



TRABAJO FIN DE MÁSTER:

***Evaluación ambiental del tratamiento  
de las aguas residuales de una  
depuradora biológica.***

**UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE COMPOSTELA**

ESCUELA T CNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA

**MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

Realizado en colaboración con las empresas Adantia S.L. y Viaqua S.A.U.

Autor: Alba Rodríguez Zurdo



TRABAJO FIN DE MÁSTER:

***Evaluación ambiental del tratamiento  
de las aguas residuales de una  
depuradora biológica.***



**UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE COMPOSTELA**

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA

**MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

Realizado en colaboración con las empresas Adantia S.L. y Viaqua S.A.U.

Autor: Alba Rodríguez Zurdo



**Francisco Omil Prieto, Gumersindo Feijoo Costa** Catedráticos del Departamento de Ingeniería Química en la Universidad de Santiago de Compostela, y **María de los Ángeles Díaz Díaz**, Técnico de Medio Ambiente en Adantia S.L.,

INFORMAN:

Que la presente memoria titulada "**Evaluación ambiental del tratamiento de las aguas residuales de una depuradora biológica.**" constituye el Trabajo Fin de Máster presentado en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Santiago de Compostela por **Alba Rodríguez Zurdo**, como requisito para obtener el título de Máster Oficial en Ingeniería Ambiental y que cuenta con la autorización y dirección de los respectivos tutores para su presentación y defensa.

Santiago de Compostela, a 7 de Febrero de 2018

Fdo. Francisco Omil Prieto

Fdo. Gumersindo Feijoo Costa

Fdo. María de los Ángeles Díaz Díaz



## ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS .....	6
RESUMEN .....	8
1. INTRODUCCIÓN .....	14
1.1. Marco normativo.....	14
1.2. Evolución del tratamiento de aguas residuales .....	18
1.3. Tratamiento de aguas residuales en Galicia.....	19
1.4. Objetivo del trabajo .....	21
2. EDAR OBJETO DE ESTUDIO.....	23
2.1. Características EDAR tras obra mejora 2.010.....	25
2.2. Actuaciones propuestas en el proyecto de mejora año 2.015.....	27
2.3. Características EDAR actual.....	28
3. ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA .....	42
3.1. Definición de objetivo y alcance.....	43
3.1.1. <i>Objetivo</i> .....	43
3.1.2. <i>Unidad funcional</i> .....	44
3.1.3. <i>Sistema</i> .....	44
3.1.4. <i>Límites del sistema</i> .....	46
3.2. Análisis del inventario .....	46
3.3. Evaluación del impacto.....	52
3.4. Interpretación de los resultados .....	54
3.4.1. <i>Resultados de cada escenario</i> .....	54
3.4.2. <i>Comparación de los dos escenarios y categorías relevantes</i> .....	57
3.4.3. <i>Contribución de cada subsistema</i> .....	60
4. ANALISIS DE ECOEFICIENCIA .....	64
4.1. Cálculo de costes económicos.....	64
4.2. Resultados del análisis de ecoeficiencia .....	68
5. CONCLUSIONES .....	70
6. BIBLIOGRAFÍA .....	72
ANEXOS.....	76
ANEXO A. Principales datos del estudio.....	78
ANEXO B. Datos de precipitación.....	80
ANEXO C. Consumo eléctrico.....	82
ANEXO D. Inventario del Ciclo de Vida.....	87
ANEXO E. Resultados del ACV.....	88
ANEXO F. Resultados del análisis de costes.....	98



## AGRADECIMIENTOS

Agradecer a Francisco Omil Prieto y Gumersindo Feijoo Costa, su tiempo, su ayuda y su orientación a lo largo de estos meses.

A M<sup>a</sup> de los Ángeles Díaz Díaz le agradezco su implicación, colaboración, paciencia y apoyo en todo el proceso, así como la ayuda con la redacción de este documento.

Al Excelentísimo Concello de Xinzo de Limia, a Santiago Rodríguez González (Jefe de Planta de la EDAR objeto de este estudio) y a Viaqua S.A.U. por la colaboración y por la facilitación de los datos necesarios para realizar este trabajo.

A todos los miembros de Adantia S.L., Roberto, María, Tamara, Jordi, Ruth, Pablo, Antonio, Miguel, Victoriano, Carolina, César, Miguel y Lucía, por su acogida, su buena intención en todo momento y la ayuda que siempre me han prestado, y sobre todo por haberme hecho sentir como una más dentro de la empresa.

Agradecer también el apoyo de mi familia, y de mis amigos



## RESUMEN

El presente trabajo de fin de máster plantea como objetivo principal la realización de una evaluación ambiental del tratamiento de las aguas residuales de la depuradora biológica de Xinzo de Limia (Ourense).

Esta planta de tratamiento construida en el año 1.999 fue sometida a dos obras de mejora. La primera de ellas en el año 2.010 y la última en el 2.015. El objetivo de esta última fue mejorar la capacidad de eliminación de nutrientes ya que el medio receptor está declarado como zona sensible por Resolución del 10 de julio de 2.006 de la Secretaría General para el Territorio y la Biodiversidad.

Para ello, se ha empleado la metodología del Análisis del Ciclo de Vida (ACV), que permite identificar la distribución de las cargas medioambientales en los productos generados a lo largo de la vida útil de un proceso, identificando y cuantificando el uso de materia, energía y los vertidos al entorno para determinar el impacto de los mismos, y poder evaluar y llevar a la práctica estrategias de mejora ambiental.

Para la realización del ACV se ha elegido 1 m<sup>3</sup> de agua tratada como unidad funcional, referenciando a ella todos los datos necesarios (caracterización del agua, consumo de reactivos, generación de residuos y fangos, consumo eléctrico y transporte) para realizar el estudio. Se han definido 2 escenarios, uno anterior a las obras de 2.015 y otro posterior a las mismas, para poder compararlos mediante esta metodología.

A través del software SimaPro 7.0 y la metodología ReCiPe Midpoint (H), se han evaluado todos los datos del estudio que completan el ACV. Los resultados obtenidos muestran una disminución significativa del impacto en el escenario 2 respecto al escenario 1, excepto en la eutrofización del agua dulce, donde se produce un leve incremento, y se define como principal hot spot el consumo de electricidad.

Para completar el estudio de la EDAR se realizó una evaluación de la ecoeficiencia desde la perspectiva del ciclo de vida, a partir de los costes y del análisis del ciclo de vida de la EDAR de Xinzo de Limia. Obteniéndose como resultado una disminución de los costes en el escenario 2, de manera que se puede afirmar que la gestión ambiental en este estudio integra el beneficio ambiental con el económico.



## RESUMO

O presente traballo de fin de master expón como obxectivo principal a realización dunha avaliación ambiental do tratamento das augas residuais da depuradora biolóxica de Xinzo de Limia (Ourense).

Esta planta de tratamento construída no ano 1.999 foi sometida a dúas obras de mellora. A primeira delas no ano 2.010 e a última no 2.015. O obxectivo desta última foi mellorar a capacidade da eliminación de nutrientes xa que o medio receptor está declarado como zona sensible por Resolución do 10 de xullo de 2.006 da Secretaría Xeral para o Territorio e a Biodiversidade.

Para iso empregouse a metodoloxía do ACV que permite identificar a distribución das cargas ambientais nos produtos xerados ao longo da vida útil dun proceso, identificando e cuantificando o uso de materia, enerxía e as verteduras á contorna para determinar o impacto dos mesmos, e poder avaliar e levar á práctica estratexias de mellora ambiental. Elixíuse 1 m<sup>3</sup> de auga tratada como unidade funcional, referenciando a ela todos os datos necesarios (caracterización da auga, consumo de reactivos, xeración de residuos e lodos, consumo eléctrico e transporte) para realizar o estudo. Definíronse 2 escenarios, un anterior ás obras de 2.015 e outro posterior ás mesmas, para poder comparalos mediante Análises de Ciclo de Vida.

A través do software SimaPro 7.0 e a metodoloxía ReCiPe Midpoint (H), avaliáronse todos os datos do estudo que completan o ACV. Os resultados obtidos mostran unha diminución significativa do impacto no escenario 2 respecto ao escenario 1, excepto na eutrofización da auga doce, onde se produce un leve incremento, e defínese como principal hot spot o consumo de electricidade.

Para completar o estudo da EDAR realizouse unha avaliación da ecoeficiencia dende a perspectiva do ciclo de vida, a partir dos costes e análise do ciclo de vida da EDAR de Xinzo de Limia. Obténdose como resultado unha diminución dos costes no escenario 2, de xeito que se pode afirmar que a xestión ambiental neste estudo integra o beneficio ambiental co económico.



## ABSTRACT

The purpose of this study is to carry out an environmental evaluation of Xinzo de Limia's waste water treatment plant (WWTP).

This WWTP was built in 1999 and was subjected to two different upgrades in 2010 and 2015, respectively. The aim of the improvements was to strengthen its capacity to eliminate nutrients, since the receiving environment was declared sensitive region by the Land and Biodiversity Secretary-General's administrative decision on 10 July 2008.

To that end, the Life Cycle Analysis (LCA) assessment was used. This method allows to evaluate the environmental burdens associated with the products generated throughout a process life cycle by identifying and quantifying the energy and materials used, and spills released into the environment. In other words, it assesses the impact of the energy and materials consumed and discharges released into the environment to identify strategies for environmental protection.

To carry out the LCA, one cubic meter (1 m<sup>3</sup>) of water has been chosen as a functional unit. All data, such as water characterization, chemical reactants consumption, solids wastes and sewage sludge generation, power consumption and transport, refers to the functional unit. The scenarios here compared are the plants before the improvement works in 2015 and after the execution of such upgrade. All data has been evaluated via SimaPro 7.0 software and ReCiPe Midpoint (H) methodology. The results obtained show a significant decrease of the impact in the second scenario, regarding the former. Except for the fresh water eutrophication where a minor increase is noticeable and the power consumption is the main hot spot.

To complete the WWTP study an evaluation of the eco-efficiency, from a life-cycle perspective, was carried out. This was based on the operating costs and the life cycle analysis of Xinzo de Limia's WWTP. The results show lower costs in the second scenario, so it is safe to state that the environmental management in this study integrates both the environmental and economic gain.



# 1. INTRODUCCIÓN

El incremento de la industrialización, urbanización y el crecimiento de la población al que se enfrenta el planeta en los últimos años, ha aumentado considerablemente la contaminación ambiental, la destrucción del hábitat y la afección a la calidad del aire, del agua y del suelo.

En este contexto, el tratamiento y depuración del agua son las primeras medidas a desarrollar para alcanzar la salubridad de la población. Las aguas residuales no tratadas pueden quedar contaminadas por microorganismos nocivos y representar un riesgo para la salud pública. Asimismo, contienen nutrientes, como nitrógeno y fósforo, capaces de dañar las aguas dulces y el medio marino, al favorecer la eutrofización (proliferación excesiva de algas).

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales urbanas tienen como objetivo principal reducir algunas características indeseables, de tal forma que el uso o disposición final de estas aguas, cumpla con las directrices y requisitos mínimos definidos por la normativa vigente de un determinado país o región. La selección de tecnologías para el saneamiento y depuración de las aguas residuales deberán permitir la reducción de las cargas contaminantes del vertido hasta límites aceptables para el medio receptor. Manteniendo de esta forma el estado ecológico de las masas de agua, ecosistemas acuáticos y humedales asociados. En el caso de que las aguas depuradas no se viertan en el medio, sino que se reutilicen en la agricultura, ganadería, industria u en otros fines, se hablará también de regeneración de aguas residuales y no simplemente de depuración.

A continuación, se resumen las normativas vigentes en España, y en concreto en Galicia, en materia de aguas residuales.

## 1.1. Marco normativo

La depuración de aguas residuales urbanas, en Europa y por ende en España, es una práctica obligada desde la publicación de la Directiva 91/271/CEE de 21 de mayo, donde se define como principal objetivo proteger al medio ambiente de los efectos negativos de los vertidos de las aguas residuales urbanas y de los sectores industriales. El cumplimiento de este objetivo ha supuesto la construcción y puesta en marcha de multitud de instalaciones, que garanticen la recogida y tratamiento de aguas, en función del tamaño de la aglomeración y características de la zona de vertido, quedando pendiente un número importante de instalaciones por construir, para garantizar los requerimientos mínimos exigidos por la Directiva. Estos requerimientos se recogen en la *Tabla 1*.

**Tabla 1.** Tratamientos exigidos por la Directiva 91/271/CEE en función de la población y zona de vertido.

<b>VERTIDO EN AGUAS COSTERAS</b>				
<b>Tamaño aglomeración</b>	<b>Zona menos sensible</b>		<b>Zona normal</b>	<b>Zona sensible</b>
0 a 10.000 h-e	T.A.		T.A.	T.A.
10.000 a 150.000 h-e	T.1º.		T.2º.	T.M.R.
> 150.000 h-e	T.2º. (o T.1º.)		T.2º.	T.M.R.
<b>VERTIDO EN AGUAS DULCES Y ESTUARIOS</b>				
<b>Tamaño aglomeración</b>	<b>Zona menos sensible</b>	<b>Zona normal alta montaña</b>	<b>Zona normal</b>	<b>Zona sensible</b>
0 a 2.000 h-e	T.A.	T.A.	T.A.	T.A.
2.000 a 10.000 h-e	T.1º.	T.2º.	T.2º.	T.2º.
> 10.000 h-e	T.2º.	T.2º.	T.2º.	T.M.R.

T.A.: Tratamiento adecuado. T.1º.: Tratamiento primario. T.2º.: Tratamiento secundario. T.M.R.: tratamiento más riguroso que el secundario.

**Tratamiento adecuado (T.A.):** Tratamiento de las aguas residuales urbanas mediante cualquier proceso y/o sistema de eliminación en virtud del cual, después del vertido de dichas aguas, las aguas receptoras cumplan los objetivos de calidad y las disposiciones pertinentes de la presente ley y de las restantes Directivas comunitarias.

**Tratamiento primario (T.1º.):** Tratamiento de aguas residuales urbanas mediante un proceso físico y/o químico que incluya la sedimentación de sólidos en suspensión, u otros procesos en los que la DBO<sub>5</sub> de las aguas residuales que entren se reduzca por lo menos en un 20 % antes del vertido y el total de sólidos en suspensión en las aguas residuales de entrada se reduzca por lo menos en un 50 % (*Tabla 2*).

**Tratamiento secundario (T.2º.):** Tratamiento de aguas residuales urbanas mediante un proceso que incluya, por lo general, un tratamiento biológico con sedimentación secundaria, u otro proceso en el que se respeten los requisitos del cuadro 1 del Anexo I (*Tabla 3*).

**Tratamiento más riguroso (T.M.R.):** Tratamiento mediante el cual según la Directiva 91/271/CE, para el caso de vertidos de instalaciones realizados en zonas sensibles cuyas aguas sean eutróficas o tengan tendencia a serlo en un futuro próximo, se reduzca el nitrógeno total, o ambos parámetros de acuerdo con los requisitos especificados en la *Tabla 4*.

**Tabla 2.** Requisitos para los vertidos de EDAR mediante tratamiento primario fijados por la Directiva 91/271/CEE en el Anexo I.

Parámetros	Porcentaje mínimo de reducción (a)
<b>DBO<sub>5</sub></b>	20%
<b>Total sólidos en suspensión</b>	50%

(a) Reducción relacionada con la carga del caudal de entrada.

**Tabla 3.** Requisitos para los vertidos de EDAR mediante tratamiento secundario (a) fijados por la Directiva 91/271/CEE en el Anexo I.

Parámetros	Concentración	Porcentaje mínimo de reducción (b)
<b>DBO<sub>5</sub> (c) (demanda bioquímica de oxígeno)</b>	<b>25 mg/L O<sub>2</sub></b>	<b>70-90%</b>
<b>DQO (demanda bioquímica de oxígeno)</b>	<b>125 mg/L O<sub>2</sub></b>	<b>75%</b>
<b>Total sólidos en suspensión</b>	<b>35 mg/L (d)</b>	<b>90 % (d)</b>

(a) O proceso equivalente. Se aplicará el valor de concentración o el porcentaje de reducción.

(b) Reducción relacionada con la carga del caudal de entrada.

(c) Este parámetro puede sustituirse por otro: carbono orgánico total (COT) o demanda total de oxígeno (DTO), si puede establecerse una correlación entre la DBO<sub>5</sub> y el parámetro sustituto.

(d) Este requisito es optativo. Los análisis de vertidos procedentes de sistemas de depuración por lagunaje se llevarán a cabo sobre muestras filtradas; no obstante, la concentración de sólidos en suspensión en las muestras de agua sin filtrar no deberá superar los 150 mg/L.

**Tabla 4.** Requisitos para los vertidos de EDAR mediante tratamiento más riguroso (a) fijados por la Directiva 91/271/CEE en el Anexo I.

Parámetros	Concentración		Porcentaje mínimo de reducción (b)
	10.000 a 100.000 h-e	> 100.000 h-e	
<b>Fósforo total</b>	2 mg/L P	1 mg/L P	80%
<b>Nitrógeno total (c)</b>	15 mg/L N (d)	10 mg/L N	70-80%

(a) Según la situación local se podrá aplicar uno o los dos parámetros. Se aplicará el valor de la concentración o el porcentaje de reducción.

(b) Reducción relacionada con la carga del caudal de entrada.

(c) Nitrógeno total equivalente a la suma del nitrógeno Kjeldahl total (N orgánico y amoniacal), nitrógeno en forma de nitrato (NO<sub>3</sub>) y nitrógeno en forma de nitrito (NO<sub>2</sub>).

(d) Estos valores de concentración constituyen medias anuales según el punto 3º del apartado A)2 del Anexo III del RD. 509/96. No obstante los requisitos relativos al nitrógeno pueden comprobarse mediante medias diarias cuando se demuestre, que de conformidad con el apartado A)1 del Anexo III se obtiene el mismo nivel de protección. En este caso la media diaria no deberá superar los 20 mg/L de Nitrógeno total para todas las muestras, cuando la temperatura del efluente del reactor biológico sea superior o igual a 12°C. En sustitución del requisito relativo a la temperatura, se podrá aplicar una limitación del tiempo de funcionamiento que tenga en cuenta las condiciones climáticas regionales.

La Directiva 91/271/CEE, fue transpuesta al ordenamiento jurídico español mediante el Real Decreto Ley 11/1995, de 28 de diciembre por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de aguas residuales urbanas. El 1.996 se aprobó el Real Decreto 509/1996 del 15 de marzo de desarrollo del citado del Real Decreto Ley 11/1995, que complementa las normas sobre recogida, depuración y vertido de las aguas residuales urbanas. Con posterioridad el Real Decreto 2116/1998, que modifica el Real Decreto 509/1996, para recoger la Directiva 98/15/CEE, por la que se modifica la Directiva 91/271/CEE, en relación con determinados requisitos establecidos en su Anexo I.

En el caso de que las aguas depuradas no sean vertidas al medio y se reutilicen, se dará cumplimiento del Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la Reutilización de aguas depuradas.

Existe también una regulación que afecta al medio receptor y que es importante tener en cuenta, ya que fija los valores máximos de UFC (Unidades formadoras de colonias), y son el Real Decreto 927/1988 De 29 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de la Administración Pública del Agua y de la Planificación Hidrológica, en desarrollo de los títulos II y III de la Ley de Aguas; la Directiva 2006/7/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de febrero de 2.006, relativa a la gestión de la calidad de las aguas de baño.

En Galicia, en materia de saneamiento y depuración de aguas cabe destacar la Ley 9/2010, de 4 de noviembre, de Aguas de Galicia, tiene por finalidad garantizar las necesidades básicas de uso de agua de la población, favoreciendo el desarrollo económico y social de la Comunidad Autónoma de Galicia y compatibilizándolo con la preservación del buen estado de los ecosistemas acuáticos y ecosistemas terrestres asociados. Uno de los objetivos de esta ley es ordenar el ciclo integral del agua de uso urbano y establecer las bases para una gestión eficiente de los servicios de abastecimiento, saneamiento y depuración. En cuanto a los límites de vertido, aunque esta ley deroga la Ley 8/2001 de protección de la calidad de las aguas de las rías de Galicia y de ordenación del servicio público de depuración de aguas residuales urbanas, mantiene los preceptos de la misma en el ámbito de las rías que son objeto de especial protección. En el Anexo II se definen los objetivos de calidad de las rías y en el Anexo III se especifican los valores límite de emisión de los vertidos efectuados desde tierra a las rías. En este Anexo III no se incluyen valores límite de los parámetros DQO, DBO<sub>5</sub>, SST, N<sub>T</sub> y P<sub>T</sub>.

