los resultados puntuales para cada una de las mediciones.

Por su parte, a pesar de que los riesgos obtenidos sean aceptables, justificados por la escasa exposición de los individuos a través de las rutas evaluadas, los valores a la salida (ver apartado *Caracterización del agua residual influente y efluente*) están muy por encima de los límites legales de reutilización incluso para clase D de agua regenerada. Por tanto, en ningún caso se podría reutilizar el agua regenerada con MD y se tomarán medidas.

- Colifagos somáticos

En este caso se parte de dos condiciones: membranas de UF y salida de sistema AnMBR con membranas de UF.

Para las membranas de UF, con una entrada promedio de 4.75 UFP/mL y una salida de 0.25 UFP/mL (reducción logarítmica de 1.28), resultan los siguientes riesgos para cada una de las rutas de exposición.

Tabla 34

Riesgo promedio obtenido para colifagos somáticos con membranas de UF en cada ruta de exposición evaluada

Ruta de exposición	Dosis	Pinf	Penf	AVADp	Riesgo
<i>Ingestión del cultivo para la población en general</i>	1.955E-01	9.113E-02	4.557E-02	3.828E-06	No aceptable
<i>Ingestión indirecta por parte de los regantes</i>	1.955E-03	1.158E-03	5.789E-04	4.863E-08	Aceptable
<i>Inhalación por parte de la comunidad vecina</i>	1.349E-03	7.996E-04	3.998E-04	3.358E-08	Aceptable
<i>Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina</i>	1.955E-02	1.129E-02	5.644E-03	4.741E-07	Aceptable

Nota. Elaboración propia (2024)

Los resultados del análisis QMRA para colifagos somáticos no son favorables. Aparecen riesgos no aceptables para la ingestión del cultivo para la población en general, por lo que será necesario establecer medidas o barreras preventivas que minimicen el riesgo. De lo contrario, y con esta situación, el agua regenerada no sería apta y debería paralizarse el sistema hasta que la situación mejorase. Los cálculos realizados para las muestras puntuales se encuentran en el *Anexo I. Cálculos completos*.

Por su parte, para la condición del AnMBR, se parte de una entrada al sistema AnMBR de 10 UFP/mL y se obtiene una salida de 5 UFP/mL, lo que supone una reducción logarítmica de 0.301. Con esto, resultan los riesgos que se muestran en la *Tabla 35*.

Tabla 35

Riesgo promedio obtenido para colifagos somáticos con AnMBR en cada ruta de exposición evaluada

Ruta de exposición	Dosis	Pinf	Penf	AVADp	Riesgo
<i>Ingestión del cultivo para la población en general</i>	1.661E+01	6.067E-01	3.034E-01	2.548E-05	No aceptable
<i>Ingestión indirecta por parte de los regantes</i>	1.661E-01	7.992E-02	3.996E-02	3.357E-06	No aceptable
<i>Inhalación por parte de la comunidad vecina</i>	1.146E-01	5.850E-02	2.925E-02	2.457E-06	No aceptable
<i>Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina</i>	1.661E+00	3.310E-01	1.655E-01	1.390E-05	No aceptable

Nota. Elaboración propia (2024)

En todos los casos, suponiendo un sistema AnMBR, la probabilidad de enfermar por colifagos somáticos es mayor. De hecho, el riesgo es no aceptable en todas las rutas evaluadas.

- Esporas de *Clostridium perfringens*

Siguiendo la misma línea que en el caso previo, se tienen dos condiciones: membranas de UF y AnMBR.

En el primero de los casos (UF), con entrada promedio a UF de $4.71 \cdot 10^3$ UFC/100mL no se detecta presencia a la salida, por lo que se entiende riesgo aceptable para todas las rutas de exposición evaluadas.

Por su parte, en AnMBR se obtiene de promedio 1 UFC/100 mL a la salida con entrada al AnMBR de $9.98 \cdot 10^4$ UFC/100mL, lo que supone una reducción logarítmica de 5.0 y conlleva los riesgos mostrados en la *Tabla 36*. En el *Anexo I. Cálculos completos* se detallan los cálculos de las muestras puntuales.

Tabla 36

*Riesgo promedio obtenido para esporas de *Clostridium perfringens* con AnMBR en cada ruta de exposición evaluada*

Ruta de exposición	Dosis	Pinf	Penf	AVADp	Riesgo
Ingestión del cultivo para la población en general	2.00E-03	1.18E-04	8.26E-05	1.24E-07	Aceptable
Ingestión indirecta por parte de los regantes	2.00E-05	1.18E-06	8.26E-07	1.24E-09	Aceptable
Inhalación por parte de la comunidad vecina	1.38E-05	8.14E-07	5.70E-07	8.55E-10	Aceptable
Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	2.00E-04	1.18E-05	8.26E-06	1.24E-08	Aceptable

Nota. Elaboración propia (2024)

Así, las esporas de *Clostridium perfringens* no llevan asociado ningún riesgo para la salud humana con estos sistemas de tratamiento y según lo recomendado como meta de salud por la OMS.

4.2.4. Análisis semicuantitativo de parámetros físico químicos

El análisis semicuantitativo se realiza para los siguientes parámetros: N-NH₄, N-NO₃, P-PO₄, conductividad, turbidez, microplásticos y metales. El análisis se va a dividir en tres subapartados, los cuales son probabilidad de presencia y de exposición, gravedad de las consecuencias y evaluación del riesgo por niveles.

4.2.4.1. Probabilidad de presencia y exposición

A continuación, se clasifica cada uno de los parámetros físico-químicos según su probabilidad de presencia (dependiendo del comportamiento del tratamiento ante ese agente) y de exposición (según la descripción del agente contaminante descrita en el apartado *Identificación de peligros*).

- Probabilidad de presencia

En la siguiente tabla se muestra el nivel asignado para cada uno de los contaminantes físico-químicos y la razón de su asignación.

Tabla 37

Probabilidad de presencia asignada a los parámetros físico-químicos evaluados

	Probabilidad presencia	Valor numérico	Razón
N-NH₄	Casi seguro	4	El amonio no se elimina por completo en el tratamiento
N-NO₃	Casi seguro	4	El sistema de microalgas puede presentar gran porcentaje de N nitrificado debido a la acción de bacterias nitrificantes (González-Camejo et al., 2022)
P-PO₄	Probable	3	El P es normalmente limitante en tratamientos de agua residual urbana con microalgas (González Camejo et al., 2020)
Conductividad	Seguro	5	El tratamiento no es capaz de eliminar el contaminante (cloruros y otros iones)
Turbidez	Muy improbable	1	La UF debería eliminar la mayoría de sólidos y agentes patógenos
Microplásticos	Probable	3	La UF debería eliminar todos los microplásticos mayores de 0.03 micras, pero los microplásticos menores y los nanoplásticos pueden traspasar estas membranas (González-Camejo et al., 2023)
Níquel	Muy improbable	1	El agua del Carraixet normalmente no presenta cantidad significativa de metales, estando la mayoría de mediciones por debajo del LD. Las únicas excepciones son boro y zinc, por lo que se le asigna un nivel improbable
Cromo	Muy improbable	1	
Cobre	Muy improbable	1	
Plomo	Muy improbable	1	
Zinc	Improbable	2	
Cadmio	Muy improbable	1	
Mercurio	Muy improbable	1	
Arsénico	Muy improbable	1	
Selenio	Muy improbable	1	
Boro	Improbable	2	

Nota. Elaboración propia (2024)

- Probabilidad de exposición

Por su parte, en la probabilidad por exposición entran en juego las rutas de exposición a evaluar: ingestión del cultivo para la población en general, ingestión indirecta por parte de los regantes, inhalación por parte de la comunidad vecina e ingestión por parte de los niños en la comunidad vecina.

Se expone en la *Tabla 38* el nivel asignado para cada uno de los contaminantes físico-químicos por ruta de exposición y la razón de su asignación, basada en la descripción del apartado *Identificación de peligros*.

Tabla 38

Probabilidad de exposición asignada a los parámetros físico-químicos evaluados en cada una de las rutas

		Probabilidad exposición	Valor numérico	Razón
N-NH₄	Ingestión del cultivo para la población en general	Muy improbable	1	Más bien la transmisión ocurriría por contacto del agua eutrofizada, que no se considera en este estudio
	Ingestión indirecta por parte de los regantes	Muy improbable	1	
	Inhalación por parte de la comunidad vecina	Muy improbable	1	
	Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	Muy improbable	1	
N-NO₃	Ingestión del cultivo para la población en general	Improbable	2	Según descripción, afecta más a niños y la transmisión es por ingestión
	Ingestión indirecta por parte de los regantes	Improbable	2	
	Inhalación por parte de la comunidad vecina	Muy improbable	1	
	Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	Probable	3	
P-PO₄	Ingestión del cultivo para la población en general	Muy improbable	1	Más bien la transmisión es por contacto del agua eutrofizada
	Ingestión indirecta por parte de los regantes	Muy improbable	1	
	Inhalación por parte de la comunidad vecina	Muy improbable	1	
	Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	Muy improbable	1	
Conductividad	Ingestión del cultivo para la población en general	Probable	3	La transmisión es a través de la contaminación del cultivo
	Ingestión indirecta por parte de los regantes	Muy improbable	1	
	Inhalación por parte de la comunidad vecina	Muy improbable	1	
	Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	Muy improbable	1	
Turbidez	Ingestión del cultivo para la población en general	Probable	3	Relacionado con los sólidos y coliformes en general, según las rutas más comunes, aunque los patógenos se analizan por separado con QMRA
	Ingestión indirecta por parte de los regantes	Improbable	2	
	Inhalación por parte de la comunidad vecina	Muy improbable	1	
	Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	Improbable	2	
Microplásticos	Ingestión del cultivo para la población en general	Casi seguro	4	La ruta más común es ingerir alimentos que los contengan.
	Ingestión indirecta por parte de los regantes	Probable	3	
	Inhalación por parte de la comunidad vecina	Probable	3	
	Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	Probable	3	

		Probabilidad exposición	Valor numérico	Razón
Metales	Ingestión del cultivo para la población en general	Casi seguro	4	Se considera que todos los metales tienen la misma probabilidad de exposición, y que están presentes aunque en concentraciones bajas (trazas)
	Ingestión indirecta por parte de los regantes	Probable	3	
	Inhalación por parte de la comunidad vecina	Improbable	2	
	Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	Probable	3	

Nota. Elaboración propia (2024)

- Probabilidad combinada

Teniendo en cuenta la probabilidad de presencia y la probabilidad de exposición, la probabilidad combinada se obtiene según muestra la *Tabla 39*, y se clasifica en niveles según lo descrito en el apartado *Evaluación de riesgos*.