En la Comunidad Autónoma de Galicia, cabe destacar la Ley 5/2006, de 30 de junio, para la protección, la conservación y la mejora de los ríos gallegos, donde se declara prioridad de interés general la conservación del patrimonio natural fluvial, incluyendo la biodiversidad de la flora y la fauna, así como el patrimonio etnográfico e histórico-cultural relacionado.

## 1.2. Evolución del tratamiento de aguas residuales

La primera EDAR fue construida en Berlín en el año 1.884 usando la tecnología de filtros verdes. Sin embargo, la comunidad científica comenzó a investigar cómo incrementar la presencia de microorganismos durante el tratamiento de las aguas. La respuesta apareció en 1.914 gracias al fango, y en 1.920 el primer reactor de fangos activos a escala real empezó a operar en Inglaterra. Después de los fangos activos, el siguiente paso era eliminar materia orgánica y oxidar el nitrógeno. Estas tecnologías comenzaron a mejorar, a la vez que aparecían y mejoraban las tecnologías para la eliminación de fósforo. En 1.960 empezaron a desarrollarse los biorreactores de membrana (*Rodríguez, 2.013*).

En la década de los 80 los avances tecnológicos se produjeron por consideraciones ambientales (por ejemplo, ríos salmónidos en Asturias), y en la década de los 90 fueron debidos a indicadores marcados por la legislación (como la definición de zonas sensibles).

En líneas generales, en las últimas décadas los avances más importantes están relacionados con mejorar la eficiencia y conseguir la reutilización de las aguas y los fangos (*Cajigas, 2.012*). Algunas de las acciones que se están llevando a cabo se exponen a continuación:

- Sustitución de sistemas de aireación mediante turbinas por elementos de difusión de aire por burbujas.
- Introducción de cámaras anóxicas para la eliminación de nutrientes.
- Desplazamiento en algunas ocasiones del sistema clásico de fangos activos por sistemas de biofiltración, procesos con membranas y sistemas híbridos.
- Incorporación de etapas complementarias, destinadas a la reutilización del agua tratada en las EDAR (para distintos usos reglados por la legislación), como la desinfección mediante rayos ultravioletas (UV), membranas de microfiltración y ultrafiltración, o electrodiálisis reversible y ósmosis inversa.
- Tendencia hacia la disminución del volumen generado de fangos, así como su aprovechamiento desde un punto de vista energético o agrícola.

Si se aplican todas estas mejoras, las EDAR dejarán de considerarse como tecnologías de final de línea, sino que serán parte de una sociedad más sostenible (*Gallego, 2.008*).

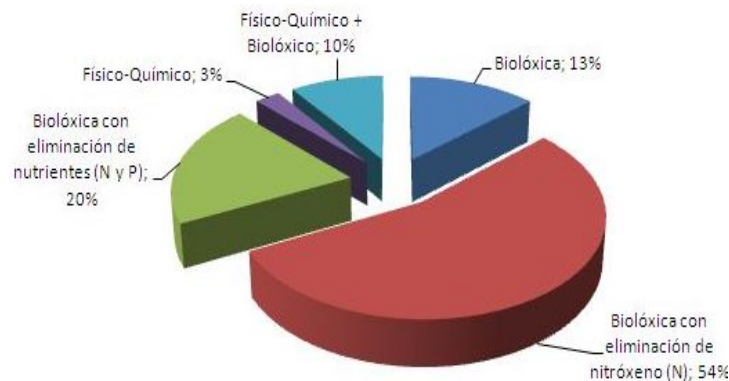
Es por ello, que en la actualidad muchas de las instalaciones de tratamiento de aguas residuales existentes, en ocasiones, por nuevas exigencias en las normativas debidas a las necesidades del medio receptor, se someten a obras de mejora, como es el caso de la EDAR objeto de estudio.

### 1.3. Tratamiento de aguas residuales en Galicia

En la Comunidad Autónoma de Galicia, actualmente, hay 159 EDAR de más de 2.000 habitantes equivalentes; 69 de ellas en la provincia de A Coruña, 42 en Pontevedra, 31 en Lugo y 17 en Ourense (*Figura 1*). En cuanto a la tipología, un 13% son fisicoquímicas y un 87% biológicas (*Figura 2*) (*Aguas de Galicia*).



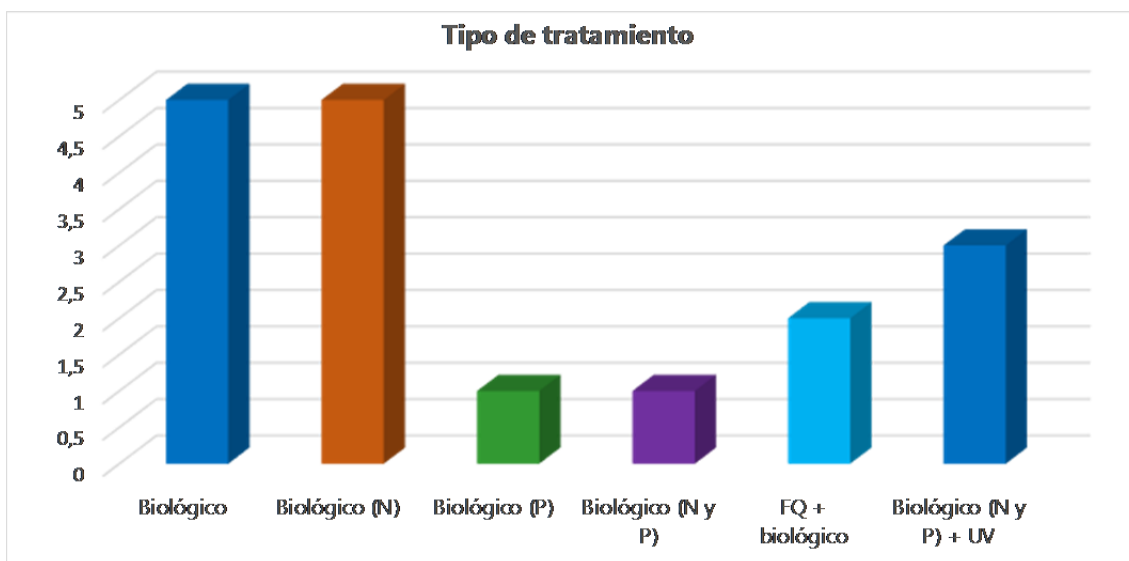
**Figura 1:** Distribución de las EDAR de Galicia. Fuente: Aguas de Galicia.



**Figura 2:** Tipología de las EDAR de Galicia. Fuente: Aguas de Galicia.

La EDAR objeto de estudio se localiza en la provincia de Ourense, por ello a continuación se enumera la tipología de las 17 instalaciones en funcionamiento de más de 2.000 h-e de esta provincia (*Tabla 5*). Es importante señalar que 7 de las 17 vierten su efluente a zonas sensibles, aunque Arnoia y Ribadavia no se consideran porque son aglomeraciones menores de 10.000 habitantes equivalentes (*Tabla 6*).

En cuanto a su tipología, predominan las plantas biológicas, ya sea sin eliminación de nutrientes o con eliminación de nitrógeno y/o fósforo. Además, la mayoría de las plantas que cuentan con eliminación de ambos nutrientes, disponen de desinfección ultravioleta (UV). Existen también dos plantas que tienen tratamiento fisicoquímico además de biológico. Como se puede observar no hay ninguna planta únicamente fisicoquímica (*Figura 3*).



**Figura 3.** Tipos tratamiento EDAR Provincia Ourense. Fuente: Adaptado de Aguas de Galicia.

**Tabla 5.** EDAR provincia de Ourense. Fuente: Adaptado de Aguas de Galicia.

EDAR	Organismo de Cuenca	Masa de agua	H-E	Tipo de tratamiento <sup>1</sup>
<b>A Rúa</b>	CH Miño-Sil	Embalse de Martín	12.500	Biológico + FQ
<b>Allariz</b>	CH Miño-Sil	Río Arnoia II	6.500	Biológico (N)
<b>Arnoia</b>	CH Miño-Sil	Embalse de Frieira	2.000	Biológico (N)
<b>Baños de Molgas</b>	CH Miño-Sil	Río Arnoia II	2.300	Biológico
<b>Beariz</b>	CH Miño-Sil	Río Cardelle	2.500	Biológico
<b>Carballiño</b>	CH Miño-Sil	Río Arenteiro II	19.000	Biológico (N)
<b>Carrás</b>	CH Miño-Sil	Rego de Varon	11.950	Biológico (N y P)+UV
<b>Castro Caldelas</b>	CH Miño-Sil	Río Edo I	2.279	Biológico
<b>Celanova</b>	CH Miño-Sil	Río Orille	10.000	Biológico
<b>Maceda</b>	CH Miño-Sil	Río Maceda	3.500	Biológico
<b>O Barco de Valdeorras</b>	CH Miño-Sil	Embalse de Santiago	13.124	Biológico (P)
<b>Reza (Ourense)</b>	CH Miño-Sil	Embalse de Castrelo	350.000	Biológico (N Y P)+UV
<b>Ribadavia</b>	CH Miño-Sil	Embalse de Frieira	7.200	Biológico (N)
<b>San Cibrao das Viñas</b>	CH Miño-Sil	Río Barbaña	55.000	FQ + biológico (P)
<b>Trives</b>	CH Miño-Sil	Embalse de Montefurado	2.500	Biológico (N)
<b>Verín</b>	CH Duero	Río Tamega	30.000	Biológico (N y P)
<b>Xinzo de Limia</b>	CH Miño-Sil	Río Limia	13.500	Biológico (N y P) +UV

<sup>1</sup>. Tipología de tratamiento. (N) se refiere a eliminación de nitrógeno, (P) a la eliminación de fósforo, (N y P) indica eliminación de nitrógeno y fósforo, y UV desinfección ultravioleta.

**Tabla 6.** Zonas sensibles en la provincia de Ourense.

Nombre Zona Sensible (Directiva 91/271/CEE)	EDAR	Declaración	Parámetro	Normativa
<i>Embalse de Frieira</i>	Arnoia	28/06/2006	P	RESOLUCIÓN de 10 de julio de 2006, de la Secretaría General para el Territorio y la Biodiversidad, por la que se declaran las Zonas Sensibles en las Cuencas Hidrográficas Intercomunitarias
	Ribadavia			
<i>Embalse das Conchas</i>	Xinzo de Limia			
<i>Albufeira do Torrao/Cuenca vertiente del río Támega</i>	Verín	28/06/2006	N y P	
<i>Embalse de Castrelo</i>	Ourense	28/07/2011	P	
	San Cibrao das Viñas			
<i>Embalse de Santiago</i>	O Barco	28/07/2011		

<sup>2</sup>. Parámetro. N se refiere a nitrógeno y P a fósforo.

#### 1.4. Objetivo del trabajo

El presente trabajo de fin de máster plantea como objetivo principal la realización de una evaluación ambiental del tratamiento de las aguas residuales de la depuradora biológica de Xinzo de Limia (Ourense).

Esta EDAR construida en el año 1.999, ha sido sometida a dos obras de mejora. La primera de ellas en el año 2.010 y la última en el 2.015. El objetivo de esta última fue mejorar la capacidad de eliminación de nutrientes ya que el medio receptor está declarado como zona sensible por Resolución del 10 de julio de 2.006 de la Secretaría General para el Territorio y la Biodiversidad.

El planteamiento que se sigue es el Análisis del Ciclo de Vida de dos escenarios definidos. Uno con anterioridad a las obras de mejora (año 2.015) y otro posterior a las mismas (año 2.016), incluyendo la recopilación de los datos y la realización de los cálculos adecuados para cuantificar las entradas y salidas de cada uno de ellos.

El Análisis de Ciclo de Vida comienza en los años sesenta, sin embargo, fue a finales de los noventa cuando la International Standards Organization (ISO) desarrolló una metodología estandarizada para ACV en la serie 14000. Las normas 14040 y 14044 establecen una metodología general para realizar este análisis (Rodríguez, 2013).

El ACV determina los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados con un producto o proceso: compilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema; evaluando los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y

salidas, e interpretando los resultados de las fases de inventario e impacto en relación con los objetivos del estudio (ISO 14.040:1997 – 2006).

Las relaciones entre medio ambiente y economía han cobrado importancia en los últimos años como consecuencia de las crisis energéticas y ambientales asociadas a los procesos de desarrollo económico. Teniendo en cuenta los beneficios de la gestión ambiental, es posible reducir los costes manteniendo el equilibrio entre el desarrollo económico, el crecimiento de la población, el uso racional de los recursos, y la protección y conservación del medio ambiente. Por lo que, para completar el estudio de la EDAR se ha decidido realizar una evaluación de la ecoeficiencia desde la perspectiva del ciclo de vida, a partir de la estimación de los costes de explotación y del análisis del ciclo de vida de la EDAR de Xinzo de Limia.

## 2. EDAR OBJETO DE ESTUDIO

El concello de Xinzo de Limia tiene una red de saneamiento de 87,99 km, contando con un total de 9 EDAR que dan servicio a toda su población, 8 de ellas son compactas. Además, cuenta con núcleos que disponen de saneamiento autónomo, así como fosas sépticas. Su población total es de 10.004 habitantes (datos del 2.016) de los que 1.586 no tienen acceso a tratamiento de aguas residuales (*Tabla 7*).

**Tabla 7.** Datos Saneamiento Xinzo de Limia. Fuente: EIEL<sup>i</sup>.

Datos Saneamiento Xinzo de Limia	
<i>Red de saneamiento (km)</i>	87,99
<i>Nº EDAR que dan servicio</i>	9
<i>Nº de fosas sépticas</i>	21
<i>Nº de habitantes sin tratamiento de EDAR</i>	1.586
<i>Nº de núcleos con saneamiento autónomo</i>	33

En la *Figura 4* se muestra la Red de Saneamiento, conectada a la EDAR objeto de estudio, que comprende el núcleo de Xinzo de Limia y el barrio de Baronzás.



**Figura 4.** Red de saneamiento Xinzo de Limia. Fuente: EIEL<sup>ii</sup>.

<sup>i</sup> EIEL: <http://eiel.depourense.es/fichas> Consultado en: Diciembre de 2.017.

En la localidad de Xinzo de Limia se ubica un parque empresarial puesto en funcionamiento por la entidad pública Xestur Ourense que está conectado a la EDAR objeto de este estudio. Su contribución supone un 4% de la carga total de la estación depuradora de aguas residuales. Su uso es industrial-comercial y cuenta con una superficie de 300.000 m<sup>2</sup>, ocupado al 100%.

Además de la actividad industrial, es importante considerar la agricultura y ganadería del municipio, ya que puede afectar a los valores de la caracterización del agua de la EDAR, así como a sus emisiones, por ejemplo, de metales pesados. En el caso de Xinzo de Limia, cuenta con 45.081 cabezas de ganado, y una superficie total de aprovechamiento de tierras de 7.729,73 Ha (*Tabla 8*).

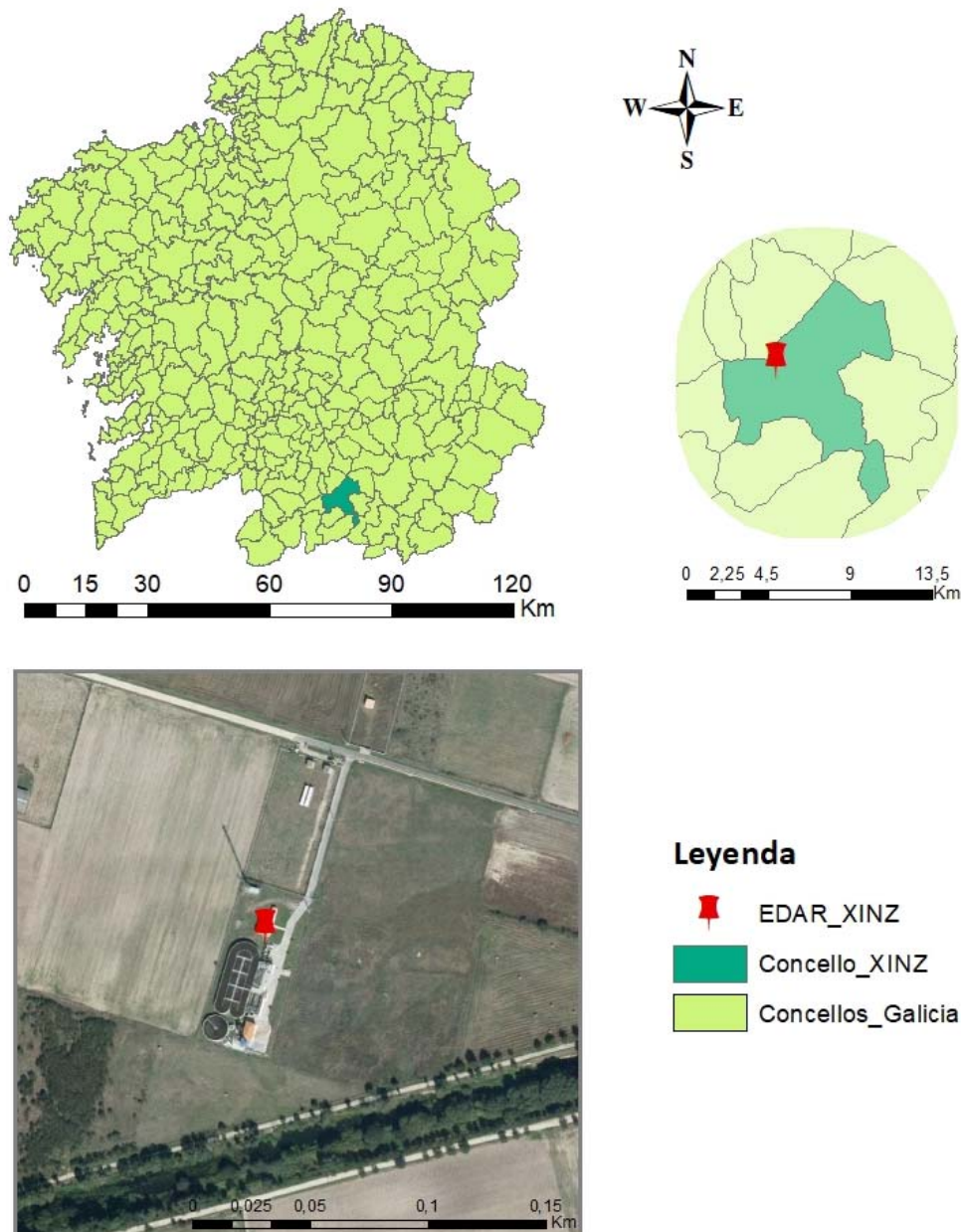
**Tabla 8.** Cabezas de ganado, datos agricultura. Fuente: Censo agrario INE<sup>ii</sup>.

<b>Datos de agricultura y ganadería</b>	
<b>Cabezas de ganado</b>	
Bovino	2.700
Ovino	4.065
Caprino	390
Equino	21
Porcino	37.905
<b>Agricultura</b>	
Superficie total de tierras (Ha)	7.729,73

La EDAR evaluada en este trabajo se encuentra en el municipio de Xinzo de Limia, situado en el sur de la provincia de Orense siendo la capital de la Comarca de La Limia (*Figura 5*). La EDAR vierte Río Limia dentro del Sistema de Explotación Limia, perteneciente a la Confederación Hidrográfica Miño-Sil. El punto de vertido está clasificado como zona sensible por Resolución de 10 de julio de 2.006, de la Secretaría General para el Territorio y la Biodiversidad, por la que se declaran las Zonas Sensibles en las Cuencas Hidrográficas Intercomunitarias.