A continuación, se muestra el nivel de probabilidad combinada del riesgo asociado a cada uno de los contaminantes físico-químicos por ruta de exposición.

Tabla 39

Probabilidad combinada resultante para cada uno de los parámetros físico-químicos evaluados en cada una de las rutas

		Probab. presencia	Probab. exposición	Probab. combinada	Nivel	Valor numérico
N-NH₄	Ingestión del cultivo para la población en general	4	1	4	Muy improbable	1
	Ingestión indirecta por parte de los regantes	4	1	4	Muy improbable	1
	Inhalación por parte de la comunidad vecina	4	1	4	Muy improbable	1
	Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	4	1	4	Muy improbable	1
N-NO₃	Ingestión del cultivo para la población en general	4	2	8	Improbable	2
	Ingestión indirecta por parte de los regantes	4	2	8	Improbable	2
	Inhalación por parte de la comunidad vecina	4	1	4	Muy improbable	1
	Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	4	3	12	Probable	3
P-PO₄	Ingestión del cultivo para la población en general	3	1	3	Muy improbable	1
	Ingestión indirecta por parte de los regantes	3	1	3	Muy improbable	1
	Inhalación por parte de la comunidad vecina	3	1	3	Muy improbable	1
	Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	3	1	3	Muy improbable	1

		Probab. presencia	Probab. exposición	Probab. combinada	Nivel	Valor numérico
Conducti- vidad	Ingestión del cultivo para la población en general	5	3	15	Probable	3
	Ingestión indirecta por parte de los regantes	5	1	5	Muy improbable	1
	Inhalación por parte de la comunidad vecina	5	1	5	Muy improbable	1
	Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	5	1	5	Muy improbable	1
Turbidez	Ingestión del cultivo para la población en general	1	3	3	Muy improbable	1
	Ingestión indirecta por parte de los regantes	1	2	2	Muy improbable	1
	Inhalación por parte de la comunidad vecina	1	1	1	Muy improbable	1
	Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	1	2	2	Muy improbable	1
Micro- plásticos	Ingestión del cultivo para la población en general	3	4	12	Probable	3
	Ingestión indirecta por parte de los regantes	3	3	9	Improbable	2
	Inhalación por parte de la comunidad vecina	3	3	9	Improbable	2
	Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	3	3	9	Improbable	2
Metales en general	Ingestión del cultivo para la población en general	1	4	4	Muy improbable	1
	Ingestión indirecta por parte de los regantes	1	3	3	Muy improbable	1
	Inhalación por parte de la comunidad vecina	1	2	2	Muy improbable	1
	Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	1	3	3	Muy improbable	1
Zinc	Ingestión del cultivo para la población en general	2	4	8	Improbable	2
	Ingestión indirecta por parte de los regantes	2	3	6	Improbable	2
	Inhalación por parte de la comunidad vecina	2	2	4	Muy improbable	1
	Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	2	3	6	Improbable	2
Boro	Ingestión del cultivo para la población en general	2	4	8	Improbable	2
	Ingestión indirecta por parte de los regantes	2	3	6	Improbable	2
	Inhalación por parte de la comunidad vecina	2	2	4	Muy improbable	1
	Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	2	3	6	Improbable	2

Nota. Elaboración propia (2024)

4.2.4.2. Gravedad de las consecuencias

La gravedad de las consecuencias se basa en las mediciones de cada uno de los parámetros en el caso de estudio y en los valores de referencia dispuestos en el apartado *Riesgos asociados a los contaminantes del agua residual urbana*. Cabe destacar que el análisis se realiza con el valor máximo de la caracterización y que de los valores de referencia se ha escogido los máximos, para ser más restrictivos en la gestión de riesgos.

El nivel de gravedad establecido es un único valor según los resultados obtenidos de cada una de las mediciones, tras su comparación con el valor de referencia mediante un ratio. Se ha de tener en cuenta que los valores de referencia de la OMS están establecidos para un consumo directo del agua y que en ningún caso se contempla un consumo directo del agua regenerada en tales cantidades como las habituales en el consumo de agua potable. Aun así, se utilizan dichos valores para estimar la gravedad de los agentes peligrosos con el fin de ser conservadores en el análisis de riesgos.

Los microplásticos, no medidos, se han considerado como “Leve” por ser de preocupación actual pero no saber con seguridad los efectos sobre la salud humana. Por su parte, no se tienen valores de referencia para la conductividad, considerándose de gravedad “Insignificante” para la salud humana puesto que los efectos principalmente son sobre el suelo. Los metales se evalúan por separado al disponer de una única medida. Dicha medida, para los casos en los que el valor medido sea menor que el LD o LC, se tomará como igual al valor del LD o LC, según corresponda. No obstante, se entiende que esta evaluación es conservativa puesto que no se conoce el valor exacto de las concentraciones, y puede ser mucho menor que el LD o LC.

A continuación, se muestra (*Tabla 40 y Tabla 41*) los niveles de gravedad de las consecuencias para cada uno de los parámetros a evaluar, según los ratios comparativos medición/referencia.

Tabla 40

Nivel de gravedad de consecuencias para la salud humana de los parámetros físico-químicos (excepto metales)

	Valor máximo efluente	Valor de referencia OMS*	Ratio	Gravedad	Gravedad
N-NH₄ (mg/L)	5.13	0.5	10.26	3	Moderada
N-NO₃ mg/L)	17.09	50	0.3418	2	Leve
P-PO₄ mg/L)	0.4	0.1	4	3	Moderada
Conductividad (µs/cm)	2235	-	-	1	Insignificante
Turbidez (UNT)	0.21	0.5	0.42	2	Leve
Microplásticos mg/L)	-	-	-	2	Leve

*Aguas de consumo (valor conservador)

Nota. Elaboración propia (2024)

Señalar que a pesar de que el valor efluente supere el valor de referencia establecido por la OMS, en ningún caso se evalúa la gravedad por encima de moderada.

Esto es porque el consumo del agua regenerada es mucho menor que el consumo de agua potable para el cual se establecieron las referencias.

Tabla 41

Nivel de gravedad de consecuencias para la salud humana de los metales

	Valor efluente (mg/L)	Valor de referencia OMS (mg/L)	Valor límite RD 1620/2007 (mg/L)	Ratio	Gravedad	Gravedad
Níquel	< 0.266	0.07	0.2	3.8	3	Moderada
Cromo	< 0.344	0.05	0.1	6.88	3	Moderada
Cobre	< 0.033	2	0.2	0.0165	2	Leve
Plomo	< 0.28	0.01	-	28	3	Moderada
Zinc	0.06	3	-	0.02	2	Leve
Cadmio	< 0.009	0.003	0.01	3	3	Moderada
Mercurio	< 4.06 E-04	0.006	-	0.068	2	Leve
Arsénico	< 3.61 E-04	0.01	0.1	0.036	2	Leve
Selenio	< 5.8 E-05	0.04	0.02	0.001	1	Insignificante
Boro	1.76 E-03	2.4	0.5	0.001	1	Insignificante

Nota. Elaboración propia (2024)

En este caso el límite de nivel de gravedad se ha establecido en moderada para los metales cuyo valor en el efluente supera el establecido por la OMS como referencia. Esto es debido a dos razones: los valores de referencia están basados en calidad de agua potable y no se contempla consumir agua regenerada en tales cantidades, y, por otro lado, no se conoce la concentración exacta de la mayoría de metales, pudiendo ser mucho inferior a los límites de cuantificación y detección. En cualquier caso, el nivel de gravedad establecido se considera conservador para el análisis de riesgos.

4.2.4.3. Evaluación del riesgo

Una vez obtenido el nivel de gravedad y el nivel de probabilidad para cada uno de los agentes físico-químicos a evaluar y para cada una de las rutas de exposición, se obtiene el valor numérico asociado al riesgo según la matriz mostrada en la *Tabla 16* y se clasifica en niveles (“Aceptable”, “Asumible” y “No aceptable”) según el apartado Evaluación de riesgos. A continuación, se desarrolla el nivel de riesgo para cada uno de los parámetros.

- N-NH₄

En la *Tabla 42* se muestran resultados para las rutas de exposición del amonio.

Tabla 42

Nivel de riesgo asociado al N-NH₄

	Probabilidad	Gravedad	Nivel de riesgo	Riesgo
Ingestión del cultivo para la población en general	1	3	3	Aceptable
Ingestión indirecta por parte de los regantes	1	3	3	Aceptable

	Probabilidad	Gravedad	Nivel de riesgo	Riesgo
Inhalación por parte de la comunidad vecina	1	3	3	Aceptable
Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	1	3	3	Aceptable

Nota. Elaboración propia (2024)

Así como se puede observar, el nivel de riesgo en el amonio es aceptable para todas las rutas evaluadas, por lo que no es necesario tomar medidas de minimización del riesgo, y la reutilización del agua tratada con microalgas es segura en cuanto a efectos sobre la salud humana para este parámetro.

- N-NO₃

A continuación, se muestran los resultados para cada una de las rutas de exposición.