La instalación fue construida en el año 1.999 y ha sido sometida a dos obras de mejora, la primera de ellas en el año 2.010 y la última en el 2.015. Después de la primera reforma, la EDAR tenía problemas asociados al incumplimiento de parámetros de vertido en lo relativo a la eliminación de nutrientes. Por dicha razón en el año 2015, la Confederación Hidrográfica Miño – Sil, promueve la redacción del proyecto de mejora de la capacidad de eliminación de nutrientes de la EDAR de Xinzo de Limia (Ourense) (*MAGRAMA, 2014*).

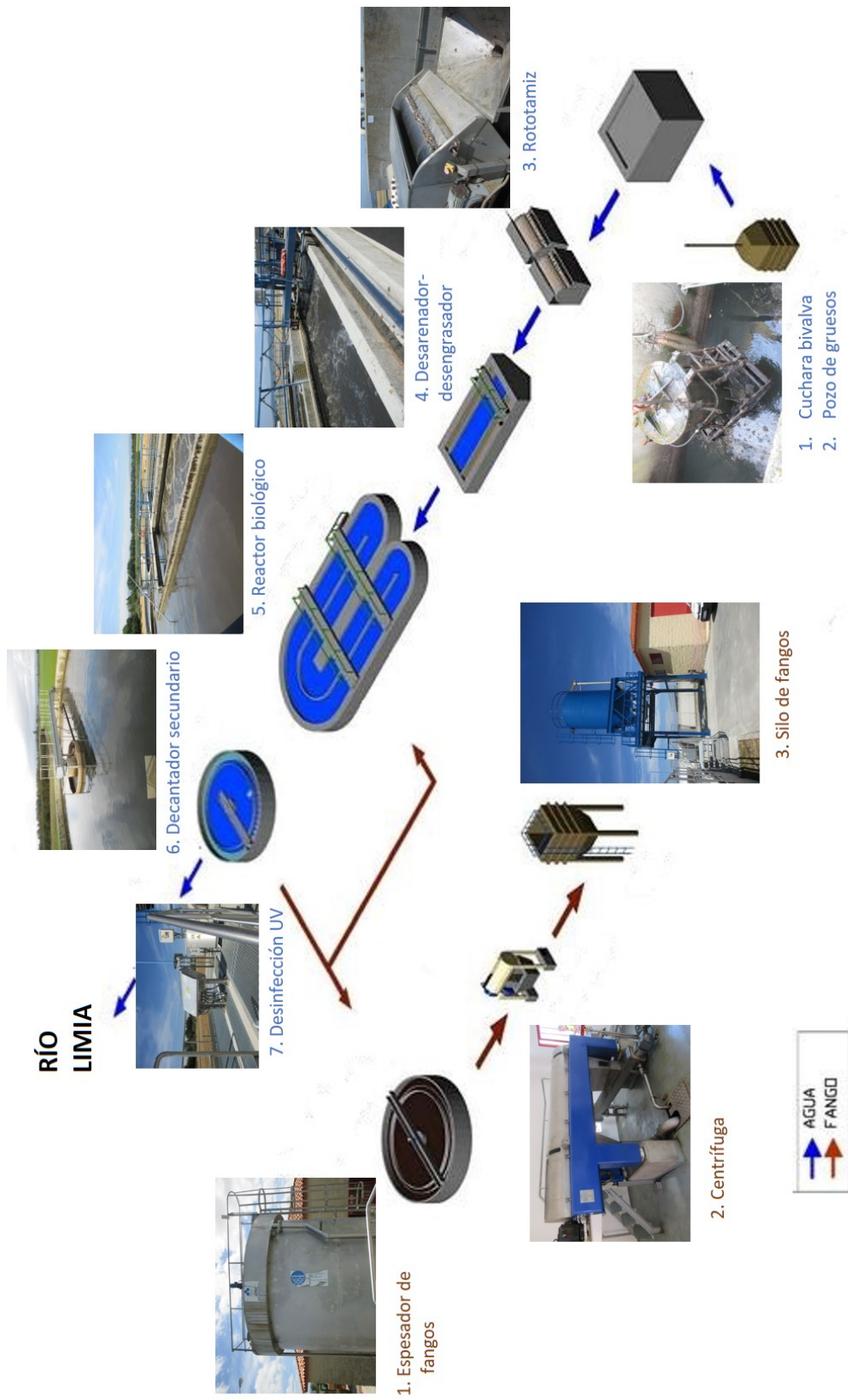
<sup>ii</sup> Censo agrario del INE. <http://www.ine.es> . Consultado en: Diciembre 2.017.



**Figura 5.** Localización de la EDAR de Xinzo de Limia. Fuente: Elaboración propia.

## 2.1. Características EDAR tras obra mejora 2.010

La EDAR de Xinzo de Limia (*Figura 6*) constaba de una cuchara bivalva, rototamices, canal desarenador-desengrasador aireado, tratamiento biológico de fangos activos en modalidad aireación prolongada con eliminación de nitrógeno en un reactor tipo carrusel y eliminación química de fósforo. Disponía de un decantador circular y desinfección mediante radiación UV. Los fangos eran espesados por gravedad y se deshidrataban en una centrífuga, previo acondicionamiento con polielectrolito, para finalmente ser almacenados en un silo.



**Figura 6.** Esquema depuradora Xinzo de Limia tras obras de mejora año 2.010. Fuente: Elaboración propia.

## 2.2. Actuaciones propuestas en el proyecto de mejora año 2.015

Las obras de mejora del año 2.015 comprenden la sustitución del sistema de aireación actual del reactor biológico por un sistema de turbo soplantes y difusores de burbuja fina, distribuidos en dos parrillas. También la habilitación del volumen del antiguo decantador lamelar como cámara anaerobia previa al sistema biológico para la eliminación biológica de fósforo.

Además, se propone el incremento de la capacidad de espesado de fangos y la sustitución de la mayor parte de los equipos electromecánicos originales de la planta por otros nuevos de mayor eficiencia, así como la implementación de instrumentación avanzada (sondas en continuo) y variadores de frecuencia en los motores que permitan una gestión avanzada de los costes energéticos y de reactivos (*MAGRAMA, 2014*).

Las alternativas que se propusieron para mejorar la capacidad y eficiencia de la EDAR son: (*MAGRAMA, 2014*)

- En el pozo de gruesos y bombeo de agua bruta, sustituir la reja de gruesos manual por un equipo de limpieza automática.
- En el bombeo de agua bruta, sustituir las bombas por otras con rodete resistente a la abrasión, equipadas con variador de frecuencia.
- Ejecutar un nuevo desarenador, manteniendo el actual como elemento de apoyo. Sustituir todos los equipos originales del sistema.
- Habilitar el decantador lamelar de la EDAR original, fuera de uso, como cámara anaerobia, para la eliminación de fósforo por vía biológica, previa al reactor en aireación prolongada en carrusel.
- Implementar un nuevo sistema de aireación biológico mediante soplantes, equipadas con variador de frecuencia, y parrillas de difusores de burbuja fina.
- Optimizar la gestión de la explotación mediante monitorización en continuo de los parámetros principales (amonio, fósforo y DQO).
- Ampliar la capacidad de espesado de fangos, sustituyendo el equipo actual de 30 m<sup>3</sup> por dos nuevas unidades de 75 m<sup>3</sup>.
- Habilitar la cámara anaerobia como reactor biológico en alta carga durante los trabajos de reforma de carrusel, equipándolo con una parrilla de difusores conectada a las soplantes de la instalación principal. Esta parrilla se mantendrá tras las obras como elemento facultativo, aumentando la flexibilidad de la instalación.
- Actuaciones complementarias: grupo electrógeno de emergencia, e instalación de una red de agua de servicio.

### 2.3. Características EDAR actual

Concluidas las obras de mejora del año 2.015, la línea de agua está compuesta por un pozo de gruesos con cuchara de bivalva, reja automática de gruesos, un bombeo de entrada con 6 bombas sumergibles centrífugas (con configuración 2+1, 3 de ellas para caudal medio y 3 para caudal de tormentas), rototamices y desarenado-desengrasado en dos canales longitudinales paralelos. El tratamiento biológico está formado por un selector anaerobio rectangular y un reactor biológico en modalidad de aireación prolongada tipo carrusel, con eliminación de nutrientes. Además conserva el decantador secundario circular. Dispone de desinfección de agua tratada mediante radiación ultravioleta previa a su vertido.

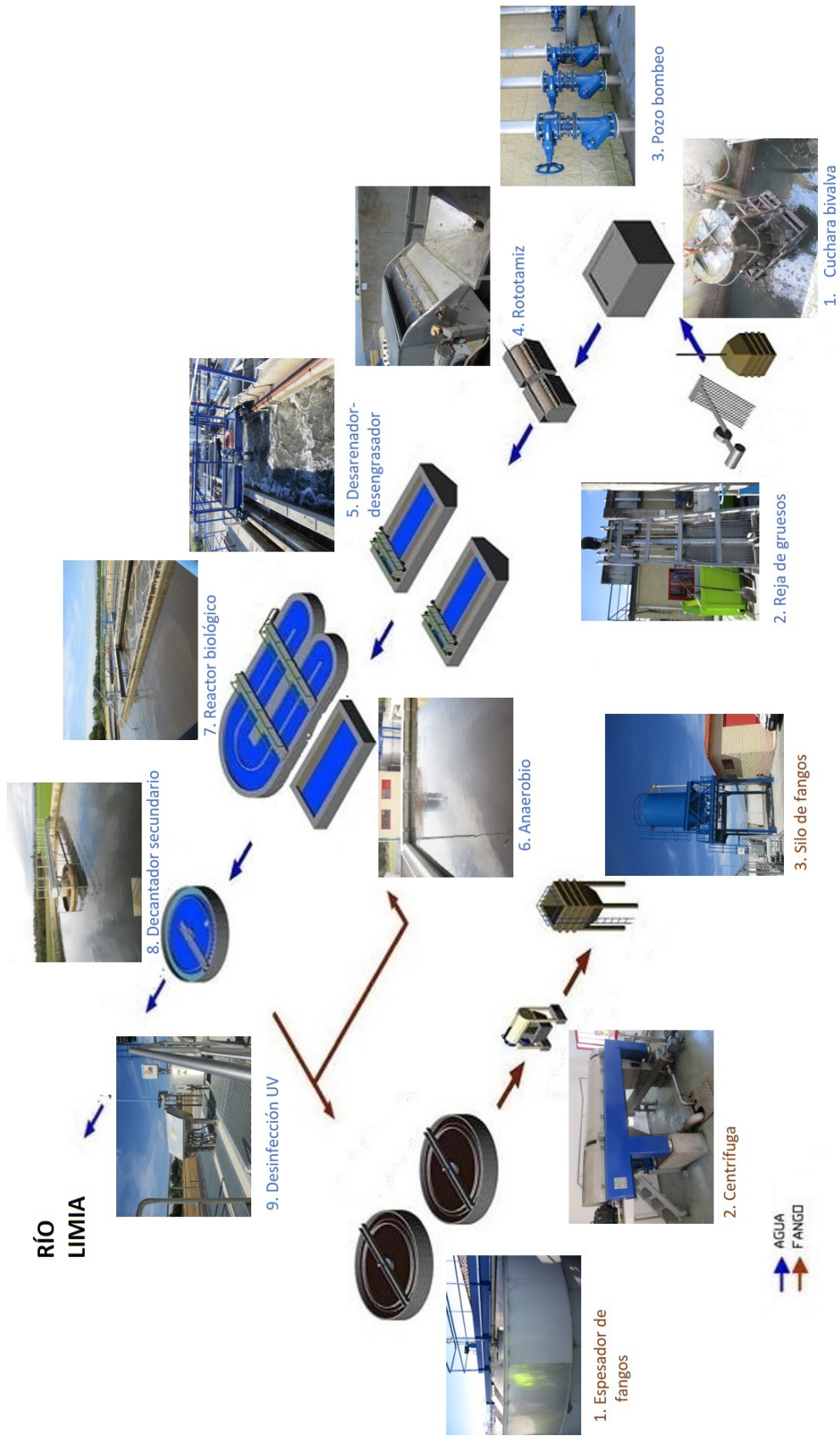
Los fangos generados se espesan mediante dos espesadores por gravedad y se deshidratan en una centrífuga horizontal, previo acondicionamiento con polielectrolito, para ser almacenados en un silo de fango deshidratado.

La población equivalente de diseño es de 13.500 habitantes equivalentes (h-e), el caudal medio de diseño  $3.360 \text{ m}^3/\text{día}$  y el caudal máximo de diseño  $265 \text{ m}^3/\text{h}$ .

En la *Figura 7* se presenta la evolución de la planta a lo largo del tiempo, y en la *Figura 8*, se muestra un esquema de la EDAR actual.



**Figura 7.** Evolución a lo largo del tiempo de la EDAR Xinzó de Limia. Fuente: elaboración propia.



**Figura 8.** Esquema EDAR actual. Fuente: Elaboración propia.

En la *Tabla 9* se recopilan todos los elementos tanto de línea de agua, línea de fangos como de equipos auxiliares, que actualmente conforman la EDAR y el año de instalación de los mismos.

**Tabla 9.** Inventario elementos y año de instalación. Fuente: Viaqua S.A.

		<b>Elementos</b>	<b>N° equipos</b>	<b>Año instalación</b>
<b>LINEA DE AGUA</b>	<b>Bombeo de entrada</b>	Bombas de agua bruta	3	2.015
		Bombas de tormentas	3	2.015
		Puente grúa entrada EDAR	1	1.999
	<b>Pretratamiento</b>	Reja de desbaste automática	1	2.015
		Cuchara bivalva	1	1.999
		Cestón	1	1.999
		Rototamiz	2	1.999
		Prensa Compactadora	1	1.999
		Soplante	2	2.015
		Puente desarenador	2	2.015
		Bomba de succión de arenas	2	2.015
		Clasificador de Arenas	1	2.015
		Concentrador de Grasas	1	2.015
	<b>Tratamiento secundario</b>	<b>Aireación Biológico:</b> Turbosoplante	3	2.015
		<b>Agitación Biológico:</b> Vehiculador	2	2.015
		<b>Anaerobio:</b> Agitador	1	2.015
<b>Decantador secundario:</b> Puente		1	2.010	
<b>Bombeo flotantes</b> Agitador flotantes		1	2.010	
Compresor válvula		1	2.015	
Bomba		2	2.010	
<b>Bomba fango exceso</b>		2	2.010	
<b>Bomba recirculación</b> <b>Dosificación de Cloruro Férrico</b>		2	2.010	
Bomba		2	2.010	
<b>Tratamiento terciario</b>	<b>Desinfección</b> Ultravioleta	1	2.010	

LÍNEA DE FANGO	Espesado	<b>Espesador</b>	2	2.015	
		Agitador	2	2.015	
	Deshidratación	<b><i>Bombeo fango a deshidratación</i></b>			
		Bomba	2	2.010	
		Centrífuga	1	2.010	
		<b><i>Poli</i></b>			
		Agitador máquina Poli	1	2.010	
		Máquina Poli	1	2.010	
	Silo de fangos deshidratados	<b><i>Silo de fangos deshidratados</i></b>			
		Tornillo inyector	1	2.010	
Tornillo elevador		1	2.010		
Tornillo transportador		1	2.010		
Accionamiento tajadera Silo		1	2.010		
EQUIPOS AUXILIARES	Agua industrial	Bomba	2	2.015	
	Caudalímetros	Caudalímetro entrada	1	2.015	
		Caudalímetro recirculación	1	2.010	
		Caudalímetro salida	1	2.010	
		Caudalímetro espesador	2	2.015	
		Caudalímetro centrífuga	1	2.010	
	Cuadro eléctrico	Línea de agua	1	2.015	
		Línea de fangos	1	2.010	
	Parrilla difusores	Difusores desarenador	2	2.015	
		Difusores aerobio	1	2.015	
		Difusores anaerobio	1	2.015	
	Sondas	Sonda Amonio-Nitratos	2	2.015	
		Sonda conductividad	1	2.015	
		Sonda fosfatos	1	2.015	
		Sonda nivel alivio desarenador	1	2.015	
		Sonda nivel pozo agua bruta	1	2.015	
Sonda nivel pozo tormentas		1	2.015		
Sonda nivel silo fangos		1	2.015		
Sonda oxígeno		2	2.015		
Sonda pH		1	2.015		
Sonda sólidos en suspensión		1	2.015		
Variadores de frecuencia	De bombas de recirculación	2	2.010		
	De bombas flotantes	2	2.010		
	De centrífuga	1	2.010		
	De bombas de agua bruta	3	2.015		
	De soplantes de desarenador	2	2.015		
	De turbosoplantes	3	2.015		
	De vehiculadores	2	2.015		

### LLEGADA DEL AGUA.

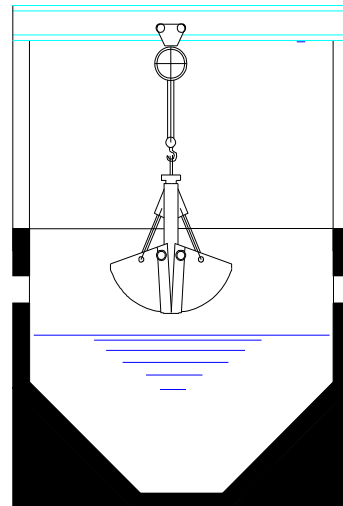
El agua bruta llega a la EDAR por una tubería de 600mm de diámetro y entra en el pozo de gruesos (*Tabla 10*). Aquí, se dispone de una compuerta manual que permite el bypass general de la instalación por una tubería de 600 mm de diámetro. En las obras se eliminó el aliviadero que existía en el pozo de gruesos.

En el interior del pozo se dispone de un tubo de tal forma que, si el nivel de agua en el pozo supera el caudal máximo de diseño de la reja de gruesos, pasará al pozo de bombeo. También se instalaron una sonda de pH y una de conductividad.

Al pozo llegan los reboses de todos los elementos de la EDAR, excepto los flotantes del decantador. Se construyó una cámara nueva de recogida de cubas junto al pozo de gruesos y se conserva la cuchara bivalva (*Figura 9*) para el desbaste de gruesos y arenas.

**Tabla 10.** Características pozo de gruesos. Fuente: Magrama, 2014.

POZO DE GRUESOS	
Características	
Superficie (m <sup>2</sup> )	<b>9</b>
Profundidad (m)	<b>2</b>
Volumen (m <sup>3</sup> )	<b>18</b>
Caudal medio (m <sup>3</sup> /h)	<b>140</b>
Tiempo de retención de diseño (min)	<b>7,71</b>



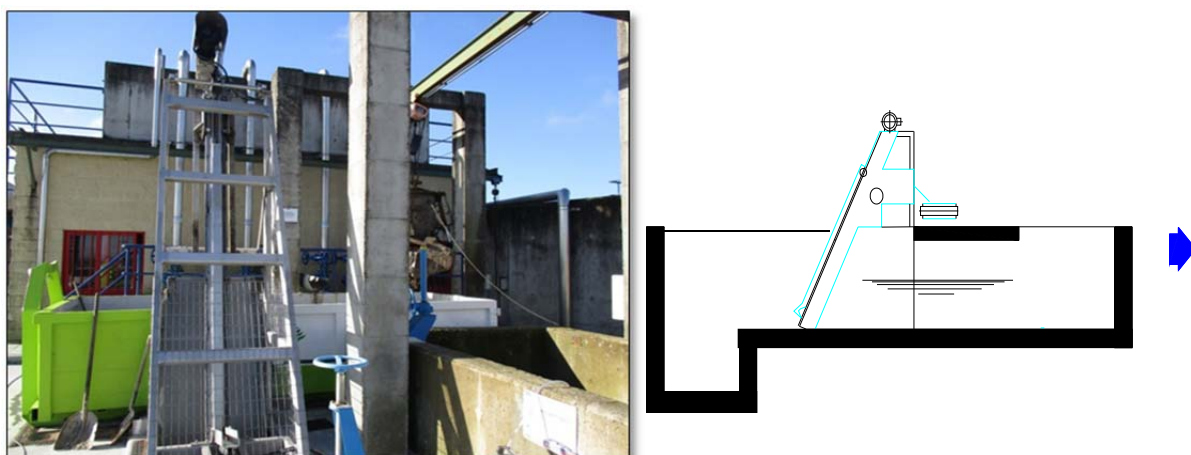
**Figura 9.** Pozo de gruesos con cuchara bivalva.