Tabla 43

Nivel de riesgo asociado al N-NO₃

	Probabilidad	Gravedad	Nivel de riesgo	Riesgo
Ingestión del cultivo para la población en general	2	2	4	Aceptable
Ingestión indirecta por parte de los regantes	2	2	4	Aceptable
Inhalación por parte de la comunidad vecina	1	2	2	Aceptable
Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	3	2	6	Asumible

Nota. Elaboración propia (2024)

El nivel de riesgo es aceptable para todas las rutas evaluadas, excepto para la ingestión por parte de niños en comunidad vecina, para lo cual se ha obtenido un nivel de riesgo asumible. Por tanto, es necesario tomar medidas de minimización del riesgo para que sea seguro el uso agrícola del agua regenerada en cuanto a efectos de la salud humana.

- P-PO₄

Los resultados de riesgo para fosfatos en las rutas se exponen en la *Tabla 44*.

Tabla 44

Nivel de riesgo asociado al P-PO₄

	Probabilidad	Gravedad	Nivel de riesgo	Riesgo
Ingestión del cultivo para la población en general	1	3	3	Aceptable
Ingestión indirecta por parte de los regantes	1	3	3	Aceptable
Inhalación por parte de la comunidad vecina	1	3	3	Aceptable
Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	1	3	3	Aceptable

Nota. Elaboración propia (2024)

De la misma forma, se obtiene que el nivel de riesgo en fosfato es aceptable para todas las rutas evaluadas, y que no es necesario tomar medidas preventivas para que el uso agrícola del agua regenerada en cuanto a efectos de la salud humana sea seguro.

- Conductividad

A continuación, se muestran los resultados obtenidos del riesgo para la conductividad en cada una de las rutas de exposición.

Tabla 45

Nivel de riesgo asociado a la conductividad

	Probabilidad	Gravedad	Nivel de riesgo	Riesgo
Ingestión del cultivo para la población en general	3	1	3	Aceptable
Ingestión indirecta por parte de los regantes	1	1	1	Aceptable
Inhalación por parte de la comunidad vecina	1	1	1	Aceptable
Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	1	1	1	Aceptable

Nota. Elaboración propia (2024)

Se puede observar que el nivel de riesgo para la conductividad es aceptable para todas las rutas evaluadas, por lo que no es necesario tomar medidas de minimización del riesgo, y la reutilización del agua tratada con microalgas es segura en cuanto a efectos sobre la salud humana para este parámetro.

- Turbidez

Los resultados del riesgo para la turbidez se exponen en la *Tabla 46*.

Tabla 46

Nivel de riesgo asociado a la turbidez

	Probabilidad	Gravedad	Nivel de riesgo	Riesgo
Ingestión del cultivo para la población en general	1	2	2	Aceptable
Ingestión indirecta por parte de los regantes	1	2	2	Aceptable
Inhalación por parte de la comunidad vecina	1	2	2	Aceptable
Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	1	2	2	Aceptable

Nota. Elaboración propia (2024)

Así como se muestra en la *Tabla 46*, el nivel de riesgo es aceptable para todas las rutas de exposición, no siendo necesario tomar medidas para que la reutilización de agua para uso agrícola en cuanto a riesgo a la salud humana se refiere sea seguro.

- Microplásticos

En la *Tabla 47* se muestran los resultados de los microplásticos como peligro a la salud humana para cada una de las rutas de exposición.

Tabla 47

Nivel de riesgo asociado a los microplásticos

	Probabilidad	Gravedad	Nivel de riesgo	Riesgo
Ingestión del cultivo para la población en general	3	2	6	Asumible
Ingestión indirecta por parte de los regantes	2	2	4	Aceptable
Inhalación por parte de la comunidad vecina	2	2	4	Aceptable
Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	2	2	4	Aceptable

Nota. Elaboración propia (2024)

En este caso se obtiene un riesgo “Asumible” para la ingestión del cultivo. Por tanto, para que la reutilización del agua tratada con microalgas sea segura para la salud humana para microplásticos es conveniente tomar medidas de minimización de riesgos.

- Metales

En la *Tabla 48* se muestran los resultados de cada uno de los metales evaluados como peligro a la salud humana para cada una de las rutas de exposición.

Tabla 48

Nivel de riesgo asociado a los metales

		Probabilidad	Gravedad	Nivel de riesgo	Riesgo
Níquel	Ingestión del cultivo para la población en general	1	3	3	Aceptable
	Ingestión indirecta por parte de los regantes	1	3	3	Aceptable
	Inhalación por parte de la comunidad vecina	1	3	3	Aceptable
	Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	1	3	3	Aceptable
Cromo	Ingestión del cultivo para la población en general	1	3	3	Aceptable
	Ingestión indirecta por parte de los regantes	1	3	3	Aceptable
	Inhalación por parte de la comunidad vecina	1	3	3	Aceptable
	Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	1	3	3	Aceptable
Cobre	Ingestión del cultivo para la población en general	1	2	2	Aceptable
	Ingestión indirecta por parte de los regantes	1	2	2	Aceptable

		Probabilidad	Gravedad	Nivel de riesgo	Riesgo
Cobre	Inhalación por parte de la comunidad vecina	1	2	2	Aceptable
	Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	1	2	2	Aceptable
Plomo	Ingestión del cultivo para la población en general	1	3	3	Aceptable
	Ingestión indirecta por parte de los regantes	1	3	3	Aceptable
	Inhalación por parte de la comunidad vecina	1	3	3	Aceptable
	Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	1	3	3	Aceptable
Zinc	Ingestión del cultivo para la población en general	2	2	4	Aceptable
	Ingestión indirecta por parte de los regantes	2	2	4	Aceptable
	Inhalación por parte de la comunidad vecina	1	2	2	Aceptable
	Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	2	2	4	Aceptable
Cadmio	Ingestión del cultivo para la población en general	1	3	3	Aceptable
	Ingestión indirecta por parte de los regantes	1	3	3	Aceptable
	Inhalación por parte de la comunidad vecina	1	3	3	Aceptable
	Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	1	3	3	Aceptable
Mercurio	Ingestión del cultivo para la población en general	1	2	2	Aceptable
	Ingestión indirecta por parte de los regantes	1	2	2	Aceptable
	Inhalación por parte de la comunidad vecina	1	2	2	Aceptable
	Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	1	2	2	Aceptable
Arsénico	Ingestión del cultivo para la población en general	1	2	2	Aceptable
	Ingestión indirecta por parte de los regantes	1	2	2	Aceptable
	Inhalación por parte de la comunidad vecina	1	2	2	Aceptable
	Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	1	2	2	Aceptable
Selenio	Ingestión del cultivo para la población en general	1	1	1	Aceptable
	Ingestión indirecta por parte de los regantes	1	1	1	Aceptable
	Inhalación por parte de la comunidad vecina	1	1	1	Aceptable
	Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	1	1	1	Aceptable

		Probabilidad	Gravedad	Nivel de riesgo	Riesgo
Boro	Ingestión del cultivo para la población en general	2	1	2	Aceptable
	Ingestión indirecta por parte de los regantes	2	1	2	Aceptable
	Inhalación por parte de la comunidad vecina	1	1	1	Aceptable
	Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	2	1	2	Aceptable

Nota. Elaboración propia (2024)

Tal y como se puede observar, el nivel de riesgo en los metales es aceptable para todas las rutas evaluadas, por lo que no es necesario tomar medidas de minimización del riesgo. Por tanto, la reutilización del agua tratada con microalgas es segura en cuanto a efectos sobre la salud humana para este parámetro.

En resumen, los resultados obtenidos del riesgo asociado a los parámetros físico-químicos son satisfactorios, puesto que el riesgo es aceptable. Además, no hay necesidad de tomar medidas para que el uso agrícola del agua tratada con microalgas sea seguro, exceptuando microplásticos y N-NO₃, para los cuales se propondrán barreras que minimicen ese riesgo asumible.

4.2.5. Propuesta de medidas

Según los resultados obtenidos en la evaluación de riesgos, existen agentes peligrosos que conllevan riesgos asumibles para la salud humana, para los cuales es conveniente adoptar medidas, e incluso no asumibles con necesidad de establecer medidas para que sea segura la reutilización del agua generada en el sistema caso de estudio. Asimismo, para el parámetro *E. coli* se superan concentraciones establecidas por normativa para poder reutilizar el agua regenerada.

Más concretamente, los resultados obtenidos que precisan de medidas son:

- Riesgo asumible asociado a los microplásticos por ingestión del cultivo para la población en general
- Riesgo asumible asociado al agente peligroso N-NO₃ por ingestión por parte de los niños en comunidad vecina
- Riesgo no asumible asociado a colifagos somáticos con AnMBR en todas las rutas y con UF por ingestión del cultivo para la población en general
- Concentraciones elevadas (por encima del límite legal) para el agente patógeno *E. coli* con membranas dinámicas

El Reglamento 2020/741 establece algunas medidas preventivas como controles de acceso, medidas adicionales de desinfección, requisitos específicos para el riego o para el campo agrícola, reducciones de patógenos, establecimiento de distancias mínimas y/o señalizaciones.

Por su parte, Maffetone y Gawlik (2022) proponen ejemplos de medidas preventivas para un sistema de reutilización basándose en la finalidad de las medidas (protección de las aguas residuales urbanas, tratamiento adicional del efluente, protección del sistema de almacenamiento y distribución, requisitos sobre riego o cultivos, controles de acceso y uso de señalización, y protección de trabajadores y agricultores).

Si bien es cierto que para el uso de aguas regeneradas seguras habría que establecer medidas que protejan tanto la salud humana, como animales y medio ambiente (cultivos, aguas superficiales, etc.), el alcance del estudio es asegurar que la salud humana no se ve afectada.

Por tanto, las medidas se proponen con dicha finalidad, escogiendo las definidas como “tratamiento adicional del efluente”, “controles de acceso y uso de señalización” y “protección de trabajadores y agricultores”.

A continuación, se describen las medidas propuestas para garantizar la reutilización segura del agua, distinguiendo los agentes físico-químicos de los agentes patógenos, tal y como se ha hecho a lo largo del documento.

4.2.5.1. Medidas para parámetros físico-químicos

Teniendo en cuenta que la evaluación de riesgos físico-químicos ha sido realizada de forma semicuantitativa y que no se tienen valores reales sobre dichos parámetros, no se plantea un tratamiento adicional del efluente al no poder estimar su eficacia.

Las medidas propuestas para minimizar los riesgos que suponen los microplásticos por ingestión del cultivo para la población en general y el N-NO₃ por ingestión por parte de los niños de la comunidad vecina son:

- Adoptar un sistema de control de calidad sobre el cultivo, y en su caso, disminuir la frecuencia de riego
- Señalizar el punto de riego y el sistema de distribución indicando “Agua regenerada: no beber”
- Educar mediante campañas de formación, tanto para los trabajadores como para la población en general (charlas en colegios, por ejemplo), sobre aguas regeneradas, higiene y prevención de riesgos
- Vallar la zona y restringir el acceso a personal autorizado (trabajadores de la EDAR, agricultores,...)

4.2.5.2. Medidas para agentes patógenos

Puesto que el análisis de riesgos asociado a agentes patógenos es cuantitativo, y además la normativa exige su control (reducción durante el tratamiento, valores a la salida de algunos patógenos...), se considera necesario establecer un nivel extra de tratamiento para garantizar un agua regenerada segura.

Foglia et al. (2023) propone tecnologías de afino y tecnologías de desinfección, describiendo el grupo de contaminantes a los que va dirigido y la eficiencia en su eliminación. Debido a que el uso de membranas se considera tecnología de afino, se propone una etapa de desinfección como medida a tomar.

Entre las alternativas enfocadas a *E. coli* y colífagos somáticos (agentes patógenos para los cuales es necesario establecer medidas) se encuentra el tratamiento con ácido perfórmico (PFA), con ácido peracético (PAA), con ozono (O_3), y con radiación UV.

A pesar de que el PAA tiene numerosas ventajas (eficacias elevadas, baja inversión inicial, poca dependencia del pH y cortos tiempos de contacto,...), una alta concentración de este compuesto en el efluente puede llegar a provocar efectos tóxicos en sistemas acuáticos (Foglia et al., 2023). Por su parte, el PFA es una opción relativamente reciente y los subproductos que se forman no se consideran tóxicos (Maffettone and Gawlik, 2020).

Respecto a la tecnología del ozono, es una posibilidad poco viable en el caso de estudio debido a la imposibilidad de almacenar el gas; es necesaria la generación in situ.

Entonces, la opción escogida como tratamiento adicional para mitigar los riesgos asociados a los agentes patógenos es la radiación UV. La eliminación asociada a *E. coli* y colífagos somáticos está entre 0.4 y 4.2 log reducción (Foglia et al., 2023).

En resumen, y adicionalmente a las medidas de control establecidas para los agentes físico-químicos, se propone para minimizar los riesgos asociados a los agentes patógenos lo siguiente:

- Implantar una etapa adicional de tratamiento consistente en radiación UV
- Establecer límites de vertido para colífagos somáticos para el sistema de estudio concreto, con el fin de asegurar que el riego no conlleva riesgos no asumibles para la salud humana (ver apartado *Análisis QMRA de agentes patógenos*)
- Plantear un seguimiento y control de los agentes patógenos *E. coli* y colífagos somáticos (ver apartado *Procedimiento y sistema de control*) y detener el riego en caso de considerarse no seguro

La implantación de dicha medida debe ser eficaz para el fin para el que es propuesta. Esto es, debe mitigar los riesgos asociados a los agentes patógenos y que estos sean asumibles para la salud humana.

Es por ello que, a continuación, se realiza el cálculo del riesgo residual tras implantar la medida, escogiendo para ello un valor de reducción de 2.5 log (valor coherente teniendo en cuenta que oscila entre 0.4 y 4.2).

Tabla 49

Valores de concentración de colifagos y E. coli para el cálculo QMRA

	Entrada	Salida sin medida	log reducción	log reducción medida	Salida tras medida	log reducción
Colifagos AnMBR	10	5	0.3010	2.5	1.58E-02	2.8010
Colifagos media UF	4.75	0.25	1.2788	2.5	7.91E-04	3.7788
E. coli media MD	2.97E+06	2.03E+06	0.165	2.5	6419.4	2.6653

**E. coli medida en UFC/100 mL y colifagos totales en UFC/mL*

Nota. Elaboración propia (2024)

Se puede observar, que con la medida propuesta, la concentración de *E. coli* a la salida cumple los límites legales según el Reglamento 2020/741 para clase D de agua regenerada (10000 UFC/100mL). A continuación, se muestran los riesgos residuales obtenidos tras la medida propuesta mediante el análisis QMRA.

Tabla 50

Cálculo del riesgo residual con análisis QMRA

		Dosis	Pinf	Penf	AVADp	Riesgo residual
Colifagos AnMBR	Ingestión del cultivo para la población en general	5.645E-03	3.325E-03	1.662E-03	1.396E-07	Aceptable
	Ingestión indirecta por parte de los regantes	5.645E-05	3.352E-05	1.676E-05	1.408E-09	Aceptable
	Inhalación por parte de la comunidad vecina	3.895E-05	2.313E-05	1.157E-05	9.715E-10	Aceptable
	Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	5.645E-04	3.350E-04	1.675E-04	1.407E-08	Aceptable
Colifagos UF media	Ingestión del cultivo para la población en general	2.092E-04	1.242E-04	6.211E-05	5.217E-09	Aceptable
	Ingestión indirecta por parte de los regantes	2.092E-06	1.243E-06	6.213E-07	5.219E-11	Aceptable
	Inhalación por parte de la comunidad vecina	1.444E-06	8.573E-07	4.287E-07	3.601E-11	Aceptable
	Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	2.092E-05	1.242E-05	6.212E-06	5.218E-10	Aceptable
E. coli MD media	Ingestión del cultivo para la población en general	2.409E+01	4.980E-08	1.494E-08	6.872E-11	Aceptable
	Ingestión indirecta por parte de los regantes	2.409E-01	4.980E-10	1.494E-10	6.872E-13	Aceptable
	Inhalación por parte de la comunidad vecina	1.662E-01	3.436E-10	1.031E-10	4.742E-13	Aceptable
	Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	2.409E+00	4.980E-09	1.494E-09	6.872E-12	Aceptable

Nota. Elaboración propia (2024)

Según los resultados obtenidos, la implantación de radiación UV como una etapa adicional eliminaría los riesgos asociados a los patógenos colifagos somáticos, y seguirían siendo aceptables para *E. coli*, siendo el riesgo residual para cada una de las rutas estudiadas aceptable, y consiguiendo así una reutilización segura del agua regenerada.

4.2.5.3. Requisitos de vertido

Otra de las medidas propuestas para el control de riesgos es el establecimiento de límites de vertido para el caso de estudio concreto para colifagos somáticos. Para ello, el objetivo fijado es el parámetro AVAD en lo establecido por la OMS como seguro para la salud, es decir, 10^{-6} AVAD.

Los valores que a continuación se muestran son las concentraciones y log reducción para los cuales el uso del agua regenerada es seguro para nuestro caso de estudio (con entradas promedio según apartado *Caracterización del agua residual influente y efluente*). Cabe destacar que los cálculos se han realizado para los distintos tratamientos que mostraron riesgos no asumibles (colifagos con AnMBR y colifagos con UF). No obstante, posteriormente, al definir los límites de vertido se establecerá un único límite.

Tabla 51

Concentraciones y log reducción para los cuales el uso de agua regenerada es seguro

	Entrada	Salida	log reducción
Colifagos AnMBR (UFP/mL)	10	0.0875	2.058
Colifagos media UF (UFP/mL)	4.75	0.0763	1.794

Nota. Elaboración propia (2024)

Tabla 52

Comprobación QMRA de riesgos aceptables

		Dosis	Pinf	Penf	AVADp	Riesgo
Colifagos AnMBR	Ingestión del cultivo para la población en general	4.252E-02	2.378E-02	1.189E-02	9.988E-07	Aceptable
	Ingestión indirecta por parte de los regantes	4.252E-04	2.524E-04	1.262E-04	1.060E-08	Aceptable
	Inhalación por parte de la comunidad vecina	2.934E-04	1.742E-04	8.708E-05	7.315E-09	Aceptable
	Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	4.252E-03	2.509E-03	1.255E-03	1.054E-07	Aceptable
Colifagos UF media	Ingestión del cultivo para la población en general	4.253E-02	2.379E-02	1.189E-02	9.990E-07	Aceptable
	Ingestión indirecta por parte de los regantes	4.253E-04	2.524E-04	1.262E-04	1.060E-08	Aceptable
	Inhalación por parte de la comunidad vecina	2.934E-04	1.742E-04	8.710E-05	7.316E-09	Aceptable
	Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	4.253E-03	2.510E-03	1.255E-03	1.054E-07	Aceptable

Nota. Elaboración propia (2024)

Según muestran los resultados, si las concentraciones fuesen menores que los valores de la *Tabla 51*, asumiendo que la entrada se mantiene constante en los valores promedio en el sistema, los riesgos serían asumibles.

Para el agente patógeno colifagos somáticos se tienen dos valores máximos de concentración. Es notable que para que el riesgo sea asumible en todos los casos se debe escoger el valor más restrictivo de los dos propuestos, siendo este 0.0763 UFP/mL.

4.3. Módulo III. Monitoreo

Teniendo en cuenta que se trata de un caso de estudio y que no se dispone de la información suficiente y real sobre puntos de muestreo, plan de análisis, protocolos, etc. de la EDAR, se aporta una propuesta de seguimiento y control según los resultados obtenidos en el presente estudio, que se sumaría a lo existente en la instalación.