## PRETRATAMIENTO

**Desbaste de gruesos.** En una arqueta anexa al pozo de gruesos se colocó con motivo de las obras de mejora, una reja de limpieza automática con una luz de paso de 50 mm (*Tabla 11, Figura 10*). Los residuos se mezclan en el mismo contenedor que los de la cuchara bivalva.

**Tabla 11.** Características reja de desbaste. Fuente: Magrama, 2014.

REJA DE BESBASTE	
Características	
Superficie de paso (m <sup>2</sup> )	<b>0,15</b>
Luz de paso (mm)	<b>50</b>
Espesor de la barra (mm)	<b>15</b>
Anchura de paso (m)	<b>0,53</b>
Altura de paso (m)	<b>0,53</b>



**Figura 10.** Reja automática de gruesos.

**Bombeo de cabecera.** A continuación, el agua pasa a través de un cestón de gruesos, instalado en el año 1.999, al principio del primer pozo de bombeo, denominado pozo de bombeo agua residual. En el caso de que el caudal sea muy elevado, por excesos de precipitación, las aguas que no son bombeadas desde el primer pozo, pasarían al segundo pozo de bombeo situado en paralelo, denominado pozo de bombeo tormentas. Cada pozo dispone de una sonda de nivel.

Con las obras de mejora se sustituyeron las bombas por otras 6 nuevas resistentes a la abrasión por arenas, manteniendo la configuración 2+1, en cada bombeo (*Figura 11*). Además, se instalaron variadores de frecuencia para las bombas de agua residual, para poder laminar el caudal de entrada.

El agua impulsada por las bombas llega a una cámara, que dispone de un aliviadero por nivel, cuyo excedente pasa por el canal de bypass anexo al canal de desarenado-desengrasado, que dispone de dos rejillas de finos de limpieza manual, y de ahí al tratamiento secundario. A esta cámara llegan también los flotantes del decantador secundario.

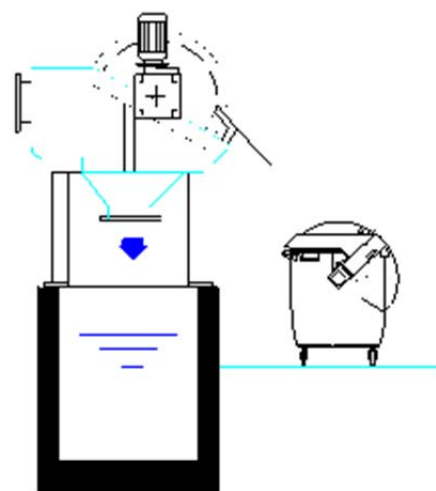


**Figura 11.** Bombas instaladas en el bombeo de cabecera.

**Desbaste de finos.** Desde la cámara de mezcla, el agua pasa por gravedad a dos rototamices (*Tabla 12, Figura 12*). Los residuos extraídos se vierten sobre una tolva que los descarga sobre una prensa de sólidos. Una vez compactados, se trasvasan al mismo contenedor que los de la cuchara bivalva y la reja automática.

**Tabla 12.** Características rototamiz. Fuente: Magrama, 2014.

ROTOTAMIZ	
Características	
Nº de unidades	2
Luz de paso (mm)	2
Diámetro (mm)	1.000
Longitud (m)	1.450
Caudal unitario (m <sup>3</sup> /h)	350



**Figura 12.** Rototamiz.

**Desarenado – desengrasado.** Al canal existente se le cambiaron todos los equipos (carro desarenador, bomba de arenas, sistema de aireación), y se construyó un nuevo desarenador-desengrasador (*Tabla 13, Figura 13*), paralelo él. Se dispone de un canal de bypass anexo. Los dos canales pueden trabajar tanto en paralelo como de forma independiente.

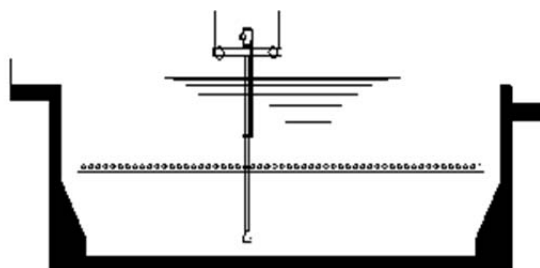
La aireación se realiza mediante dos soplantes en configuración 1+1, que disponen cada una de variador de frecuencia, a través de 16 difusores sumergidos de burbuja gruesa en cada uno de los canales.

Se instalaron nuevos un clasificador de arenas y un concentrador de grasas. Tanto las arenas como las grasas se descargan en contenedores.

El primer alivio de la planta se sitúa a la salida del pretratamiento, donde se instaló una sonda de nivel de alivio para cuantificar los mismos. Este alivio permite limitar el caudal de entrada al biológico y el bypass del mismo.

**Tabla 13.** Características desarenador-desengrasador. Fuente: Magrama, 2014.

<b>CANAL DESARENADO-DESENGRASADO</b>	
<b>Características</b>	
Nº de unidades	<b>2</b>
Superficie total (m <sup>2</sup> )	<b>35,35</b>
Volumen total (m <sup>3</sup> )	<b>132,21</b>
Caudal unitario soplante (m <sup>3</sup> /h)	<b>200</b>
Tiempo de retención de diseño (min)	<b>56,66</b>



**Figura 13.** Canal desarenador-desengrasador.

Para el control de la planta se instaló un caudalímetro a la salida del pretratamiento, en el canal que conduce el agua al tratamiento secundario.

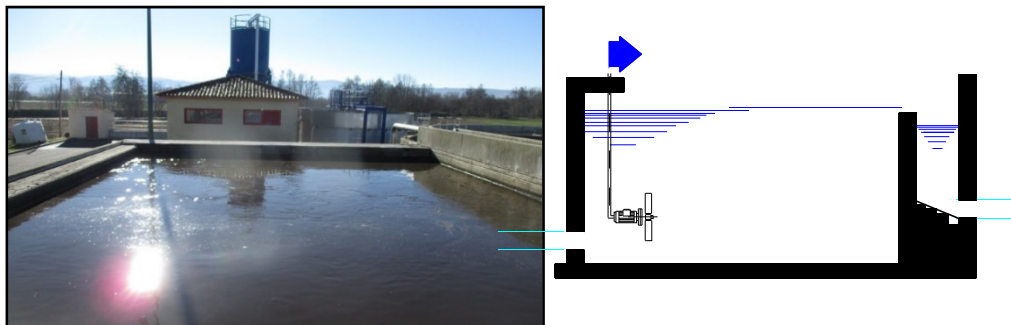
## TRATAMIENTO SECUNDARIO

**Tratamiento biológico.** La tubería se divide en dos ramas antes de entrar al tratamiento secundario, y cada una de ellas tiene una válvula de volante que permite el bypass de la cámara anaerobia, de la aerobia y del tratamiento.

*Cámara anaerobia.* En las obras de mejora del año 2015, se acondicionó el antiguo decantador lamelar como cámara anaerobia (*Tabla 14*). Se utiliza para la eliminación de fósforo por vía biológica, donde las aguas procedentes del pretratamiento son mezcladas con fangos recirculados. Se equipó con un agitador para evitar la sedimentación del fango y asegurar la mezcla de las aguas residuales (*Figura 14*).

**Tabla 14.** Características cámara anaerobia. Fuente: Magrama, 2014.

CÁMARA ANAEROBIA	
Características	
Altura (m)	<b>4,45</b>
Longitud (m)	<b>12,5</b>
Anchura (m)	<b>9,13</b>
Volumen (m <sup>3</sup> )	<b>508</b>



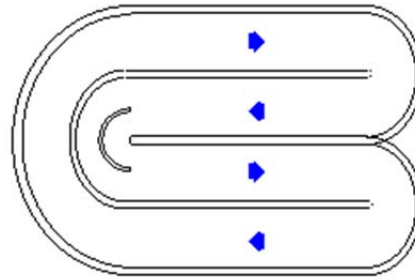
**Figura 14.** Cámara anaerobia.

*Cámara aerobia.* Con motivo de las obras, en el reactor biológico existente (*Tabla 15*), se llevó a cabo la limpieza del interior, la reparación de superficies y la renovación de equipos. En el nuevo edificio construido se instalaron el grupo electrógeno y las 3 turbosoplantes (2+1) para el suministro de aire (con difusores) al reactor biológico (*Figura 15*), y para, en el caso de parada del mismo, los difusores del reactor habilitado en la cámara anaerobia. Cada una de las soplantes dispone de variadores de frecuencia. Para favorecer la mezcla y homogeneización del licor mezcla, se instalaron en las obras dos generadores de flujo nuevos, cada uno de ellos con variador de frecuencia.

Además, para el control del funcionamiento del reactor biológico se colocaron 2 sondas de oxígeno, 2 de amonio y una de sólidos en suspensión. La programación de la instalación permite operar el canal aerobio en 4 modos: modo oxígeno, modo amonio, modo oxígeno y amonio, y modo cíclico (se puede usar cuando no están operativas las sondas). Además, para los 3 primeros modos, existe la posibilidad de parar la aireación por concentración máxima de nitratos, y de establecer un tiempo máximo sin airear.

**Tabla 15.** Características cámara aerobia. Fuente: Magrama, 2014.

<b>CAMARA AEROBIA</b>	
<b>Características</b>	
Longitud (m)	<b>36</b>
Anchura (m)	<b>21,5</b>
Volumen (m <sup>3</sup> )	<b>9,13</b>
Carga másica (kg DBO5/kg SSLM-d)	<b>0,049</b>
Tiempo de retención de diseño (min)	<b>35,4</b>



**Figura 15.** Cámara aerobia.

**Sistema de eliminación química de fósforo.** La concentración de fósforo en el efluente debe ser inferior a 2 mg/L, por eso en apoyo a la eliminación de fósforo por vía biológica, se mantiene la eliminación de fósforo por vía química. Con motivo de las obras, se sustituyó el depósito de cloruro férrico, por uno de doble pared adecuándose a la normativa APQ, manteniendo las dos bombas dosificadoras instaladas en el año 2.010 (*Figura 16*).



**Figura 16.** Dosificación de cloruro férrico.

**Decantación secundaria.** El decantador secundario (*Tabla 16, Figura 17*), se construyó en el año 2.010. No presentaba deficiencias en su funcionamiento por lo que únicamente se cambiaron las gomas y ruedas del puente decantador.

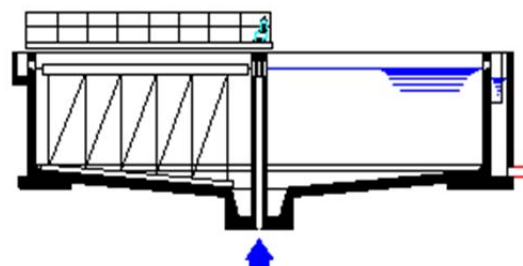
El agua decantada se recoge en un canal con pendiente desde donde pasa a la arqueta de desinfección. Los fangos se dirigen hacia un pozo de concentración pasando a la

arqueta de bombeo de recirculación y purga. Las bombas de recirculación no se cambiaron ya que habían sido instaladas en el año 2.010. Los fangos recirculados se envían a la cámara anaerobia o a la aerobia. En cuanto a los flotantes, se bombean con dos bombas sumergibles hasta la cámara de mezcla.

El conducto que va desde el decantador secundario hasta el equipo de desinfección cuenta con un medidor de caudal que fue instalado en las obras del año 2.010.

**Tabla 16.** Características decantador secundario. Fuente: Magrama, 2014.

<b>DECANTADOR SECUNDARIO</b>	
<b>Características</b>	
Diámetro (m)	<b>1,7</b>
Altura de vertido (m)	<b>3,93</b>
Volumen (m <sup>3</sup> )	<b>947,26</b>
Superficie total (m <sup>2</sup> )	<b>226,98</b>
Tiempo de retención de diseño (h)	<b>6,67</b>



**Figura 17.** Decantador secundario.

### TRATAMIENTO TERCARIO

**Desinfección ultravioleta.** La desinfección se efectúa mediante radiación ultravioleta, con la que se prevé un efluente con una concentración menor de 100 UFC/100 mL de coliformes fecales (*Tabla 17, Figura 18*).

Con motivo de las obras de mejora de 2.015, se construyó una nueva caseta donde se albergan las bombas de agua industrial y una sonda de fosfatos. El valor registrado por esta sonda no está incluido en la programación del SCADA. En la actualidad el equipo realiza la medición de fosfatos en una muestra cada 30 minutos, siendo el tiempo entre las tomas de muestra modificable por el explotador.

**Tabla 17.** Características equipo desinfección. Fuente: Magrama, 2014.

<b>EQUIPO DESINFECCIÓN UV</b>	
<b>Características</b>	
Nº de unidades	<b>2</b>
Caudal (m <sup>3</sup> /h)	<b>131</b>
Transmitancia (%)	<b>55</b>
Nº de bancadas	<b>1</b>
Nº de módulos por bancada	<b>3</b>
Nº de lámparas por módulo	<b>8</b>
Vida útil de las lámparas (h)	<b>12.000</b>



**Figura 18.** Desinfección UV.

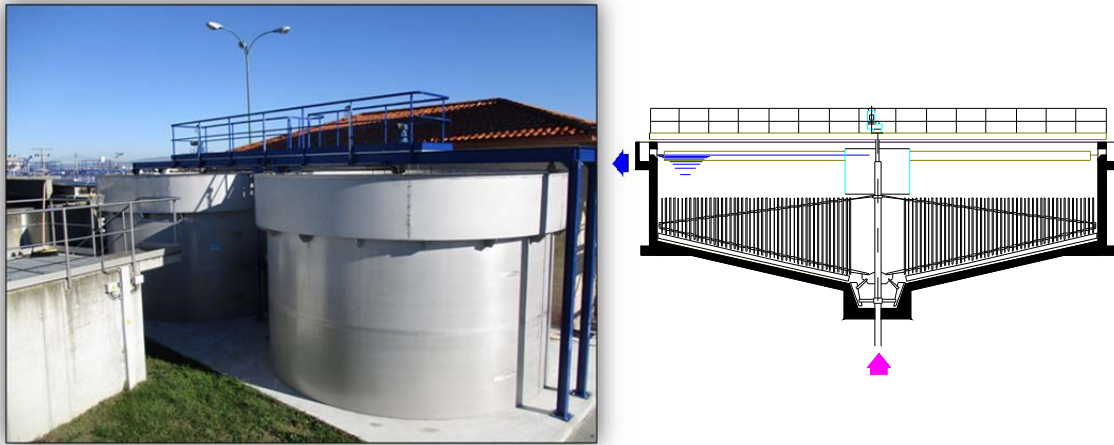
## **TRATAMIENTO DE FANGOS**

**Purga de fangos en exceso.** La extracción de los fangos en exceso se realiza desde el pozo de bombeo de recirculación y purga anexo al decantador. Las bombas se instalaron en el año 2.010.

**Espesado de fangos.** En las obras de mejora de 2.015 se retiró el espesador existente y se instalaron dos nuevos (*Tabla 18, Figura 19*). En la conducción de entrada a cada espesador se dispone de medidor de caudal. Cada espesador cuenta con un canal periférico donde se recogen los sobrenadantes (que son reintroducidos en el pozo de gruesos), y un sistema de rasquetas de fondo.

**Tabla 18.** Características espesador de fangos. Fuente: Magrama, 2014.

ESPESADOR POR GRAVEDAD	
Características	
Nº de unidades	2
Diámetro interior (m)	5
Volumen (m <sup>3</sup> )	75
Tiempo de retención de diseño (h)	27,95



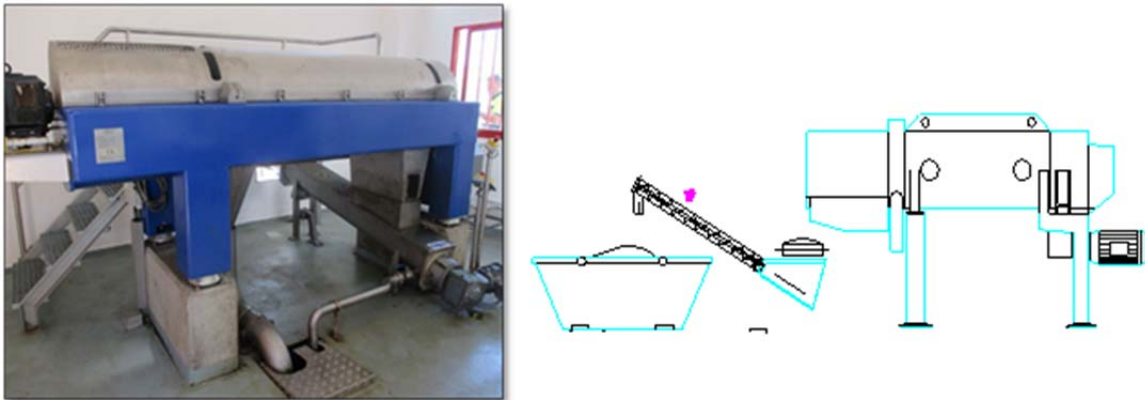
**Figura 19.** Espesador de fangos.

**Deshidratación.** El fango espesado se extrae por bombeo para conducirlo a deshidratación. En esta conducción se dispone de un caudalímetro. Previamente a la entrada en la centrífuga se realiza un acondicionamiento con polielectrolito (*Figura 20*). Para ello se dispone de un equipo de preparación de polielectrolito automático y de bombas dosificadoras.



**Figura 20.** Máquina de preparación y dosificación de polielectrolito.

La deshidratación se realiza mediante centrífuga (*Figura 21*) que tiene un caudal de 13 m<sup>3</sup>/h. El agua escurrida se conduce al pozo de gruesos.



**Figura 21.** Centrífuga.

**Silo de fangos deshidratados.** El fango deshidratado se almacena en un silo de 30 m<sup>3</sup> (*Figura 22 y Tabla 19*). Durante las obras de mejora de 2.015 se sustituyó la sonda de nivel del silo de fango.

**Tabla 19.** Características espesador de fangos. Fuente: Magrama, 2014.

<b>SILO DE FANGOS</b>	
<b>Características</b>	
Capacidad máxima (m <sup>3</sup> )	<b>30</b>
Volumen a almacenar diseño (m <sup>3</sup> /día)	<b>3,86</b>
Tiempo de almacenamiento de diseño (días)	<b>7</b>



**Figura 22.** Silo de fangos.

### 3. ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

El ACV es una metodología que permite identificar la distribución de las cargas medioambientales en los productos generados a lo largo de la vida útil de un proceso, identificando y cuantificando el uso de materia, energía y los vertidos al entorno para determinar el impacto de los mismos, y poder evaluar y llevar a la práctica estrategias de mejora ambiental. Implica un análisis de la cuna a la tumba, considerando todo el ciclo de vida, desde la adquisición de las materias primas hasta su producción, uso y desecho. Sin embargo, también se puede centrar en ciertas etapas, teniendo entonces de la cuna a la puerta, de la puerta a la puerta, y de la cuna a la cuna.

A finales de los años sesenta se empezó a considerar el impacto ambiental de procesos, productos o servicios a lo largo de su ciclo de vida, cuando se empezaron a presentar los primeros trabajos. En los ochenta los balances de materia, energía y residuos se aplicaban de forma separada (*Gallego, 2008*).

En la década de los noventa se produce una consolidación de la metodología ACV, con la publicación en 1.991 de la primera gran base de datos específica de ACV realizada por el Ministerio de Medio Ambiente de Suiza. En 1.992 se crea la "Society for the Promotion of Life Cycle Development" que pretende aumentar la disponibilidad de inventarios de ciclo de vida. En 1.993 la SETAC define por primera vez la metodología ACV. La primera revista científica dedicada a ACV "International Journal of Life Cycle Assessment" se publica en 1.996 (*Gallego, 2008*).

La primera de las normas ISO referidas al ACV es la 14040:1998 que se publica en 1.998, que establece los principios y estructura de la metodología. En años sucesivos aparecen otras normas ISO entre las que destacan 14041:1999 (objetivo, alcance y análisis del inventario), 14042:2001 (evaluación del impacto del ciclo de vida) y 14043:2001 (interpretación del impacto del ciclo de vida).

Estas normas han sido revisadas y reemplazadas por la ISO 14040:2006 (principios y marco de referencia) y por la ISO 14044:2006 (requisitos y directrices) (*Gallego, 2008*).

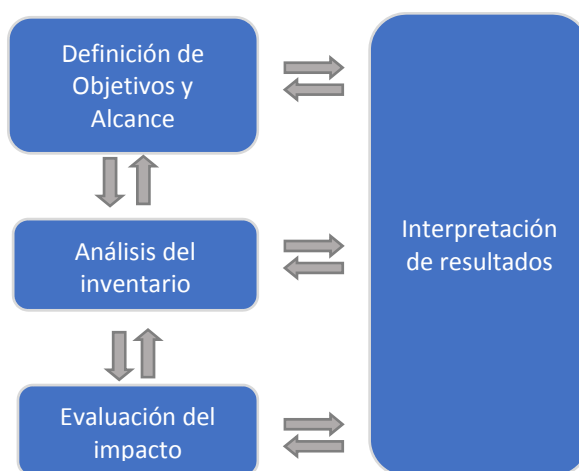
Por tanto, las normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006 establecen una metodología general que consiste en 4 etapas (*Figura 23*):

- ◆ Objetivo y alcance: Se establece el fin último del análisis y la metodología a emplear. Se define el producto o proceso a estudiar, así como su contexto.
- ◆ Análisis del Inventario del Ciclo de Vida: Cuantificación de los flujos de materia y energía. El análisis incluye la recopilación de los datos y la realización de los cálculos adecuados para cuantificar las entradas y salidas de cada uno de los escenarios o subsistemas definidos en el alcance del estudio. Las entradas son

las materias primas (incluidas las fuentes de energía) y las salidas son las emisiones al aire, agua y suelo.

- ◆ Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida: Evaluación de los impactos potenciales asociados a los flujos.
- ◆ Interpretación de los resultados: Se indican los impactos relevantes ambientalmente, sus principales fuentes y las conclusiones del estudio.

Además, con el ACV se pueden identificar los "hot spots" más relevantes y las oportunidades de mejorarlos. Es un buen soporte para la toma de decisiones, sean gubernamentales, de compañías privadas o de grupos de investigación. (Rodríguez, 2013)



**Figura 23.** Metodología ACV. Fuente: Gallego, 2008.

En los siguientes apartados se detallan las características y la elaboración del ACV propuesto para este trabajo.

### **3.1. Definición de objetivo y alcance**

Tanto la finalidad como las especificaciones del modelo y del procedimiento del Análisis del Ciclo de Vida se definen y determinan en este apartado.

#### **3.1.1. Objetivo**

En el año 2015 se realizaron obras de mejora en la EDAR de Xinzo de Limia, con motivo de mejorar la capacidad de eliminación de nutrientes ya que el medio receptor está declarado como zona sensible. El fin último es el análisis del ciclo de vida comparativo de dos escenarios definidos, uno con anterioridad a las obras de mejora y otro posterior a las mismas.

Se identificarán los factores más relevantes que contribuyen al impacto y se evaluará la influencia de todos los procesos sobre el medio ambiente.

### 3.1.2. Unidad funcional

La elección de la unidad funcional es fundamental en el caso de comparar varios sistemas que tengan la misma función, como ocurre en este caso con los dos escenarios planteados.

La principal función de una EDAR es el tratamiento de un influente, es decir, reducir la materia orgánica, los nutrientes y los sólidos, para su posterior vertido al medio receptor, cumpliendo la normativa vigente.

Para la elección de la unidad funcional se han valorado diferentes opciones. Algunos autores (*Corominas et al., 2013; Vega, 2010*) proponen como unidad funcional un habitante equivalente que se corresponde con 60g de DBO<sub>5</sub> (demanda biológica de oxígeno) en 24 horas. Otros plantean el volumen tratado en un determinado periodo de tiempo (*Bayo et al., 2010; Hospido et al., 2004; Martorell, 2.015; Renou, 2008*).

Se establece como unidad funcional 1 m<sup>3</sup> de agua de acuerdo con estudios recientes (*Gonzalez et al, 2014; Lorenzo-Toja et al, 2.015; Lorenzo-Toja et al, 2.016; Valderrama, 2.013*). Es importante señalar que este tipo de unidad funcional no es muy apropiada cuando se comparan sistemas con influentes muy diferentes (*Lorenzo-Toja et al, 2.016*). Sin embargo, en este caso concreto no surge ese problema ya que la EDAR es la misma.

### 3.1.3. Sistema

Cada EDAR está dividida en 4 subsistemas: pretratamiento y tratamiento primario (subsistema 1), tratamiento secundario y tratamiento terciario (subsistema 2), línea de lodos (subsistema 3) y uso y transporte de los lodos (subsistema 4). Todos los subsistemas incluyen sus correspondientes entradas y salidas (*Figura 24*).

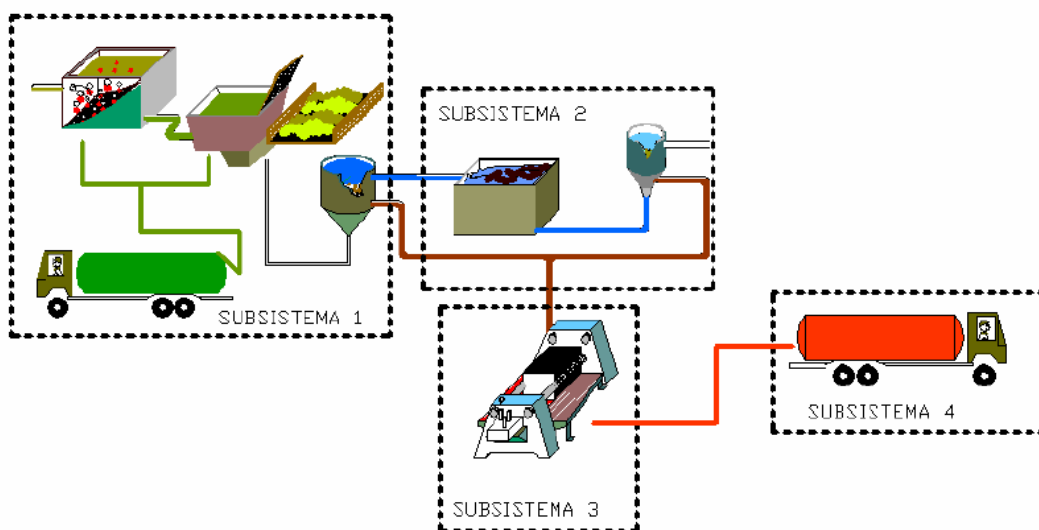
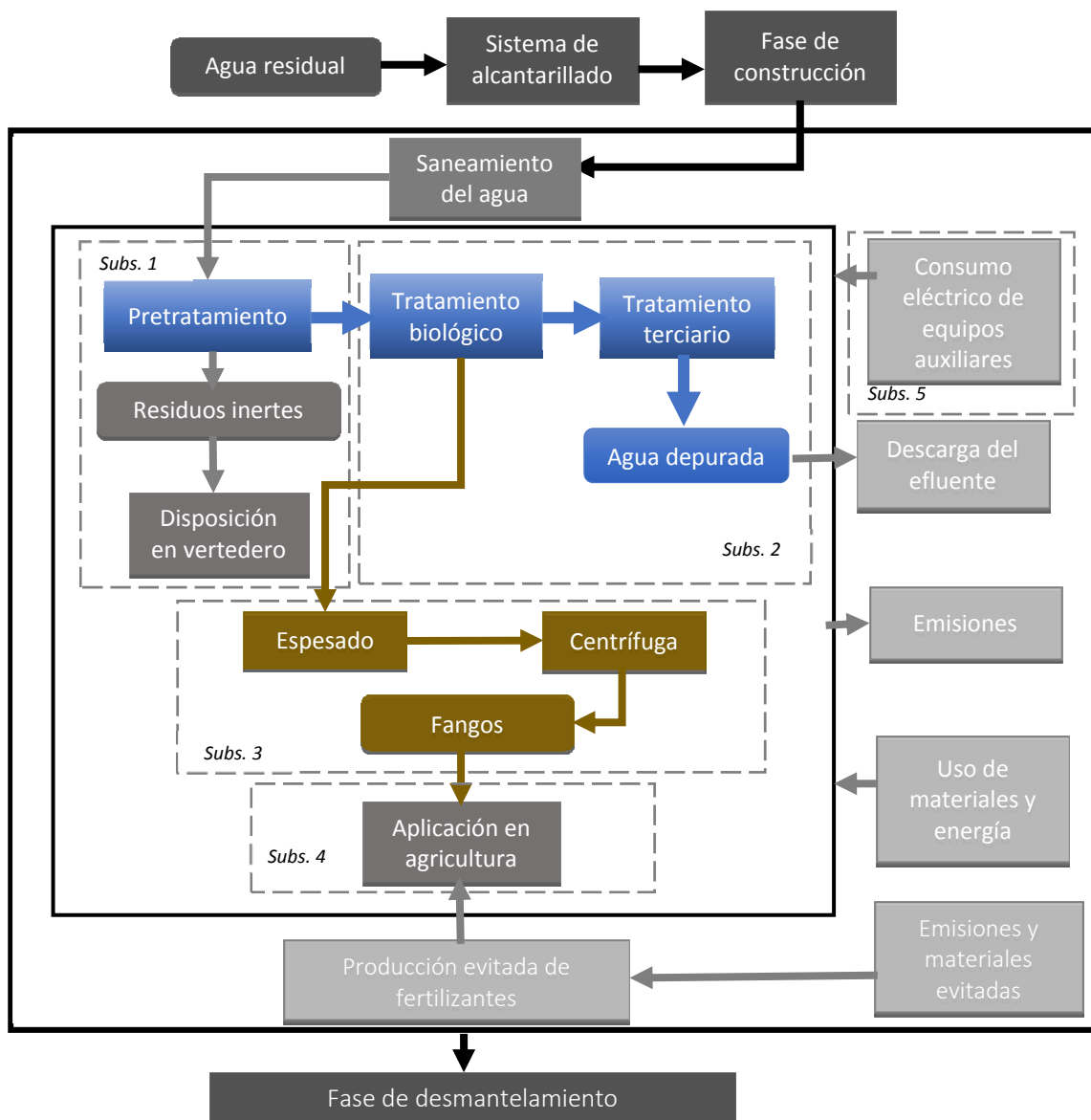


Figura 24. Subsistemas de una EDAR. Fuente: Gallego, 2008.

En este caso, los subsistemas se configuran de la siguiente manera:

- ◆ Subsistema 1: el pretratamiento consiste en una reja de gruesos, una cuchara bivalva, dos rototamices y dos canales de desarenado-desengrasado.
- ◆ Subsistema 2: el tratamiento secundario se basa en un reactor anaerobio y un reactor aerobio de fangos activos tipo carrusel. El tratamiento terciario consiste en una desinfección ultravioleta.
- ◆ Subsistema 3: la línea de fangos cuenta con dos espesadores y una centrífuga previo acondicionamiento con polielectrolito.
- ◆ Subsistema 4: los fangos se transportan en camiones para su utilización en agricultura.

La *Figura 25* muestra el esquema de la EDAR con todos los procesos incluidos en el estudio del ACV. Se añade un subsistema 5, donde se engloban los consumos eléctricos y los equipos auxiliares que afectan a toda la planta (climatización, iluminación, etc). (*Hospido et al, 2004*)



**Figura 25.** Subsistemas de una EDAR. Fuente Adaptado de DeustoTech, 2012.

### **3.1.4. Límites del sistema**

Se toma como punto de inicio del sistema la entrada del agua a la EDAR, y como punto final la salida del agua tratada al río Limia, sin olvidar los fangos generados, por lo tanto, el ACV planteado es de tipo "gate to gate", lo que coincide con el enfoque de otros autores (*Gallego, 2.008; Vega, 2.010*).

En algunos estudios sobre tratamiento de aguas residuales se ha demostrado que el impacto de las fases de construcción y demolición, son poco relevantes en comparación con el impacto asociado a la fase de explotación de la planta (*Gallego, 2.008; Vega, 2.010*). Por la misma razón tampoco se incluyen los impactos producidos "aguas arriba", como la extracción del agua, potabilización o consumo.

Como el ACV se realiza únicamente sobre el proceso de mantenimiento y explotación, la mayoría de los datos necesarios han sido aportados por la empresa concesionaria del servicio (Viaqua S.A.U.) y por Adantia S.L. por lo que tienen una alta fiabilidad (*Gonzalez et al., 2.014*). El resto de datos fueron tomados de las bases de datos que proporciona el SimaPro o estimados a partir de la bibliografía.

## **3.2. Análisis del inventario**

El inventario del ciclo de vida es el primer paso para realizar una completa caracterización de las diferentes operaciones de una EDAR con el objetivo de obtener un inventario completo de todas las entradas y salidas (*Hospido, 2004*).

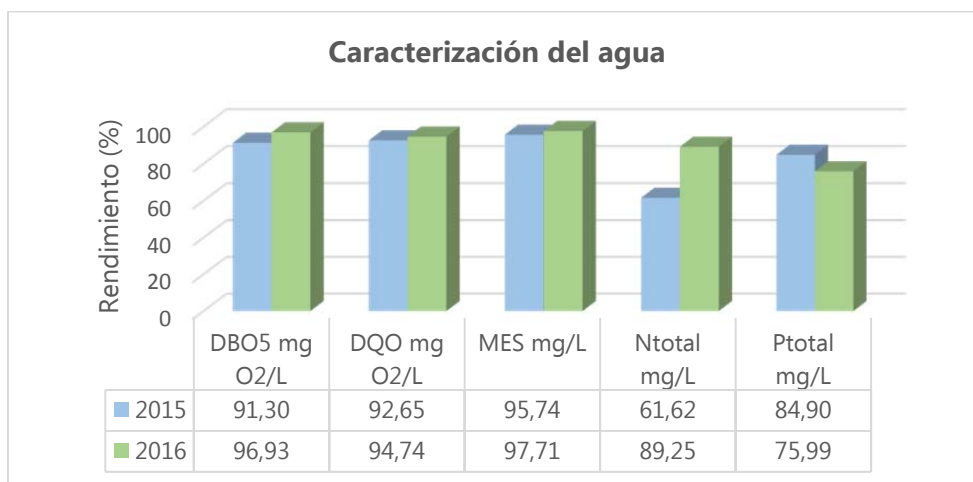
Es el resultado de la recopilación de los datos y los procedimientos de cálculo para identificar y cuantificar todos los efectos adversos asociados a la unidad funcional. Estos efectos adversos se denominan cargas ambientales, y se incluyen los gases contaminantes, los efluentes de aguas, residuos sólidos, consumo de recursos naturales, ruido, radiaciones, olores, etc. En este caso no se consideran las emisiones a la atmósfera por ser indirectas. Todas las entradas y salidas del sistema se han normalizado respecto a la unidad funcional elegida, 1 m<sup>3</sup> de agua tratada.

### **CARACTERIZACIÓN DEL AGUA.**

Con respecto a las características del agua, los datos de campo disponibles (corresponden a las analíticas integradas realizadas por Adantia S.L. y Viaqua S.A.U.) son DBO<sub>5</sub> (demanda biológica de oxígeno), DQO (demanda química de oxígeno), MES (materia en suspensión), N<sub>total</sub> (nitrógeno total) y P<sub>total</sub> (fósforo total). En la *tabla 20* se indican las características promedio del agua de entrada y del agua de salida con el rendimiento de cada uno de los dos escenarios. Este rendimiento se muestra comparado en la *Figura 26*. En el *Anexo A* se expone la caracterización detallada del agua residual de la EDAR.

**Tabla 20.** Carga contaminante del agua de entrada y salida, y su rendimiento en los dos escenarios, por m<sup>3</sup>. Fuente: Elaboración propia

		2.015	2.016
DBO <sub>5</sub> (g/m <sup>3</sup> )	Entrada	73,22	173,67
	Salida	6,37	5,33
	Rendimiento	91,30	96,93
DQO (g/m <sup>3</sup> )	Entrada	243,67	333,00
	Salida	17,92	17,50
	Rendimiento	92,65	94,74
MES (g/m <sup>3</sup> )	Entrada	144,70	174,33
	Salida	6,16	4,00
	Rendimiento	95,74	97,71
N <sub>total</sub> (g/m <sup>3</sup> )	Entrada	33,22	22,48
	Salida	12,75	2,42
	Rendimiento	61,62	89,25
P <sub>total</sub> (g/m <sup>3</sup> )	Entrada	4,38	4,17
	Salida	0,66	1,00
	Rendimiento	84,90	75,99



**Figura 26.** Rendimiento de la EDAR en los dos escenarios. Fuente: Elaboración propia.

Las obras de mejora de 2.015 tenían como objetivo mejorar la capacidad de eliminación de nutrientes de la EDAR.

Como se puede observar en la *figura 26* y en la *tabla 20*, los rendimientos varían del año 2.015 al 2.016. El rendimiento de la DBO<sub>5</sub>, DQO y MES suben ligeramente en 2.016, sin embargo, hay que tener en cuenta que en el mes de enero de 2.016 se produjo una intensa lluvia concentrada en días puntuales del mes. La precipitación total del mes de enero de 2.016 fue muy superior a la del mismo mes de 2.015 (*MeteoGalicia*<sup>iii</sup>),

<sup>iii</sup> MeteoGalicia. <http://www.meteogalicia.gal/observacion/rede/redeIndex.action>  
Consultado en: Noviembre 2017.

produciéndose una entrada muy grande de caudal, teniendo que poner en funcionamiento las 6 bombas de cabecera (incluidas las 3 del tanque de tormentas) (*Anexo B*).

En cuanto al rendimiento de la eliminación de fósforo, es inferior en 2.016. Además de tener en cuenta el pico de caudal producido en enero de 2.016, es muy importante señalar que el consumo de cloruro férrico disminuye significativamente. Aunque baja el rendimiento, los valores de agua tratada cumplen la legislación.

Por último, el rendimiento de eliminación de nitrógeno aumenta (a pesar del pico de enero de 2.016), hecho resaltable ya que era uno de los propósitos principales de la obra de mejora.

## REACTIVOS Y PRODUCCIÓN DE RESIDUOS

Con respecto a la utilización de compuestos químicos y a la generación de residuos de desbaste, se presentan en la *Tabla 21* los valores promedio mensuales de los dos escenarios propuestos (año 2.015 y año 2.016). Estos datos han sido proporcionados por la empresa concesionaria del servicio.

Por un lado, la cantidad de reactivos utilizados (polielectrolito y cloruro férrico) es visualmente menor en el segundo escenario, tras las obras de mejora. Es importante señalar que la eliminación química de fósforo con cloruro férrico aumenta de forma significativa la producción de fangos (en masa y volumen). (*CEDEX, 2016*)

El proveedor y transportista del cloruro férrico es la empresa Lindcold Iberica (Lugo). En cuanto al polielectrolito, la empresa que lo gestiona y transporta actualmente es Tesis Galicia (Pontevedra), mientras que en el año 2.015 era Cromogenia Units (A Coruña) la encargada de realizar esta función.

Una de las obras del proyecto de mejora fue la habilitación el decantador lamelar de la EDAR original, fuera de uso, como cámara anaerobia, para la eliminación de fósforo por vía biológica. De esta forma se trataba de reducir el consumo de cloruro férrico para la eliminación de fósforo por vía química. Se calculó un ratio promedio de  $14\text{g/m}^3$  de  $\text{FeCl}_3$  necesarios por cada gramo de fósforo eliminado. En el año 2.015, según este cálculo se debería dosificar  $45\text{g/m}^3$  de reactivo, cantidad similar a la dosificada en la planta. Sin embargo, con la nueva cámara anaerobia se supone un 20% de la eliminación de fósforo por vía biológica, por lo que, teniendo en cuenta el ratio, solo se necesitarían  $10,4\text{g/m}^3$  de reactivo. Esta eliminación de fósforo y reducción de uso de reactivos se consigue, como se observa en la *Tabla 21*, ya que en el año 2.016 se dosifican  $10,1\text{g/m}^3$  de cloruro férrico. (*MAGRAMA, 2014*)

Por otro lado, los residuos de desbaste generados en la EDAR disminuyen de forma significativa en el año 2.016, es decir, con posterioridad a las obras de mejora. Estos se envían a Xiloga (gestor de residuos) transportados por la empresa Toysal (Vigo).