4.3.1. Procedimiento y sistema de control

En general, y para cumplir con el Reglamento 2020/741, se debe establecer como mínimo un control de *E. coli*, DBO₅, SST y Turbidez en base a la calidad del agua regenerada (ver *Normativa aplicable*). No obstante, para garantizar un uso seguro del agua residual de forma continua no se considera suficiente un muestreo y análisis puntual de forma periódica.

Las tecnologías digitales pueden ayudar a desarrollar sistemas de control y realizar un seguimiento prácticamente en tiempo real. Con esto, se dispondría de un sistema de alerta temprana con el que se podría gestionar el reuso de las aguas regeneradas, es decir, detener la reutilización si algún indicador alerta sobre posible riesgo.

Entonces, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la evaluación de riesgos, se propone el seguimiento a continuación:

- Para los parámetros físico químicos que resultaron ser de riesgo (N-NO₃ y microplásticos) no se plantea sistema de alerta temprana ante la dificultad de establecer un valor máximo en el efluente. Si se deberá, por contra, aumentar la frecuencia de análisis de dichos parámetros y hacer un seguimiento exhaustivo de los mismos.
- El resto de parámetros físico-químicos se analizarán según el plan analítico ya existente en la EDAR, incluyendo SST y DBO₅ exigidos en el R2020/741. Se incorporarán los parámetros considerados peligrosos que en la actualidad no se estén controlando.
- Se implantará un medidor de *E. coli* en continuo a la salida del sistema de reutilización como sistema de alerta temprana por no cumplir con el límite exigido en normativa sin tratamiento con UV (con el uso de MD). En caso de superar dicho límite, será necesario detener el reuso del agua regenerada.
- Para colífagos somáticos, ante la imposibilidad de analizar en continuo el valor dado y que cumpla con el límite impuesto en el apartado *Requisitos de vertido*, se deberá incorporar al plan analítico con una frecuencia semanal, para, en caso de no cumplir, detener la reutilización de agua regenerada con la mayor brevedad posible.
- El agente patógeno esporas de *Clostridium perfringens* deberá incorporarse al plan analítico si no existe en la actualidad, y comprobar su eliminación con el análisis a la entrada y a la salida del sistema de reutilización.

En cualquier caso, si debido a las analíticas realizadas se observases cambios significativos en el promedio del influente o efluente del sistema de reutilización, se deben plantear nuevos requisitos de vertido, procedimientos en el seguimiento o incluso la incorporación de nuevos peligros potenciales.

5. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

5.1. Conclusiones

Las conclusiones obtenidas del presente trabajo sobre la realización de un Plan de Gestión del Riesgo para garantizar el uso seguro de aguas residuales urbanas tratadas con un sistema de microalgas para riego agrícola son las detalladas a continuación.

- La metodología propuesta para el análisis de riesgos cumple con los requisitos establecidos en el Reglamento (UE) 2020/741 del Parlamento Europeo y del Consejo, proporcionando un marco sólido y coherente para la evaluación de riesgos asociados con la reutilización de aguas tratadas mediante sistemas de microalgas.
- Se ha llevado a cabo una evaluación exhaustiva de los riesgos potenciales, tanto cualitativos como cuantitativos, asociados con el uso de aguas tratadas mediante sistemas de microalgas para riego agrícola. Esta evaluación abarca aspectos patógenos, físico-químicos y otros riesgos relevantes, proporcionando una comprensión completa de los posibles peligros involucrados.
- Los resultados sobre la evaluación de riesgos muestran que el uso de un sistema de microalgas con posterior tratamiento de membranas de ultrafiltración para el tratamiento de aguas residuales y su posterior reutilización es seguro en materia de salud humana para la mayoría de agentes peligrosos identificados en el sistema, excepto para N-NO_3 y microplásticos, que resultan riesgos asumibles y colifagos somáticos, con riesgo no aceptable. Por su parte, el indicador *E. coli* proporciona resultados que garantizan un uso seguro para la salud humana, aunque imposibilitan la reutilización del agua por límites de concentración regulados en la normativa, si se implantan membranas dinámicas en el tratamiento en lugar de ultrafiltración.
- Basándose en los resultados de la evaluación de riesgos, se han propuesto diversas medidas de mitigación, incluyendo la implementación de barreras adicionales (señalización), sistemas de control avanzados (alerta temprana), límites de vertido y tecnologías complementarias (radiación UV). Estas propuestas están diseñadas para minimizar los posibles riesgos identificados y garantizar la seguridad de la salud humana.

5.2. Limitaciones y futuros estudios

A lo largo del presente trabajo se han sentado las bases sobre la evaluación de riesgos y la elaboración de un Plan de Gestión del Riesgo. No obstante, se han encontrado ciertas limitaciones, entre las que destacan las siguientes:

- Respecto al análisis QMRA de patógenos, existe falta de información sobre los parámetros dosis-respuesta de la mayoría de agentes patógenos, así como de los volúmenes de exposición para todas las rutas posibles.
- No existe un estándar para el análisis de riesgos, únicamente guías para su elaboración, siendo de elección libre y por tanto, con un cierto grado de subjetividad.
- Los valores de referencia para la salud están establecidos para consumo directo (agua potable), por lo que no se ajusta al 100% al caso de estudio.
- Al tratarse de un caso de estudio teórico, no se tiene información del resto de las partes (regantes, sistema aguas arriba de la EDAR...), y por tanto el sistema de estudio queda muy acotado.

Para futuros estudios, con el fin de completar el Plan de Gestión del Riesgos, se debería trabajar en:

- Analizar los riesgos de los posibles productos de la biomasa
- Incluir riesgos mecánicos del sistema de microalgas
- Realizar análisis de peligros emergentes con análisis QCRA
- Añadir el contacto directo como posible ruta de exposición
- Extender el análisis de riesgos para el resto de grupos: medio ambiente y animales

A pesar de las limitaciones mencionadas, este estudio ha contribuido a establecer las bases sobre la realización de un Plan de Gestión del Riesgo para reutilización de aguas, proporcionando un marco para futuras investigaciones en materia de gestión hídrica sostenible. Además, subraya la importancia de considerar aspectos multidisciplinares, como lo son la ingeniería ambiental, la salud pública y la participación ciudadana, entre otros.

6. AGRADECIMIENTOS

Este Trabajo se ha realizado mediante colaboración con la Università Politecnica delle Marche (Italia) dentro del marco del proyecto “MicroAlgae 4.0” financiado por el programa HORIZON MSCA Postdoctoral Fellowships (101067621).

Agradecer también a la EDAR Conca del Carraixet, por estar siempre dispuestos a ofrecer su ayuda. A mis compañeros Juan Carlos, María y Elena, por la posibilidad de disponer de los resultados de sus proyectos. Y a mis tutores, María y Josué, por hacer tan fácil la realización de este trabajo.

En lo personal, quiero agradecer a mi familia por su apoyo incondicional. A mis amigas y compañeras del Máster por confiar siempre en mí. A Alicia y Helena, por leer, aún sin entender nada, este trabajo. En general, a toda la gente que me rodea, me siento muy afortunada.

7. REFERENCIAS

- Acién, F.G., Gómez, C., Morillas, A., Zouhayr, A., Sánchez, A., Nordio, R., Rodriguez, E., Guzman, J.L., & Fernández-Sevilla, J. M., (2023). Wastewater treatment by microalgae-based processes. En N. Piet & A. Khandelwal, *Algal Systems for Resource Recovery from Waste and Wastewater* (pp. 77-101). IWA Publishing.
- Acién, F. G., Gómez-Serrano, C., Morales-Amaral, M. D. M., Fernández-Sevilla, J. M., & Molina-Grima, E. (2016). Wastewater treatment using microalgae: how realistic a contribution might it be to significant urban wastewater treatment?. *Applied microbiology and biotechnology*, 100(21), 9013-9022. doi: 10.1007/s00253-016-7835-7.
- Adams, M. R., Grubb, S. M., Hamer, A., & Clifford, M. N. (1990). Colorimetric enumeration of *Escherichia coli* based on beta-glucuronidase activity. *Applied and Environmental Microbiology*, 56(7), 2021-2024. <https://doi.org/10.1128/aem.56.7.2021-2024.1990>
- Agua.org.mx. *Agua en el planeta*. Recuperado el 10/03/2024 de <https://agua.org.mx/en-el-planeta/>
- Akdogan, Z. y Guven, B. (2019). Microplásticos en el medio ambiente: una revisión crítica de la comprensión actual y la identificación de futuras necesidades de investigación. *Contaminación ambiental*, 254 , 113011. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113011>
- Alepu, O. E., Segun, G. A., & Ikhumhen, H. O. (2016). Formation Mechanism and Performance of Dynamic Membrane Technology for Municipal Wastewater Treatment - A Review. *Advances in Recycling & Waste Management*, 01(02). <https://doi.org/10.4172/2475-7675.1000113>

- Arashiro, L. T., Montero, N., Ferrer, I., Ación, F. G., Gómez, C., & Garfí, M. (2018). Life cycle assessment of high rate algal ponds for wastewater treatment and resource recovery. *Science of the Total Environment*, 622, 1118-1130. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.051>
- Arbib, Z., Marín, D., Cano, R., Saúco, C., Fernandez, M., Lara, E., & Rogalla, F. (2022). Large-scale demonstration of microalgae-based wastewater biorefineries. En G.N. Demirer & S. Uludag-Demirer, *Integrated Wastewater Management and Valorization Using Algal Cultures* (pp. 215-234). Elsevier.
- Armengol-Nadal, M. C. (2017). *Detección y cuantificación de patógenos en nuevos sistemas de tratamiento de aguas residuales. Reutilización de aguas y fangos* [Trabajo Fin de Máster, Universitat de València-Universitat Politècnica de Valencia].
- Asano, T., Burton, F. L., Leverenz, H. L., Tsuchihashi, R., & Tchobanoglous, G. (2007). *Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications*. Metcalf & Eddy. McGraw-Hill.
- Asociación Española de Normalización. (2014). *Seguridad en el suministro de agua potable. Directrices para la gestión del riesgo y las crisis. Parte 2: Gestión del riesgo* (UNE-EN 15975-2). <https://www.en.aenor.com>
- Barceló-Villalobos, M., Hoyo, A., Rodríguez-Miranda, E., Guzmán, J.L., Ación, F.G. (2022). A new control strategy to improve the mass transfer capacity and reduce air injection costs in raceway reactors. *New Biotechnology*, 70, 49–56. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2022.04.005>
- Becerra-Castro, C., Lopes, A. R., Vaz-Moreira, I., Silva, E. F., Manaia, C. M., & Nunes, O. C. (2015). Wastewater reuse in irrigation: A microbiological perspective on implications in soil fertility and human and environmental health. *Environment international*, 75, 117-135. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.11.001>
- Bollaín-Pastor, C., & Vicente-Agulló, D. (2019). Presencia de microplásticos en aguas y su potencial impacto en la salud pública. *Revista Española de Salud Pública*, 93, 1-10. http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1135-57272019000100012&lng=es&tlng=es.
- Browne, MA, Dissanayake, A., Galloway, TS, Lowe, DM y Thompson, RC (2008). El plástico microscópico ingerido se traslada al sistema circulatorio del mejillón, *Mytilus edulis* (L.). *Ciencia y tecnología ambientales*, 42(13), 5026–5031. <https://doi.org/10.1021/es800249a>
- Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., Locaputo, V., & Uricchio, V. F. (2020). A Detailed Review Study on Potential Effects of Microplastics and Additives of Concern on Human Health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(4), 1212. <https://doi.org/10.3390/ijerph17041212>

- Cárdenas-Calvachi, Gloria Lucia, & Sánchez-Ortiz, Iván Andrés. (2013). Nitrógeno en aguas residuales: orígenes, efectos y mecanismos de remoción para preservar el ambiente y la salud pública. *Universidad y Salud*, 15(1), 72-88. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S012471072013000100007&lng=en&tlng=es
- Casagli, F., Zuccaro, G., Bernard, O., Steyer, J. P., & Ficara, E. (2021). ALBA: A comprehensive growth model to optimize algae-bacteria wastewater treatment in raceway ponds. *Water research*, 190, 116734. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116734>
- Cavaillon, J. M., & Chrétien, F. (2019). From septicemia to sepsis 3.0-from Ignaz Semmelweis to Louis Pasteur. *Genes and immunity*, 20(5), 371–382. <https://doi.org/10.1038/s41435-019-0063-2>
- Celina-Barreiro, María. (2020). *Puesta a punto de una metodología para la determinación de microorganismos patógenos en aguas residuales depuradas. Mediciones preliminares en una planta piloto*. [Trabajo Fin de Máster, Universitat de València-Universitat Politècnica de València].
- Centers for Disease Control and Prevention. (2014). *E. coli (Escherichia coli)*. Recuperado 13 de marzo de 2024, de <https://www.cdc.gov/ecoli/index.html>
- Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua. (s.f). *Características del agua residual*. Universidad de Salamanca. Recuperado de <https://cidta.usal.es>
- Chfadi, T., Gheblawi, M., & Thaha, R. (2021). Public acceptance of wastewater reuse: new evidence from factor and regression analyses. *Water*, 13(10), 1391. <https://doi.org/10.3390/w13101391>
- Christou, A., Agüera, A., Bayona, J. M., Cytryn, E., Fotopoulos, V., Lambropoulou, D., ... & Fatta-Kassinou, D. (2017). The potential implications of reclaimed wastewater reuse for irrigation on the agricultural environment: the knowns and unknowns of the fate of antibiotics and antibiotic resistant bacteria and resistance genes—a review. *Water research*, 123, 448-467.
- Climate Adapt. (s.f). *Estrés hídrico medio anual (proyecto ClimWatAdapt, 2025, SUE)*. https://climate-adapt.eea.europa.eu/es/metadata/map-graphs/annual-average-water-stress-climwatadapt-project-2025-sue?set_language=es
- De Jesús Alba, J., Ortega, J. L., Álvarez, G., Cervantes, M., Ruiz, E., Urtiz, N., & Martínez, A. (2013). Riesgos microbiológicos en agua de bebida: una revisión clínica. *Química Viva*, 12(3), 215-233. <https://www.redalyc.org/pdf/863/86329278004.pdf>
- De León Elvira, E. (2023). *Puesta a punto de los métodos de control de patógenos y validación de los métodos para aguas regeneradas para uso agrícola* [Trabajo Fin de Máster, Universitat de València].

- Directiva del Consejo, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. (1991). *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, 135, de 30 de mayo de 1991.
- Directiva 98/15/CE de la Comisión, de 27 de febrero de 1998, por la que se modifica la Directiva 91/271/CEE del Consejo en relación con determinados requisitos establecidos en su anexo I. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, 67, de 7 de marzo de 1998.
- Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, 327, de 22 de diciembre de 2000.
- Entitat Pública de Sanejament d'Aigües Residuals de la Comunitat Valenciana. EPSAR (s. f.). *Cuenca del Carraixet*. Recuperado 24 de febrero de 2024, de <https://www.epsar.gva.es/index.php/va/cuenca-del-carraixet>
- European Environment Agency (2021). *Water resources across Europe— confronting water stress: an updated assessment*. Publications Office of the European Union.
- European Union. European Regional Development Fund (2020). *Water reuse policies advancement for resource efficient. Aquares A1.3 – Water reuse technology application guide*.
- EPHC, NRMMC, AHMC (2006). *Australian guidelines for water recycling: managing health and environmental risks (Phase 1)*. Environment Protection and Heritage Council, Natural Resource Management Ministerial Council, Australian Health Ministers Conference.
- ESYRCE. (2023). *Encuesta sobre superficies y rendimientos cultivos (ESYRCE). Resultados Provisionales Nacionales y Autonómicos*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- Fernández, F. G. A., Reis, A., Wijffels, R. H., Barbosa, M., Verdelho, V., & Llamas, B. (2021). The role of microalgae in the bioeconomy. *New biotechnology*, 61, 99–107. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2020.11.011>
- Ferrer-Polo, J., Seco-Torrecillas, A., & Robles-Martínez, Á. (2018). *Tratamientos biológicos de aguas residuales*. Editorial Universitat Politècnica de València.
- Foglia, A., González-Camejo, J., Radini, S., Sgroi, M., Li, K., Eusebi, A. L., & Fatone, F. (2023). Transforming wastewater treatment plants into reclaimed water facilities in waterunbalanced regions. An overview of possibilities and recommendations focusing on the Italian case. *Journal of Cleaner Production*, 410, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137264>
- Galvín, R. M. (2014). Control de calidad en las aguas residuales y regeneradas: parámetros a controlar en función de las normativas aplicables y nuevas tendencias. *Tecnoaqua*, (5), 50-63. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5388866>

- Gharib, A. A., Blumberg, J., Manning, D. T., Goemans, C., & Arabi, M. (2023). Assessment of vulnerability to water shortage in semi-arid river basins: The value of demand reduction and storage capacity. *The Science of the total environment*, 871, 161964. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161964>
- Gil-Fernández, L. (2022). *Determinación de cloruros en aguas residuales procedentes de la industria agroalimentaria* [Trabajo Fin de Grado, Universidad de Oviedo].
- Giménez-Sánchez, G. (2017). *Evaluación de riesgo biológico por legionella en torres de refrigeración. Evaluación de riesgos higiénicos de la EDAR. Evaluación de riesgos biológicos en análisis de aguas negras en laboratorio* [Trabajo Fin de Grado, Universitat Politècnica de València].
- González-Camejo, J. (2019). *Assessment of the flat-pannel membrane photobioreactor technology for wastewater treatment: Outdoor application to treat the effluent of an anaerobic membrane bioreactor* [Tesis doctoral no publicada, Universitat Politècnica de València]. <http://hdl.handle.net/10251/133056>
- González-Camejo, J., Pachés, M., Marín, A., Jiménez-Benítez, A., Seco, A., & Barat, R. (2020). Production of microalgal external organic matter in a Chlorella-dominated culture: Influence of temperature and stress factors. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 6(7), 1828-1841. [10.1039/d0ew00176g](https://doi.org/10.1039/d0ew00176g)
- González-Camejo, J., Aparicio, S., Pachés, M., Borrás, L., & Seco, A. (2022). Comprehensive assessment of the microalgae-nitrifying bacteria competition in microalgae-based wastewater treatment systems: Relevant factors, evaluation methods and control strategies. *Algal Research*, 61, 102563. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102563>
- Gonzalez-Camejo, J., Morales, A., Peña-Lamas, J., Lafita, C., Enguídanos, S., Seco, A., & Martí, N. (2023). Feasibility of rapid gravity filtration and membrane ultrafiltration for the removal of microplastics and microlitter in sewage and wastewater from plastic industry. *Journal of Water Process Engineering*, 51, 103452. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103452>
- Haas, C.N., Rose, J.B. & Gerba C.P. (1999). *Quantitative microbial risk assessment*. John Wiley & Sons, Inc.
- INE. (2020). *Usos del agua reutilizada por comunidades y ciudades autónomas, tipo de uso y periodo*. Instituto Nacional de Estadística.
- ISO. (2018). *Gestión del riesgo — Directrices*. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:31000:ed-2:v1:es>
- Jaramillo, M. F., & Restrepo, I. (2017). Wastewater reuse in agriculture: A review about its limitations and benefits. *Sustainability*, 9(10), 1734. <https://doi.org/10.3390/su9101734>
- Jodar-Abellan, A., López-Ortiz, M. I., & Melgarejo-Moreno, J. (2019). Wastewater Treatment and Water Reuse in Spain. Current Situation and Perspectives. *Water*, 11(8), 1-23. <https://doi.org/10.3390/w11081551>