**Tabla 21.** Cantidades promedio de reactivos utilizados y de residuos de desbaste generados por m<sup>3</sup>. Fuente: Elaboración propia.

	2.015	2.016
<b>Polielectrolito (g/m<sup>3</sup>)</b>	1,69	0,34
<b>Cloruro férrico (g/m<sup>3</sup>)</b>	51,60	10,10
<b>Residuos desbaste (kg/m<sup>3</sup>)</b>	0,15	0,03

## GENERACIÓN DE FANGOS.

Como se ha comentado, uno de los principales problemas de una EDAR, es la generación de fangos. En la *Tabla 22* aparece una comparación entre la cantidad de fangos producida, el porcentaje de secado promedio mensual, la cantidad de materia seca obtenida, el porcentaje de nitrógeno en la materia seca, los sólidos volátiles (SSV) y el pH del fango. Los datos presentados han sido cedidos por la empresa concesionaria del servicio.

**Tabla 22.** Fangos generados y características de los mismos por m<sup>3</sup>. Fuente: Elaboración propia.

Periodo	Fangos (Kg/ m <sup>3</sup> )	% Secado	MS m <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	%N en MS (kg/ m <sup>3</sup> )	SSV (%)	pH fangos
<b>2.015</b>	1,027	14,401	0,147	0,008	71,125	6,915
<b>2.016</b>	0,272	18,460	0,050	0,003	71,400	5,700

La cantidad de fangos generados en una EDAR depende del caudal, de la DBO y de los sólidos en el reactor. Tras las obras de mejora, se instaló un nuevo espesador, lo que supone un mayor almacenamiento y un mejor secado. Como se observa en la *Tabla 22* aumenta este último porcentaje. Como sobre la estabilización de los fangos no se realizó ninguna operación, la cantidad de SSV permanece prácticamente igual.

Con las obras de mejora, se propone la eliminación del fósforo mediante vía biológica, de manera que como se ha visto antes, hay un menor consumo y uso de cloruro férrico, por lo que la cantidad de fango generada también es menor. Esto se traduce en un incremento de eficiencia para la planta, se genera menos fango y más seco, por lo que los costes (de transporte y gestión) serán menores.

Los fangos de la EDAR de Xinzo de Limia se emplean en agricultura, más concretamente, los transporta y gestiona la Sociedad Agrícola de la Patata Ribaseca (León). La aplicación directa de los mismos conlleva a una mejora de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo receptor gracias al aporte de los tres principales elementos fertilizantes: N-P-K, y al aporte de humedad y materia orgánica. Su aplicación reduce el empleo de fertilizantes de origen químico lo que supone una disminución del riesgo de contaminación por nitratos en el perfil del suelo, debido a que el aporte de nitrógeno que se realiza es de origen orgánico (*iagua*<sup>iv</sup>).

<sup>iv</sup> *iagua*: <https://www.iagua.es/blogs/ismedioambiente/beneficios-aplicacion-agricola-lodos-depuradora> Consultada en: noviembre 2017.

La actividad de aplicación de lodos de depuradora en la agricultura se contempla en el Decreto 125/2012 de 10 de mayo, por el que se regula la utilización de lodos de depuradora en el ámbito del sector agrario de la Comunidad Autónoma de Galicia. Este decreto establece el valor máximo de concentración de metales pesados en los fangos de depuradora destinados a aplicación en suelos agrarios (*Tabla 23*).

**Tabla 23.** Fangos generados y valores límite. Fuente: Adaptación de Decreto 125/2012

	Fangos EDAR Xinzo de Limia (mg/kg MS)	Valores límite Decreto 125/2012 (mg/kg MS)	
		Suelos con pH < 7	Suelos con pH > 7
<b>Cadmio (Cd)</b>	0	20	40
<b>Cobre (Cu)</b>	1584,4	1.000	1.750
<b>Níquel (Ni)</b>	18,6	300	400
<b>Plomo (Pb)</b>	104,7	750	1.200
<b>Zinc (Zn)</b>	881,8	2.500	4.000
<b>Mercurio (Hg)</b>	0,83	16	25
<b>Cromo (Cr)</b>	28,6	1.000	1.500

El problema que presentan los fangos es la carga de metales pesados, procedente de las aguas residuales, que son altamente tóxicos y se acumulan en los organismos. En la *Tabla 23* se muestran valores promedio de metales pesados en los fangos de la EDAR de Xinzo de Limia. Estos datos han sido proporcionados por la empresa concesionaria del servicio.

### CONSUMO ELÉCTRICO

En cuanto al consumo eléctrico, la empresa concesionaria del servicio proporcionó datos de horas de encendido y potencia de todos los equipos de la planta. La información relativa a la potencia de los equipos de cada uno de los escenarios se expone en el *Anexo C*. Con esta información se calculó el consumo eléctrico, como muestra la *Tabla 24*, de cada uno de los subsistemas por separado, tanto antes de las obras de mejora como posteriormente a las mismas.

Además, se incluyó el consumo eléctrico de los equipos auxiliares (subsistema 5) ya que afecta a toda la planta. El subsistema 4 no se incluye en este apartado, porque como se ha explicado, corresponde al transporte y aplicación de los fangos de la depuradora, y no se considera consumo eléctrico.

**Tabla 24.** Consumo eléctrico en cada uno de los subsistemas por m<sup>3</sup> de agua tratada. Fuente: Elaboración propia.

	2.015	2.016
<b>Subsistema 1 (kWh/m<sup>3</sup>)</b>	0,193	0,094
<b>Subsistema 2 (kWh/m<sup>3</sup>)</b>	0,805	0,381
<b>Subsistema 3 (kWh/m<sup>3</sup>)</b>	0,166	0,034
<b>Subsistema 5 (kWh/m<sup>3</sup>)</b>	0,013	0,014

La mayor reducción de consumo eléctrico ha tenido lugar en el subsistema 3, es decir, en la línea de lodos. También se ha dado una reducción importante en los subsistemas 1 (pretratamiento) y 2 (tratamiento biológico). En el subsistema 5 se produce un pequeño aumento del consumo, debido a la instalación de equipos auxiliares nuevos.

## TRANSPORTE

Además del transporte de los fangos para la aplicación en agricultura, también hay que considerar el transporte de los residuos de desbaste y de los reactivos. Con los datos aportados por la empresa concesionaria del servicio se han realizado los cálculos pertinentes para obtener las t·km de transporte por m<sup>3</sup> de agua tratada (*Tabla 25*).

Se ha tenido en cuenta la localización de cada uno de los proveedores, y se ha calculado el promedio de pedidos de los reactivos, y el promedio de retirada de fango y residuos, en cada uno de los escenarios (2.015 antes de las obras de mejora y 2.016 después de las obras de mejora).

**Tabla 25.** Datos de transporte en t·km por m<sup>3</sup> de agua tratada. Fuente: Elaboración propia.

	<b>Empresa gestora (2.015)</b>	<b>Transporte t·km/m<sup>3</sup> 2.015</b>
<b>Poliectrolito</b>	Cromogenia-Units (Arteixo)	1,25E-05
<b>Cloruro férrico</b>	Lindcold Iberica (Monforte de Lemos)	4,57E-04
<b>Residuos de desbaste</b>	Grupo Toysal (Xiloga) (As Somozas)	2,20E-03
<b>Fangos</b>	Sociedad Agrícola de la Patata Ribaseca (León)	5,24E-02
	<b>Empresa gestora (2.016)</b>	<b>Transporte t·km/m<sup>3</sup> (2.016)</b>
<b>Poliectrolito</b>	Tesis Galicia (Ponteareas)	2,24E-07
<b>Cloruro férrico</b>	Lindcold Iberica (Monforte de Lemos)	1,01E-05
<b>Residuos de desbaste</b>	Grupo Toysal (Xiloga) (As Somozas)	6,38E-05
<b>Fangos</b>	Sociedad Agrícola de la Patata Ribaseca (León)	8,17E-03

Con todos los datos expuestos de caracterización de aguas, reactivos, residuos, fangos, emisiones a la atmósfera, consumo eléctrico y transporte, se realiza la tabla del inventario del ciclo de vida, la cual se expone de forma detallada con todos los elementos referidos a la unidad funcional (1 m<sup>3</sup>) en el *Anexo D*. Todos los datos que forman el inventario han sido contrastados con diferentes artículos (*Hospido et al., 2.008, Hospido et al., 2.004, Lorenzo-Toja et al., 2.015*) observando que entran en los rangos definidos en los mismos.

### 3.3. Evaluación del impacto

La evaluación del impacto es un paso esencial para medir los impactos ambientales en el Análisis del Ciclo de Vida, y se ha realizado utilizando el software SimaPro 7.0. De esta manera es posible conocer el perfil ambiental de la EDAR de Xinzo de Limia en los dos escenarios y evaluar distintas categorías de impacto.

Según la normativa ISO 14040, esta fase del ACV queda determinada por elementos obligatorios y opcionales. Los elementos que se utilizan en el presente trabajo son selección de categorías de impacto, la clasificación, la caracterización y la normalización.

SimaPro 7.0 LCA Software, desarrollado por PReConsultants, es una herramienta para recopilar, analizar y monitorizar la representación ambiental de productos o procesos (*Rohrbacher, 2.011*). Cuenta con un gran número de métodos, uno de ellos es CML baseline 2000, desarrollado por la Universidad de Leiden, que es utilizado por numerosos autores (*Li et al., 2.013; Vega, 2.010; Hospido et al., 2.008; Gallego, 2.008*), pero también es ampliamente utilizado otro método llamado ReCiPe (*Martorell, 2.005; Rintelen, 2.013; Lopsik, 2.013; Lorenzo-Toja et al, 2.015*) y que se ha decidido utilizar en este trabajo por las ventajas que presenta.

ReCiPe fue desarrollado por la Universidad de Leiden, PReConsultants y el Ministerio de Medio Ambiente de Holanda; con el objetivo de combinar las ventajas de los métodos CML y Eco-Indicator99 (otro método aplicable en ACV), ya que cuenta con la solidez científica del CML y con la facilidad de interpretación del Eco-Indicator99. Además, en ReCiPe las categorías se analizan más detalladamente que en otros métodos, son más específicas, y se hallan más cercanas a la intervención ambiental (*Rintelen, 2.013*).

Se pueden encontrar categorías de impacto intermedias (*midpoint*) o finales (*endpoint*). Las categorías ambientales intermedias se hallan más cercanas a la intervención ambiental, lo que permite modelos de cálculo más detallados.

En el caso de ReCiPe se determinan indicadores (o categorías de impacto) a dos niveles:

- 18 indicadores de *midpoint*, que se centran en problemas ambientales individuales.
- 3 indicadores de *endpoint* que muestran el impacto agrupado en estos 3 grandes grupos.

En este trabajo se utilizan los indicadores *midpoint* de ReCiPe, ya que a pesar de que con los indicadores *endpoint* se simplifica la interpretación, se incrementa la incertidumbre de los resultados, por lo que se ha considerado más apropiado utilizar *midpoints*.

Una vez definidas las categorías, es necesario agrupar los datos del inventario según su potencial impacto, clasificando de esta manera cada uno de los datos en las diferentes categorías.

Mediante la aplicación del modelo se consigue la caracterización, es decir, se obtiene un indicador ambiental en cada categoría de impacto tratada, considerando una unidad de referencia para todas las sustancias clasificadas dentro de ella mediante el empleo de factores de peso o equivalencia.

El siguiente paso que se ha dado es la normalización, donde se comparan todos los impactos ambientales en la misma escala, permite la adimensionalización de las categorías y la comparación entre las mismas.

En la *Tabla 26* se presentan las 18 categorías de impacto (con sus siglas en inglés), sus unidades de equivalencia para la caracterización, y su correspondiente factor de normalización.

**Tabla 26.** Categorías de impacto, unidades y factores de normalización. Fuente: *Goedkoop, et al, 2.009, y SimaPro 7.0.*

<b>Categoría de impacto</b>	<b>Unidades</b>	<b>Factor de normalización</b>
<b>Cambio climático (CC)</b>	kg CO <sub>2</sub> eq	8,92E-05
<b>Agotamiento de ozono (OD)</b>	kg CFC-11 eq	4,54E+01
<b>Acidificación terrestre (TA)</b>	kg SO <sub>2</sub> eq	2,91E-02
<b>Eutrofización de agua dulce (FE)</b>	kg P eq	2,41E+00
<b>Eutrofización marina (ME)</b>	kg N eq	9,88E-02
<b>Toxicidad humana (HT)</b>	kg 1,4-DB eq	1,59E-03
<b>Formación de oxidantes fotoquímicos (POF)</b>	kg NMVOC	1,76E-02
<b>Formación de material particulado (PMF)</b>	kg PM <sub>10</sub> eq	6,71E-02
<b>Ecotoxicidad terrestre (TE)</b>	kg 1,4-DB eq	1,21E-01
<b>Ecotoxicidad de agua dulce (FE)</b>	kg 1,4-DB eq	9,09E-02
<b>Ecotoxicidad marina (ME)</b>	kg 1,4-DB eq	1,15E-01
<b>Radiación ionizante (IR)</b>	kBq U <sup>235</sup> eq	1,60E-04
<b>Ocupación de terrenos agrícolas (ALO)</b>	m <sup>2</sup> a	2,21E-04
<b>Ocupación de terreno urbano (ULO)</b>	m <sup>2</sup> a	2,46E-03
<b>Transformación del medio natural (NLT)</b>	m <sup>2</sup>	6,19E+00
<b>Agotamiento de agua (WD)</b>	m <sup>3</sup>	0,00E+00
<b>Agotamiento de metales (MD)</b>	kg Fe eq	1,40E-03
<b>Agotamiento de combustible fósil (FD)</b>	kg oil eq	6,43E-04

ReCiPe presenta tres factores acorde a tres perspectivas:

- Individualista (I): se basa en un interés a corto plazo.
- Jerárquica (H): es un modelo de consenso, basado en los principios más comunes respecto a plazo temporal. Es considerado como el modelo por defecto.
- Igualitaria (I): posee el periodo de tiempo más largo.

En este trabajo se decide tomar la metodología de puntos intermedios desde una perspectiva jerárquica, ReCiPe Midpoint (H). Lo óptimo sería considerar los factores de normalización dependiendo del lugar, sin embargo, para el método ReCiPe solo hay dos opciones, nivel europeo y nivel mundial, por lo que se escoge nivel Europeo.

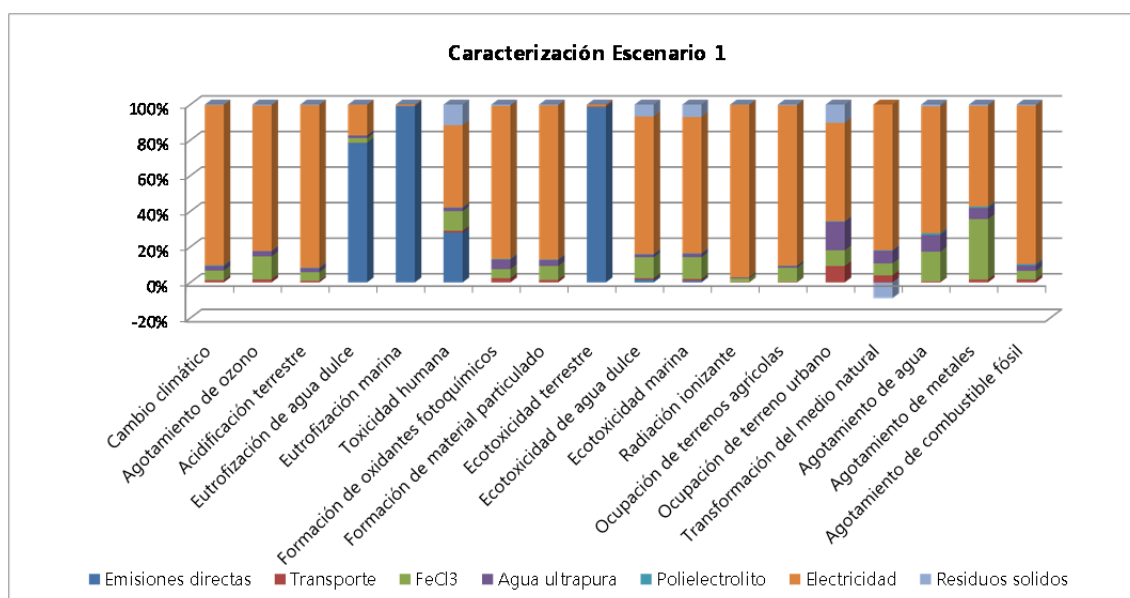
### 3.4. Interpretación de los resultados

En este apartado se muestran los resultados obtenidos. En primer lugar se presentan los resultados de cada uno de los escenarios por separado para, seguidamente, compararlos. Además, se expone la contribución de cada subsistema dentro del total y se realiza un análisis detallado de las categorías más relevantes. Las tablas con todos los resultados obtenidos en el Análisis del Ciclo de Vida, utilizando el software SimaPro 7.0 con el método ReCiPe, aparecen detalladas en el *Anexo E*.

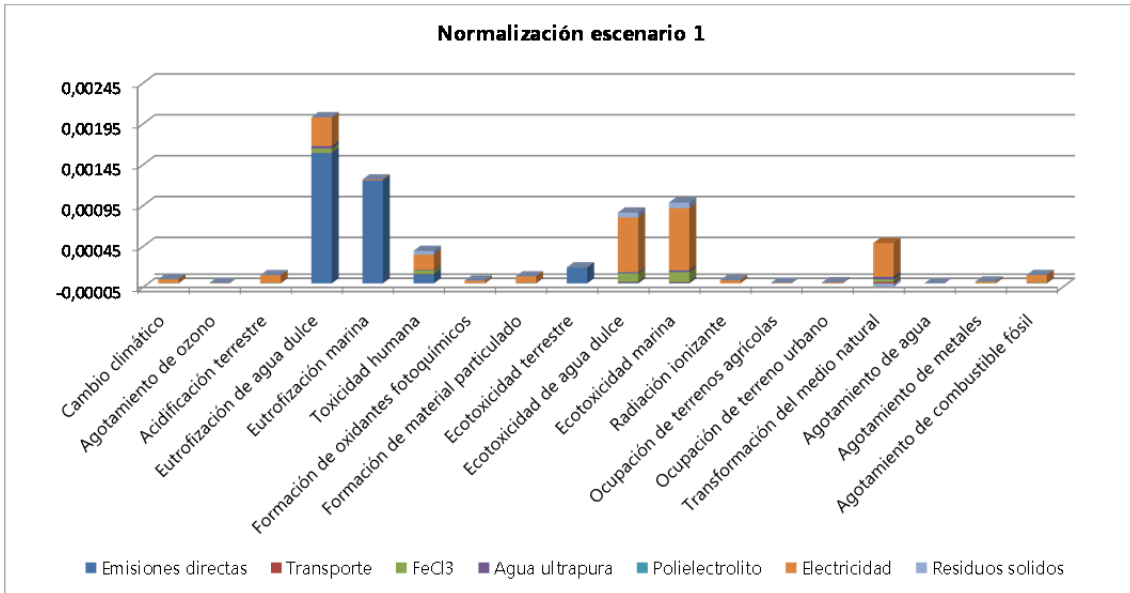
#### 3.4.1. Resultados de cada escenario

##### ESCENARIO 1

Las *Figuras 27 y 28* muestran los resultados de caracterización y normalización del escenario 1.



**Figura 27.** Resultados caracterización escenario 1. Fuente: Elaboración a partir de SimaPro 7.0.



**Figura 28.** Resultados normalización escenario 1. Fuente: Elaboración a partir de SimaPro 7.0.

En la *Figura 27* se observan los resultados de caracterización del escenario 1, donde se aprecia que en la mayoría de las categorías de impacto predomina la electricidad, suponiendo los mayores porcentajes. En la categoría de ecotoxicidad terrestre destacan las emisiones directas de la EDAR (descarga al efluente), con un 98%. Además en las categorías de eutrofización marina y de agua dulce también predominan las emisiones directas de la EDAR. En la categoría de toxicidad humana aparecen unos porcentajes más equilibrados, destaca la electricidad, las emisiones directas de la EDAR, el reactivo utilizado ( $FeCl_3$ ) y los residuos sólidos generados.

Es importante puntualizar la categoría de transformación del medio natural ya que se observa un valor negativo, que se explica porque el destino de los fangos generados en esta EDAR es su aplicación en agricultura, es decir, supone eliminar una cantidad equivalente (en términos de nitrógeno) de fertilizante.

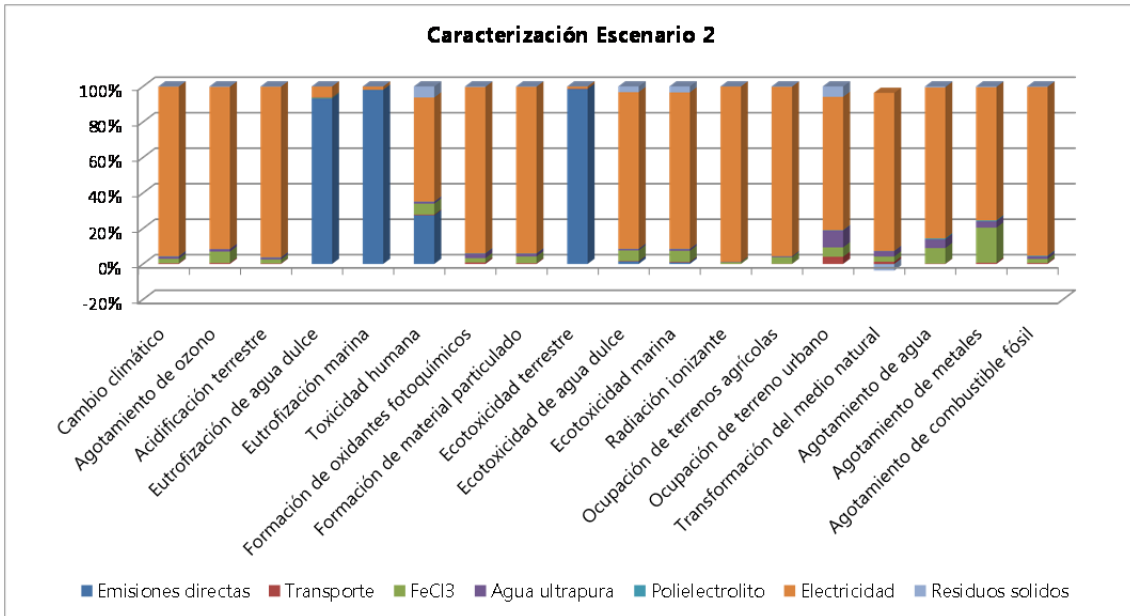
En la *Figura 28* se presenta la normalización del escenario 1, que indica la comparación de todos los impactos en la misma escala. La categoría con mayor valor es la eutrofización del agua dulce, dada por la descarga de nutrientes al medio acuático, seguida de la eutrofización marina y la ecotoxicidad tanto de agua dulce como del medio marino. La eutrofización de ambos medios está marcada por la naturaleza de la propia EDAR, mientras que la ecotoxicidad, está marcada por la electricidad consumida en el proceso de depuración. Otras categorías de impacto con valores relevantes son la transformación del medio natural y la toxicidad humana.

Por tanto, el escenario 1 está marcado por el consumo de electricidad y por las emisiones directas de la EDAR, destacando las categorías de eutrofización del agua dulce y marina, así como la ecotoxicidad en ambos medios.

## ESCENARIO 2

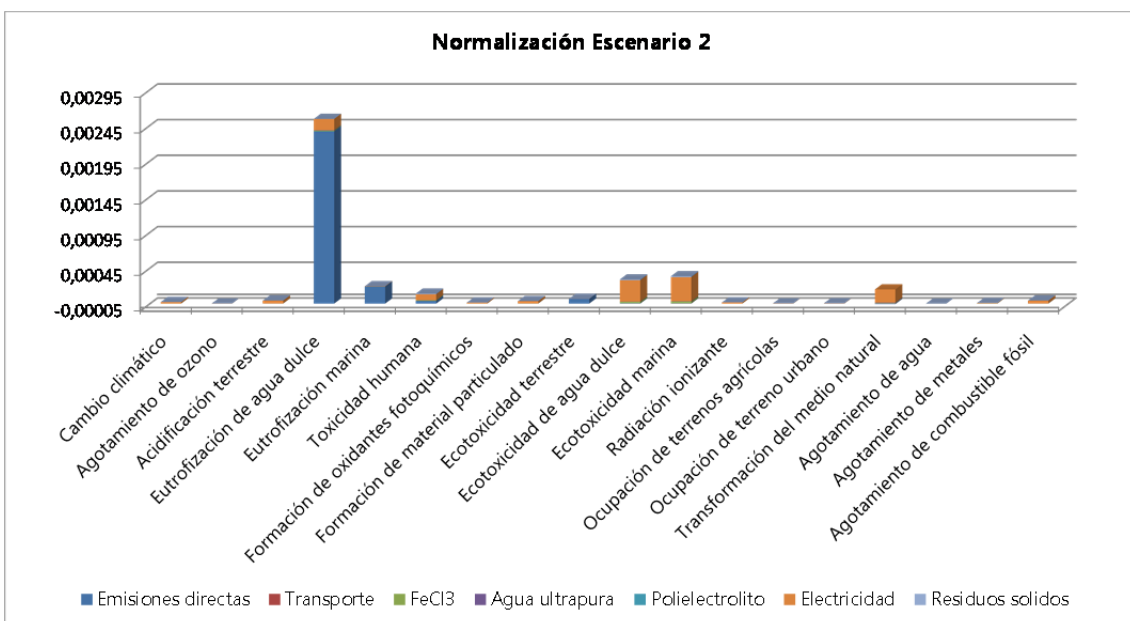
Las *Figura 29* y *30* muestran los resultados de caracterización y normalización del escenario 2.

Los resultados que se reflejan en la *Figura 29* son muy similares a los de la *Figura 27* (caracterización del escenario 1), predominando de nuevo el consumo de electricidad y las emisiones directas de la EDAR.



**Figura 29.** Resultados caracterización escenario 2. Fuente: Elaboración a partir de SimaPro 7.0.

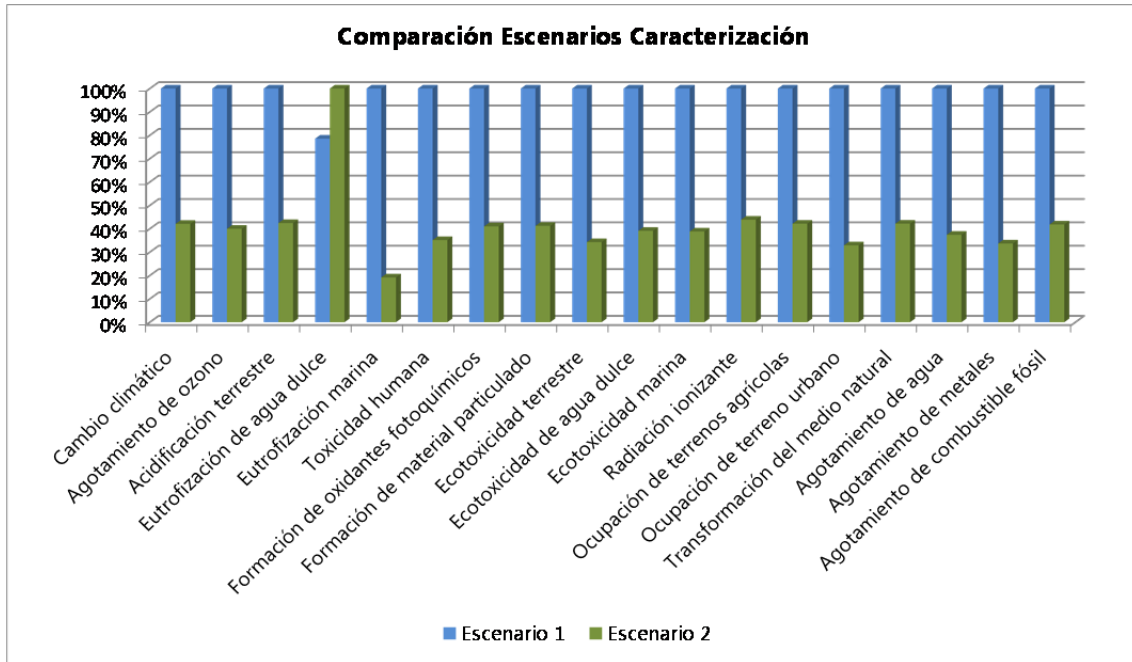
En cuanto a los resultados de normalización presentados en la *Figura 30*, también son semejantes a los mostrados en la *Figura 28*, teniendo los mayores valores la eutrofización de los dos medios, la ecotoxicidad de agua dulce y marina, la transformación del medio natural y la toxicidad humana. Se observa una diferencia significativa entre el valor de la eutrofización del agua dulce con el resto de categorías.



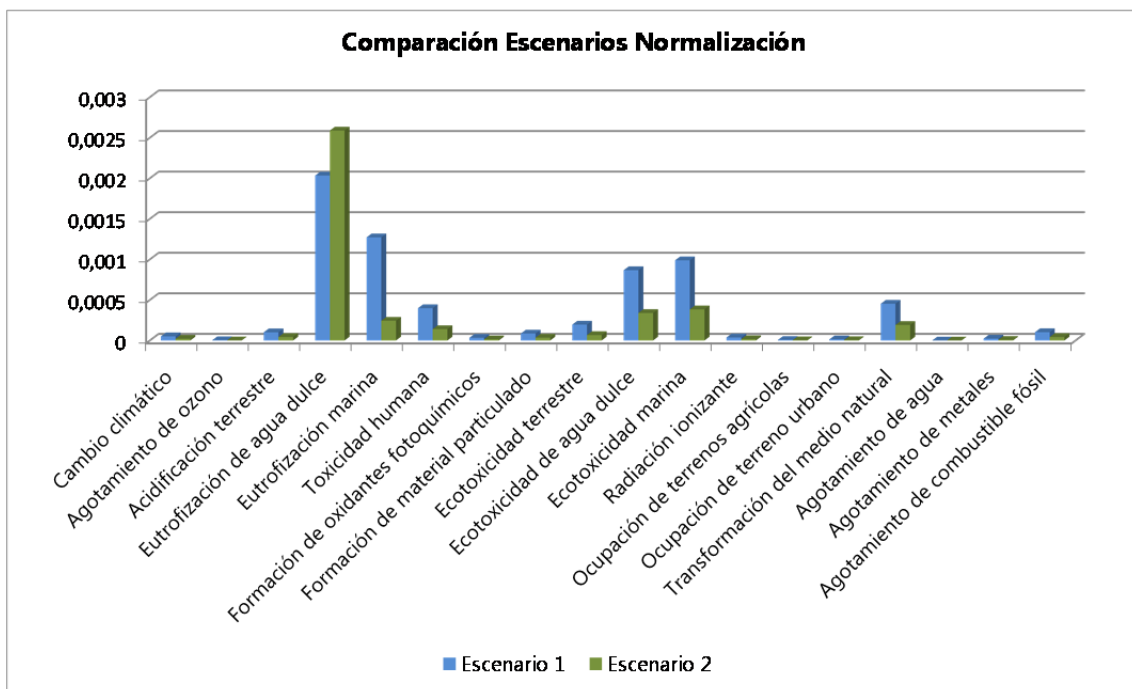
**Figura 30.** Resultados normalización escenario 2. Fuente: Elaboración a partir de SimaPro 7.0.

### 3.4.2. Comparación de los dos escenarios y categorías relevantes

La *Figura 31* se corresponde con la caracterización de los dos escenarios comparados donde se contemplan los porcentajes del impacto en cada una de las categorías. En la mayoría de las categorías el impacto se reduce en torno a un 60%, e incluso llegando a un 80% en la eutrofización marina. El único incremento del impacto se produce en la eutrofización del agua dulce con un valor de 21%. La *Figura 32* presenta la normalización.



**Figura 31.** Resultados caracterización de los 2 escenarios comparados. Fuente: Elaboración a partir de SimaPro 7.0.



**Figura 32.** Resultados normalización de los 2 escenarios comparados. Fuente: Elaboración a partir de SimaPro 7.0.

De nuevo, en la *Figura 32* se observa que las categorías con mayor valor son las relacionadas con la eutrofización y con la ecotoxicidad, produciéndose una reducción del impacto en todas las categorías excepto en la eutrofización del agua dulce.

La *Tabla 27* refleja los resultados detallados de normalización para cada uno de los dos escenarios, el factor de normalización de cada categoría, y el valor total del impacto producido por la EDAR de Xinzo de Limia en ambos escenarios.

En la categoría de eutrofización de agua dulce, para el escenario 1 se obtiene un valor normalizado de 0,00203 y para el escenario 2 de 0,00259. Como se ha indicado en cada uno de los escenarios por separado, esta categoría cuenta con los mayores valores de impacto, lo que se explica con la propia función de una EDAR. En el tratamiento de aguas residuales se mejora la calidad del agua y, entre otros aspectos, trata de mitigar la eutrofización, eliminando el nitrógeno y el fósforo de manera que se cumpla la legislación vigente. La EDAR analizada en este estudio cumple los límites exigidos de ambos nutrientes.

**Tabla 27.** Resultados normalización de los 2 escenarios comparados. Fuente: Elaboración a partir de SimaPro 7.0.

<b>Categoría de impacto</b>	<b>Factor de normalización</b>	<b>Escenario 1</b>	<b>Escenario 2</b>
<b>Cambio climático (CC)</b>	8,92E-05	5,13E-05	2,16E-05
<b>Agotamiento de ozono (OD)</b>	4,54E+01	3,65E-06	1,46E-06
<b>Acidificación terrestre (TA)</b>	2,91E-02	1,01E-04	4,29E-05
<b>Eutrofización de agua dulce (FE)</b>	2,41E+00	2,03E-03	2,59E-03
<b>Eutrofización marina (ME)</b>	9,88E-02	1,27E-03	2,44E-04
<b>Toxicidad humana (HT)</b>	1,59E-03	3,98E-04	1,40E-04
<b>Formación de oxidantes fotoquímicos (POF)</b>	1,76E-02	3,40E-05	1,39E-05
<b>Formación de material particulado (PMF)</b>	6,71E-02	8,60E-05	3,54E-05
<b>Ecotoxicidad terrestre (TE)</b>	1,21E-01	1,96E-04	6,71E-05
<b>Ecotoxicidad de agua dulce (FE)</b>	9,09E-02	8,67E-04	3,39E-04
<b>Ecotoxicidad marina (ME)</b>	1,15E-01	9,89E-04	3,84E-04
<b>Radiación ionizante (IR)</b>	1,60E-04	3,77E-05	1,65E-05
<b>Ocupación de terrenos agrícolas (ALO)</b>	2,21E-04	7,20E-06	3,04E-06
<b>Ocupación de terreno urbano (ULO)</b>	2,46E-03	1,36E-05	4,47E-06
<b>Transformación del medio natural (NLT)</b>	6,19E+00	4,53E-04	1,91E-04
<b>Agotamiento de agua (WD)</b>	0	0	0
<b>Agotamiento de metales (MD)</b>	1,40E-03	2,31E-05	7,78E-06
<b>Agotamiento de combustible fósil (FD)</b>	6,43E-04	1,03E-04	4,29E-05
<b>Total</b>		<b>6,67E-03</b>	<b>4,14E-03</b>

La especificación por sustancia para la categoría de eutrofización de agua dulce (*Tabla 28*) refleja que el fósforo total procedente de las emisiones directas de la EDAR supone una contribución del 78,45% de la categoría, por lo que teniendo en cuenta la caracterización del agua residual de la EDAR de Xinzo de Limia expuesta en este trabajo, los resultados concuerdan con el aumento de fósforo en el escenario 2 respecto al escenario 1.

**Tabla 28.** La especificación por sustancia para la categoría de eutrofización de agua dulce.

Fuente: Elaboración a partir de SimaPro 7.0.

Sustancia	Total (%)	Emisiones directas	Otras <sup>1</sup>
<b>Fósforo total</b>	<b>78,446</b>	78,446	0
<b>Fosfato</b>	21,497	0	2,15E+01
<b>Fósforo</b>	0,053	0	5,32E-02
<b>Fósforo</b>	0,004	0	4,24E-03
<b>Total compuestos</b>	100,000	78,446	21,554

<sup>1</sup>: La columna otras, se refiere al resto de factores: Transporte, electricidad, agua ultra pura, polielectrolito, residuos sólidos y cloruro férrico.

Otra de las categorías que presenta valores elevados es la eutrofización marina, aunque se observa en ella el mayor porcentaje de reducción (*Tabla 27*), para el escenario 1 se obtiene un valor normalizado de 0,00127 y para el escenario 2 de 0,000244.

La especificación por sustancia para la categoría de eutrofización marina (*Tabla 29*) indica que el 99% del peso de esta categoría se corresponde con el nitrógeno total procedente de las emisiones directas de la EDAR. Tras las obras de mejora realizadas en la depuradora se ha conseguido aumentar en gran medida la eliminación de nitrógeno, lo que se refleja en esta categoría.

**Tabla 29.** La especificación por sustancia para la categoría de eutrofización marina. Fuente:

Elaboración a partir de SimaPro 7.0.

Sustancia	Total (%)	Emisiones directas	Otras <sup>1</sup>
<b>Nitrógeno total</b>	<b>99,058</b>	99,058	0,00E+00
<b>Oxidos de nitrógeno</b>	0,476	0	4,76E-01
<b>Nitrato</b>	0,404	0	4,04E-01
<b>Nitrógeno</b>	0,040	0	4,02E-02
<b>Amoniaco</b>	0,009	0	9,01E-03
<b>Amonio</b>	0,008	0	7,63E-03
<b>Nitrógeno orgánico</b>	0,004	0	4,36E-03
<b>Total compuestos</b>	100	99,058	0,942

<sup>1</sup>: La columna otras, se refiere al resto de factores: Transporte, electricidad, agua ultra pura, polielectrolito, residuos sólidos y cloruro férrico.

Por tanto, pasando de un valor normalizado de 0,00667 en el escenario 1 a 0,00414 en el escenario 2, se obtiene que la reducción total del impacto en la actualidad es del 37,96 % (*Tabla 27*).

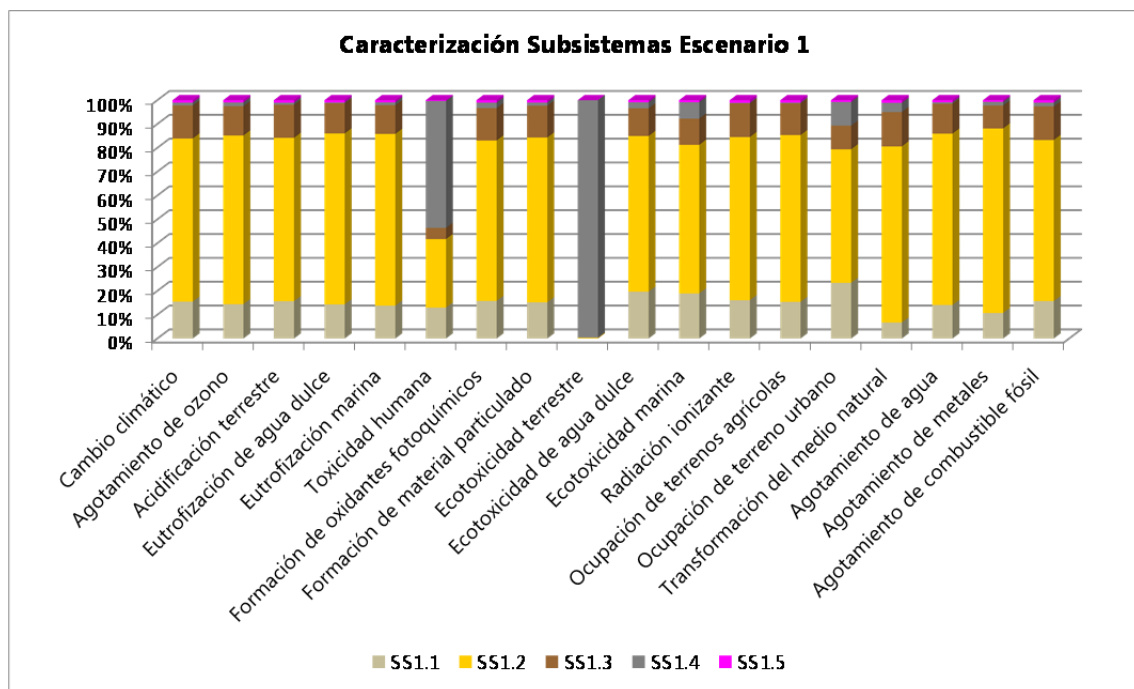
### 3.4.3. Contribución de cada subsistema.