- Khalid, N., Hussain, M., Young, H. S., Boyce, B., Aqeel, M., & Noman, A. (2018). Effects of road proximity on heavy metal concentrations in soils and common roadside plants in Southern California. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 35257-35265. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3218-1>
- Larrea-Murrell, J. A., Rojas-Badía, M. M., Romeu-Álvarez, B., Rojas-Hernández, N. M., & Heydrich-Pérez, M. (2013). Bacterias indicadoras de contaminación fecal en la evaluación de la calidad de las aguas: Revisión de la literatura. *Revista CENIC Ciencias Biológicas*, 44(3), 24-34. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181229302004>
- Lavie, E., Morábito, J. A., Salatino, S. E., Bermejillo, A., & Filippini, M. F. (2010). Contaminación por fosfatos en el oasis bajo riego del río Mendoza. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 42(1), 169-184. <https://www.redalyc.org/pdf/3828/382837646012.pdf>
- Leal, M (2020). *La gestión del riesgo en el nuevo Reglamento de reutilización* [Jornada online]. Madrid, España. https://www.mapa.gob.es/images/es/201028_gestiondelriesgo_jornadamapa_mariale_al_tcm30-550736.pdf
- Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas. (1985). *Boletín Oficial de Estado*, 189, de 8 de agosto de 1985. <https://www.boe.es/eli/es/l/1985/08/02/29>
- Lin, X., Xu, J., Keller, A. A., He, L., Gu, Y., Zheng, W., ... & Li, G. (2020). Occurrence and risk assessment of emerging contaminants in a water reclamation and ecological reuse project. *Science of the Total Environment*, 744, 140977.
- Maffettone, R., & Gawlik, B. M. (2022). *Technical Guidance Water Reuse Risk Management for Agricultural Irrigation Schemes in Europe*. Joint Research Centre (JRC), Publications Office of the European Union.
- Marazzi, F., Bellucci, M., Rossi, S., Fornaroli, R., Ficara, E., & Mezzanotte, V. (2019). Outdoor pilot trial integrating a sidestream microalgae process for the treatment of centrate under non optimal climate conditions. *Algal Research*, 39, 101430. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101430>
- Mediterranean Wastewater Reuse Working Group. (2007). *Mediterranean wastewater reuse report*. Recuperado 24 de febrero de 2024, de <http://www.emwis.net/topics>
- Ministerio de Derechos Sociales y Agenda 2030—Agenda 2030. (2021). *Objetivos de Desarrollo Sostenible/ODS*. Recuperado 7 de marzo de 2024, de <https://www.mdsocialesa2030.gob.es/agenda2030/index.htm>
- Ministerio de Sanidad (s.f.). *Sanidad ambiental y laboral*. Recuperado el 11 de mayo de 2024, <https://www.sanidad.gob.es/profesionales/saludPublica/saludAmbLaboral/calidadAguas/aguaRegen/home.htm>
- Mora-Sánchez, J. F., Ribes, J., González-Camejo, J., Seco, A., & Ruano, M. V. (2024). Towards Optimisation of Microalgae Cultivation through Monitoring and Control in Membrane Photobioreactor Systems. *Water*, 16(1), 155. <https://doi.org/10.3390/w16010155>

- Morató-Farreras, J., Subirana, A., Gris, A., Carneiro, A., & Pastor Zegarra, R. M. (2006). Tecnologías sostenibles para la potabilización y el tratamiento de aguas residuales. *Revista lasallista de investigación*, 3(1), 19-29. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69530105>
- Morillas-Espana, A., Lafarga, T., Sánchez-Zurano, A., Ación-Fernández, F. G., & González-López, C. (2022). Microalgae based wastewater treatment coupled to the production of high value agricultural products: Current needs and challenges. *Chemosphere*, 291(3), 132968. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132968>
- Murtas, S., Seis, W., Housni, S., & Fatone, F. (2023). *D1.3: Early warning and improved decision support for health protection in water reuse and bathing water*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7998114>
- Muñoz-Cruz, A. (2008). *Caracterización y tratamiento de aguas residuales* [Trabajo Fin de Licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo].
- Nascimento, T. A., Fdz-Polanco, F., & Peña, M. (2020). Membrane-Based Technologies for the Up-Concentration of Municipal Wastewater: A Review of Pretreatment Intensification. *Separation and Purification Reviews*, 49(1), 1-19. 71 <https://doi.org/10.1080/15422119.2018.1481089>
- Odjadjare, E. C., Mutanda, T., & Olaniran, A. O. (2017). Potential biotechnological application of microalgae: a critical review. *Critical Reviews in Biotechnology*, 37(1), 37-52. <https://doi.org/10.3109/07388551.2015.1108956>
- Ofori, S., Puškáčová, A., Růžicková, I., & Wanner, J. (2021). Treated wastewater reuse for irrigation: Pros and cons. *Science of The Total Environment*, 760, 144026. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144026>
- OMS. (2018). *Guías para la calidad del agua de consumo humano*. World Health Organization.
- OMS. (2019, 22 de agosto). *Microplásticos en el agua potable* [Comunicado de prensa]. <https://www.who.int/es/news/item/22-08-2019-who-calls-for-more-research-into-microplastics-and-a-crackdown-on-plastic-pollution>
- Ortega-Pérez, I. (2023). *Simulation of a microalgae-based cultivation process to reduce energy and reagent consumption in an urban wastewater treatment plant evaluated with DESASS* [Trabajo Fin de Máster, Universitat de València].
- Pastor, R. L., Pinna-Hernández, M. G., & Fernández, F. A. (2023). Technical and economic viability of using solar thermal energy for microalgae drying. *Energy Reports*, 10, 989-1003. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.07.040>
- Percival, S. L., & Williams, D. W. (2013). *Escherichia coli*. En Steven L. Percival, Marylynn V. Yates, David W. Williams, Rachel M. Chalmers, Nicholas F. Gray (Eds.), *Microbiology of Waterborne Diseases: Microbiological Aspects and Risks: Second Edition* (pp. 89-117). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415846-7.00006-8>

- QMRA. (s.f.). *Quantitative Microbial Risk Assessment*. Recuperado 10 de enero de 2024, de <https://qmrawiki.org/>.
- Rai, PK, Lee, J., Brown, RJC y Kim, KH (2021). Contaminación por micro y nanoplásticos: comportamiento, ecología microbiana y tecnologías de remediación. *Revista de Producción Más Limpia*, 291, 125240. <https://doi.org/10.1016/j.iclepro.2020.125240>
- Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. (2007). *Boletín Oficial de Estado*, 294, de 8 de diciembre de 2007. <https://boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2007-21092>
- Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo del Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas. (1996). *Boletín Oficial de Estado*, 77, de 29 de marzo de 1996. <https://www.boe.es/eli/es/rd/1996/03/15/509/con>
- Real Decreto 2116/1998, de 2 de octubre, por el que se modifica el Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo del Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas. (1995). *Boletín Oficial de Estado*, 251, de 20 de octubre de 1998. <https://www.boe.es/eli/es/rd/1998/10/02/2116>
- Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas. (2001). *Boletín Oficial de Estado*, 176, de 24 de julio de 2001. <https://www.boe.es/eli/es/rdlg/2001/07/20/1>
- Real Decreto-ley 4/2023, de 11 de mayo, por el que se adoptan medidas urgentes en materia agraria y de aguas en respuesta a la sequía y al agravamiento de las condiciones del sector primario derivado del conflicto bélico en Ucrania y de las condiciones climatológicas, así como de promoción del uso del transporte público colectivo terrestre por parte de los jóvenes y prevención de riesgos laborales en episodios de elevadas temperaturas. (2023). *Boletín Oficial de Estado*, 113, de 12 de mayo de 2023. <https://www.boe.es/eli/es/rdl/2023/05/11/4/con>
- Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas. (1995).). *Boletín Oficial de Estado*, 312, de 30 de diciembre de 1995. <https://www.boe.es/eli/es/rdl/1995/12/28/11>
- Reglamento (UE) 2020/741 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de mayo de 2020, relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del agua. *Diario Oficial de la Unión Europea*, 177, de 5 de junio de 2020. <https://eurlex.europa.eu/eli/reg/2020/741/oj>
- Robles, Á., Capson-Tojo, G., Gales, A., Viruela, A., Sialve, B., Seco, A., ... & Ferrer, J. (2020). Performance of a membrane-coupled high-rate algal pond for urban wastewater treatment at demonstration scale. *Bioresource technology*, 301, 122672. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122672>

- Rojas-Castillo, J.C. (2023). *Evaluation of the sewage treatment and microalgae biomass recovery of indigenous microalgaebacteria consortium*. [Trabajo Fin de Máster, Universitat Politècnica de València-Universitat de València].
- Romero-Rojas, J. A. (1999). *Tratamiento de aguas residuales por lagunas de estabilización*. Alfaomega.
- Sanz, L. A. (2012). *Evaluación y gestión del riesgo asociado a la reutilización de aguas residuales*. [Doctoral dissertation, Universitat de Barcelona].
- Sanz, A. R., Rivas, L. I. R., Salvador, V. Z., Caraco, E. F., & Egaña, I. C. (2021). Microplásticos: su toxicidad y valores alerta pendientes de establecer. *Tecnoaqua*, (50), 46-52.
- Sánchez-Zurano, A., Rodríguez-Miranda, E., Guzmán, J. L., Acien-Fernández, F. G., Fernández-Sevilla, J. M., & Molina Grima, E. (2021). ABACO: a new model of microalgae-bacteria consortia for biological treatment of wastewaters. *Applied Sciences*, 11(3), 998. <https://doi.org/10.3390/app11030998>
- Seiler, C., & Berendonk, T. U. (2012). Heavy metal driven co-selection of antibiotic resistance in soil and water bodies impacted by agriculture and aquaculture. *Frontiers in microbiology*, 3, 399. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00399>
- Shahid, M., Khalid, S., Abbas, G., Shahid, N., Nadeem, M., Sabir, M., ... & Dumat, C. (2015). Heavy metal stress and crop productivity. *Crop production and global environmental issues*, 1-25. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23162-4_1
- Tejada-Tovar, C., Villabona-Ortiz, Á., & Garcés-Jaraba, L. (2015). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *TecnoLógicas*, 18(34), 109-123. <https://doi.org/10.22430/22565337.209>
- Tzanakakis, V.A.; Paranychianakis, N.V.; Angelakis, A.N. (2020). Water Supply and Water Scarcity. *Water*, 12(9), 2347. <https://doi.org/10.3390/w12092347>
- Viruela, A., Robles, Á., Durán, F., Ruano, M. V., Barat, R., Ferrer, J., & Seco, A. (2018). Performance of an outdoor membrane photobioreactor for resource recovery from anaerobically treated sewage. *Journal of Cleaner Production*, 178, 665-674. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.223>

Anexo I. Cálculos completos

A continuación, se muestran los cálculos puntuales del análisis QMRA para el agente patógeno *E. coli* con la condición de membranas de UF y MD, colifagos somáticos con UF y *Clostridium perfringens* con AnMBR.

Escherichia coli UF

Tabla A 1ⁱ

Datos previos para cálculo de la dosis

	Entrada	Salida UF	log red.
<i>E. coli</i> M2	8.92E+05	90.9*	3.9918
<i>E. coli</i> M3	2.91E+06	1	6.4639
<i>E. coli</i> M4	2.82E+06	1	6.4502
<i>E. coli</i> M5	3.18E+06	1	6.5024

*Se considera un error experimental el valor obtenido en la salida de UF

Tabla A 2

QMRA E.coli para la medición nº2 en UF

<i>E. coli</i> M2	Dosis	Pinf	Penf	AVADp	Riesgo
Ingestión del cultivo para la población en general	2.277E-01	4.708E-10	1.412E-10	6.497E-13	Aceptable
Ingestión indirecta por parte de los regantes	2.277E-03	4.708E-12	1.412E-12	6.497E-15	Aceptable
Inhalación por parte de la comunidad vecina	1.571E-03	3.249E-12	9.746E-13	4.483E-15	Aceptable
Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	2.277E-02	4.708E-11	1.412E-11	6.497E-14	Aceptable

Tabla A 3

QMRA E.coli para la medición nº3 en UF

<i>E. coli</i> M3	Dosis	Pinf	Penf	AVADp	Riesgo
Ingestión del cultivo para la población en general	1.547E-03	3.198E-12	9.595E-13	4.414E-15	Aceptable
Ingestión indirecta por parte de los regantes	1.547E-05	3.197E-14	9.592E-15	4.412E-17	Aceptable
Inhalación por parte de la comunidad vecina	1.067E-05	2.198E-14	6.595E-15	3.034E-17	Aceptable
Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	1.547E-04	3.200E-13	9.599E-14	4.416E-16	Aceptable

Tabla A 4

QMRA E.coli para la medición nº4 en UF

<i>E. coli</i> M4	Dosis	Pinf	Penf	AVADp	Riesgo
Ingestión del cultivo para la población en general	1.550E-03	3.205E-12	9.616E-13	4.423E-15	Aceptable
Ingestión indirecta por parte de los regantes	1.550E-05	3.197E-14	9.592E-15	4.412E-17	Aceptable
Inhalación por parte de la comunidad vecina	1.070E-05	2.220E-14	6.661E-15	3.064E-17	Aceptable
Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	1.550E-04	3.206E-13	9.619E-14	4.425E-16	Aceptable

Tabla A 5

QMRA E.coli para la medición nº5 en UF

<i>E. coli</i> M5	Dosis	Pinf	Penf	AVADp	Riesgo
Ingestión del cultivo para la población en general	1.538E-03	3.179E-12	9.538E-13	4.388E-15	Aceptable
Ingestión indirecta por parte de los regantes	1.538E-05	3.175E-14	9.526E-15	4.382E-17	Aceptable
Inhalación por parte de la comunidad vecina	1.061E-05	2.198E-14	6.595E-15	3.034E-17	Aceptable
Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	1.538E-04	3.180E-13	9.539E-14	4.388E-16	Aceptable

Escherichia coli MD

Tabla A 6

Datos previos para cálculo de la dosis

	Entrada	Salida MD	log red.
<i>E. coli</i> M2*	8.92E+05	2.270E+06	-0.4057
<i>E. coli</i> M3	2.91E+06	2.730E+06	0.0277
<i>E. coli</i> M4	2.82E+06	1.450E+06	0.2889
<i>E. coli</i> M5	3.18E+06	1.910E+06	0.2214

*Se considera M2 un outlier por valores anómalos (valor a la salida > valor a la entrada)

Tal y como se puede observar, destaca la muestra nº2 por ser la medición a la salida de la membrana mayor a la de la entrada.

Esta muestra se evaluó como un outlier, y no se tuvo en cuenta en el promedio que se muestra en el apartado *Caracterización del agua residual influente y efluente* del documento.

Tabla A 7

QMRA E.coli para la medición nº3 en MD

<i>E. coli</i> M3	Dosis	Pinf	Penf	AVADp	Riesgo
Ingestión del cultivo para la población en general	9.845E+05	2.022E-03	6.065E-04	2.790E-06	No aceptable
Ingestión indirecta por parte de los regantes	9.845E+03	2.035E-05	6.106E-06	2.809E-08	Aceptable
Inhalación por parte de la comunidad vecina	6.793E+03	1.404E-05	4.213E-06	1.938E-08	Aceptable
Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	9.845E+04	2.034E-04	6.102E-05	2.807E-07	Aceptable

Tabla A 8

QMRA E.coli para la medición nº4 en MD

<i>E. coli</i> M4	Dosis	Pinf	Penf	AVADp	Riesgo
Ingestión del cultivo para la población en general	5.019E+04	1.037E-04	3.112E-05	1.432E-07	Aceptable
Ingestión indirecta por parte de los regantes	5.019E+02	1.038E-06	3.113E-07	1.432E-09	Aceptable
Inhalación por parte de la comunidad vecina	3.463E+02	7.160E-07	2.148E-07	9.881E-10	Aceptable
Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	5.019E+03	1.038E-05	3.113E-06	1.432E-08	Aceptable

Tabla A 9

QMRA E.coli para la medición nº5 en MD

<i>E. coli</i> M5	Dosis	Pinf	Penf	AVADp	Riesgo
Ingestión del cultivo para la población en general	8.627E+04	1.783E-04	5.348E-05	2.460E-07	Aceptable
Ingestión indirecta por parte de los regantes	8.627E+02	1.784E-06	5.351E-07	2.461E-09	Aceptable
Inhalación por parte de la comunidad vecina	5.953E+02	1.231E-06	3.692E-07	1.698E-09	Aceptable
Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	8.627E+03	1.784E-05	5.351E-06	2.461E-08	Aceptable

Colifagos somáticos UF

Tabla A 10

Datos previos para cálculo de la dosis

	Entrada	Salida UF	log red.
Colifagos somáticos M1	6	0.5	1.0792
Colifagos somáticos M2	3.5	Sin presencia	6*

**Es el valor mínimo por normativa al no haber presencia a la salida*

En el caso de la M2, se consideran riesgos aceptables para todas las rutas estudiadas al no haber presencia de colifagos somáticos a la salida de la UF.

Tabla A 11

QMRA colifagos somáticos para la medición nº1 en UF

Colifagos somáticos M1	Dosis	Pinf	Penf	AVADp	Riesgo
Ingestión del cultivo para la población en general	4.633E-01	1.699E-01	8.495E-02	7.136E-06	No Aceptable
Ingestión indirecta por parte de los regantes	4.633E-03	2.733E-03	1.367E-03	1.148E-07	Aceptable
Inhalación por parte de la comunidad vecina	3.197E-03	1.890E-03	9.449E-04	7.937E-08	Aceptable
Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	4.633E-02	2.578E-02	1.289E-02	1.083E-06	No Aceptable

Esporas de Clostridium perfringens AnMBR

Tabla A 12

Datos previos para cálculo de la dosis

	Entrada	Salida UF	log red.
Clostridium perfringens M1	9.00E+04	1.50	4.7782
Clostridium perfringens M2	1.20E+05	Sin presencia	4*
Clostridium perfringens M3	2.82E+06	1.50	4.7752

**Es el valor mínimo por normativa al no haber presencia a la salida*

En el caso de la M2, se consideran riesgos aceptables para todas las rutas estudiadas al no haber presencia de esporas de *Clostridium perfringens* a la salida del AnMBR.

Tabla A 13

QMRA esporas de Clostridium perfringens para la medición nº1 en AnMBR

<i>Clostridium perfringens</i> M1	Dosis	Pinf	Penf	AVADp	Riesgo
Ingestión del cultivo para la población en general	3.14E-03	1.85E-04	1.30E-04	1.94E-07	Aceptable
Ingestión indirecta por parte de los regantes	3.14E-05	1.85E-06	1.30E-06	1.94E-09	Aceptable
Inhalación por parte de la comunidad vecina	2.17E-05	1.28E-06	8.95E-07	1.34E-09	Aceptable
Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	3.14E-04	1.85E-05	1.30E-05	1.94E-08	Aceptable

Tabla A 14

QMRA esporas de Clostridium perfringens para la medición nº3 en AnMBR

<i>E. coli</i> M3	Dosis	Pinf	Penf	AVADp	Riesgo
Ingestión del cultivo para la población en general	3.14E-03	1.85E-04	1.30E-04	1.95E-07	Aceptable
Ingestión indirecta por parte de los regantes	3.14E-05	1.85E-06	1.30E-06	1.95E-09	Aceptable
Inhalación por parte de la comunidad vecina	2.17E-05	1.28E-06	8.95E-07	1.34E-09	Aceptable
Ingestión por parte de los niños en comunidad vecina	3.14E-04	1.85E-05	1.30E-05	1.95E-08	Aceptable

ⁱ Todas las tablas presentadas en el Anexo son de elaboración propia