En este apartado se expone la contribución de cada subsistema al total en ambos escenarios analizados.

#### ESCENARIO 1

Las *Figura 33* y *34* muestran los resultados de la caracterización y normalización de los subsistemas que forman el escenario 1.

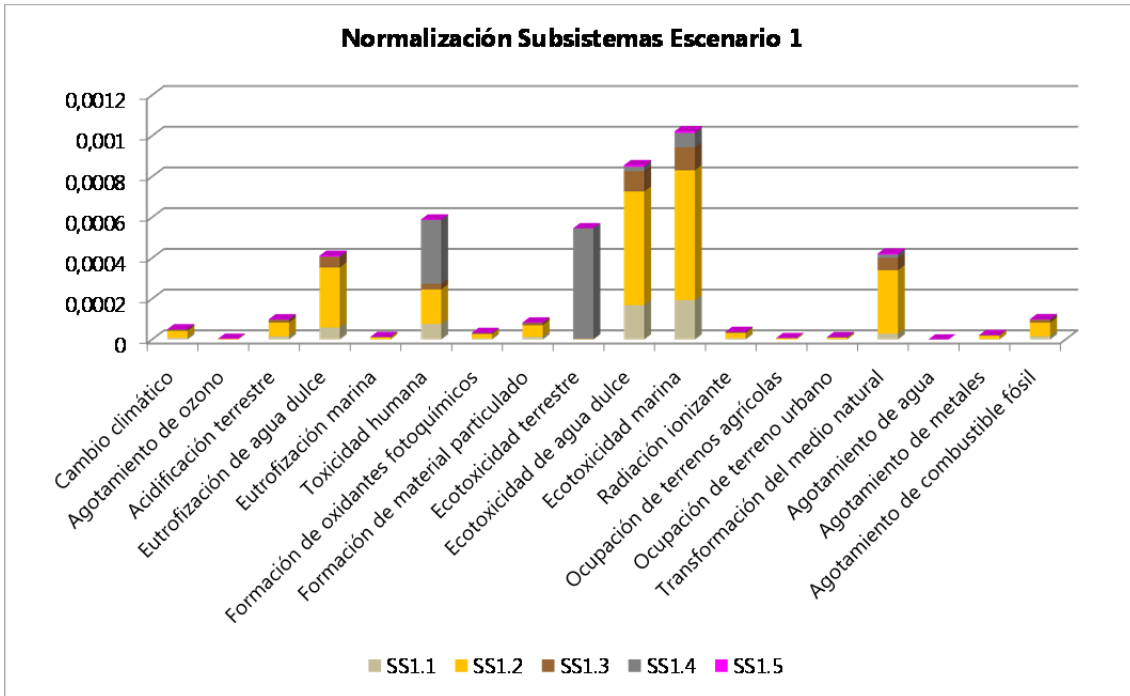
En la *Figura 33* se observa que el porcentaje que predomina en la mayoría de las categorías se corresponde con el subsistema 1.2., es decir en el escenario 1 el subsistema 2. En este subsistema cabe esperar encontrar valores superiores, ya que se corresponde con las fases del proceso de depuración en las que se consume más electricidad y reactivos. En la categoría de ecotoxicidad terrestre, el subsistema 1.4 se corresponde prácticamente con el 100% del impacto, debido a los metales pesados presentes en el fango destinado a agricultura. El subsistema 1.4 también es relevante en la categoría de toxicidad humana, acompañado del subsistema 1.2.



**Figura 33.** Resultados caracterización de la contribución de cada subsistema al escenario 1.

Fuente: Elaboración a partir de SimaPro 7.0.

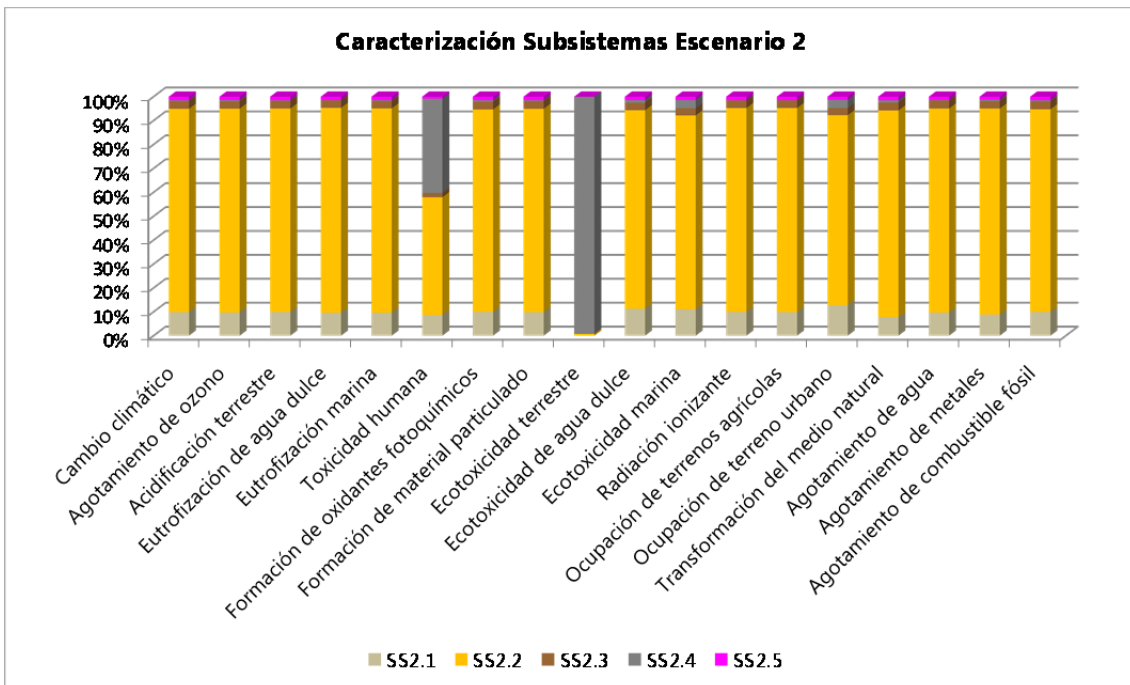
La *Figura 34* indica los resultados normalizados de la contribución de los subsistemas, donde se manifiesta una vez más que las categorías con mayores valores son las relacionadas con la eutrofización, la ecotoxicidad, la transformación del medio natural y la toxicidad humana.



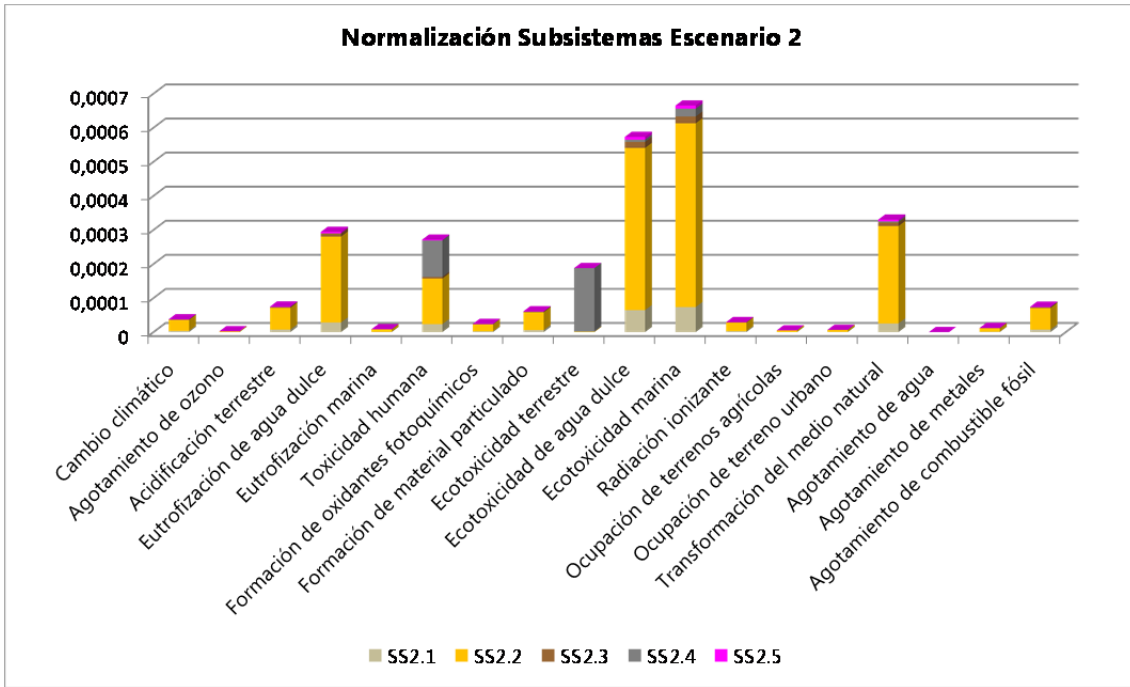
**Figura 34.** Resultados normalización de la contribución de cada subsistema al escenario 1.  
Fuente: Elaboración a partir de SimaPro 7.0.

## ESCENARIO 2

Las *Figura 35* y *36* muestran los resultados de la caracterización y normalización de los subsistemas que forman el escenario 2.



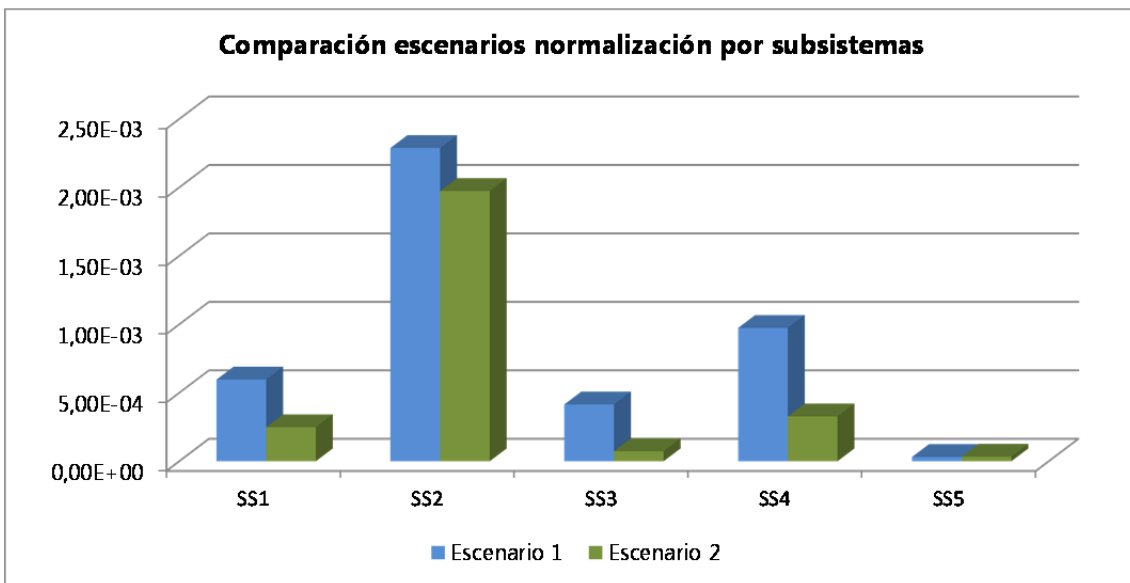
**Figura 35.** Resultados caracterización de la contribución de cada subsistema al escenario 2.  
Fuente: Elaboración a partir de SimaPro 7.0.



**Figura 36.** Resultados normalización de la contribución de cada subsistema al escenario 2.  
Fuente: Elaboración a partir de SimaPro 7.0.

En ambas figuras los resultados tienen la misma tendencia que en el escenario 1, predominando el subsistema 2.2. (subsistema 2 del escenario 2) en la mayoría de las categorías, excepto en la ecotoxicidad terrestre donde domina el 2.4., y en la categoría de toxicidad humana en la que el valor total está repartido entre los subsistemas 2.2. y 2.4.

En la *Figura 37* se exponen los resultados de normalización de ambos escenarios comparados, mostrando el valor total de todas las categorías de impacto para cada subsistema.



**Figura 37.** Resultados normalización de la contribución de cada subsistema a los 2 escenarios.

Fuente: Elaboración a partir de SimaPro 7.0.

El subsistema que predomina es el 2 (*Figura 37*), es decir el correspondiente al tratamiento biológico (cámara anaerobia y cámara aerobia) y al tratamiento terciario (desinfección ultravioleta). Es importante precisar que en el periodo estudiado para el escenario 1 (primer semestre del año 2.015) el tratamiento terciario no estuvo en funcionamiento, mientras que en el escenario 2 (primer semestre del año 2.016) la desinfección ultravioleta funcionó con normalidad durante todo el periodo. A pesar de que el consumo de electricidad aumenta al introducir este tipo de tratamiento, el impacto que genera el subsistema 2 en el escenario 2 es menor que el del mismo subsistema en el escenario 1. Este hecho está determinado por las obras de mejora, en las que se sustituyeron diferentes equipos del subsistema 2 como por ejemplo el sistema de aireación, consiguiendo una mayor eficiencia. Por esta razón, a pesar de incorporar el tratamiento terciario (con gran consumo eléctrico) se consigue reducir el impacto producido por este subsistema a la vez que se consigue otro beneficio ambiental, la disminución de la contaminación microbiológica de las aguas tratadas.

Siguiendo al subsistema 2, aparece el subsistema 4 (aplicación de los fangos en agricultura) que como muestran las *Figuras 33 y 35* afecta a las categorías de toxicidad humana y terrestre, debido al contenido en metales pesados de los fangos.

El subsistema 1 (pretratamiento) y el subsistema 3 (línea de fangos) tienen un impacto menor, siendo el más reducido el impacto causado por el subsistema 5 (equipos auxiliares de la planta).

Como se observa en la *Figura 37* se puede afirmar, que teniendo en cuenta la comparación por subsistemas, el impacto de todos ellos es menor en el escenario 2 (año 2.016) que en el escenario 1 (año 2.015).

## 4. ANALISIS DE ECOEFICIENCIA

Según World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) la ecoeficiencia consiste en conseguir “proporcionar bienes y servicios a un precio competitivo, satisfaciendo las necesidades humanas y la calidad de vida, al tiempo que se reduce progresivamente el impacto ambiental y la intensidad de la utilización de recursos a lo largo del ciclo de vida, hasta un nivel compatible con la capacidad estimada que puede soportar el Planeta”.

De acuerdo con la ISO 14045, cuantificar la ecoeficiencia requiere que el análisis ambiental de un proceso o producto sea directamente relacionado con su valor (*ISO 14045:2015*).

La ecoeficiencia desde una perspectiva de ciclo de vida, se define como la combinación de la metodología de análisis de ciclo de vida, que permite la evaluación de impacto ambiental, junto con la metodología de análisis económico del sistema (*Lorenzo-Toja et al, 2.016*). Por tanto, una vez obtenidos los resultados del Análisis del Ciclo de Vida, y teniendo en cuenta que los valores para el escenario 2 (posterior a las obras) son más favorables ambientalmente, se ha considerado adecuado realizar un análisis de ecoeficiencia de los 2 escenarios planteados.

En este apartado se expone el cálculo de los costes económicos y seguidamente los resultados del análisis de ecoeficiencia obtenidos a partir de los costes y del análisis del ciclo de vida de la EDAR de Xinzo de Limia.

### 4.1. Cálculo de costes económicos

El objetivo de este cálculo es estimar los costes de explotación de la EDAR de Xinzo de Limia, incluyendo las labores de operación que se realizan para obtener los resultados del tratamiento previsto en ella, así como el mantenimiento y conservación de la planta, el equipamiento, la obra civil y otros elementos accesorios. La realización de las diferentes labores de operación exige la utilización de recursos humanos, materiales y energéticos. Para evaluarlos se dividen en costes fijos y costes variables, usando la metodología aportada por Adantia S.L.

#### **COSTES FIJOS.**

Los costes fijos son independientes de la cantidad de agua tratada. Estos gastos se producen desde el instante en que se pone en servicio la EDAR y repercuten sobre la misma a lo largo de su vida útil de forma continua y constante. Dentro de los costes fijos se engloba el personal, el mantenimiento (de equipos mecánicos, obra civil, electricidad y automatismos), el término fijo de electricidad y los costes fijos generales (laboratorio, EPIs, seguros, oficina). En la *Tabla 30* se detalla el valor de cada uno de ellos.

**Tabla 30.** Costes fijos. Fuente: Elaboración propia.

<b>Costes fijos</b>	
<b>Tipo</b>	<b>Valor</b>
<b>Personal</b>	
Jefe de explotación	44.100 €
Operario de planta	27.500 €
Administrativo	24.100 €
<b>Mantenimiento</b>	
Equipos electromecánicos	965.496 €
Obra civil y varios	1.323.568 €
Electricidad y automatismos	842.655 €
<b>Término fijo de electricidad</b>	
Coste del término de potencia	21.200 €
<b>Costes fijos generales</b>	
Laboratorio	0,31 €/h-e
Gastos oficina y comunicación	0,23 €/h-e
Seguros	0,15 €/h-e
Equipos de protección individual	30 €/persona

En cuanto al personal, el número de personas que trabajan en una EDAR es muy variable y depende de diferentes factores como el número de habitantes equivalentes, el tipo de tratamiento, el número de equipos o la edad de la EDAR.

En las EDAR cada vez es mayor el número de equipos e instalaciones, así como su sofisticación, por lo que es fundamental llevar a cabo un buen mantenimiento de los mismos, principalmente, en función de la edad de la EDAR, éste será bajo, medio o alto. Los costes generales varían en función del número de habitantes equivalentes, excepto los EPI (equipos de protección individual) que solo dependen del número de trabajadores de la planta.

### **COSTES VARIABLES.**

Los costes variables dependen de la cantidad y las características del agua tratada. Si el volumen de agua tratada fuera nulo estos costes prácticamente no existirían. Los costes variables incluyen la electricidad, la gestión de residuos (desbaste, arenas, grasas y fango) y los productos consumibles (polielectrolito y cloruro férrico). Además se incluyen las lámparas de UV. Cada uno de ellos aparece en la *Tabla 31* junto con su valor. Estos datos se han estimado a partir de *MINETAD*<sup>v</sup> y *CEDEX 2016*.

<sup>v</sup> MINETAD. Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital. <http://www.minetad.gob.es/es-ES/Paginas/index.aspx> Consultado en: Diciembre 2.017.

**Tabla 31.** Costes fijos. Fuente: Elaboración propia.

<b>Costes variables</b>	
<b>Tipo</b>	<b>Valor</b>
<b>Electricidad</b>	
Término de potencia	0,099 €/kW
<b>Residuos</b>	
Desbaste	100 €/tn
Grasas	150 €/tn
Arenas	30 €/tn
Fango	70 €/tn
<b>Productos consumibles</b>	
Polielectrolito	3 €/kg
FeCl <sub>3</sub>	0,3 €/kg
<b>Otros</b>	
Lámparas UV	250 €

El consumo de electricidad en una EDAR supone uno de los costes más importantes, por lo que es esencial su optimización.

Los residuos de desbaste y las arenas se consideran asimilables a residuos sólidos urbanos. Sin embargo, las grasas son un residuo complicado de gestionar y que puede suponer un gran coste. Los fangos son los residuos que se producen en mayor cantidad, la cantidad generada depende de la carga contaminante y del tipo de tratamiento.

En cuanto a los productos consumibles, en las EDAR se pueden llegar a utilizar en grandes cantidades, por eso, si se optimiza su uso se pueden ajustar los costes.

Por último, las lámparas UV para desinfección también suponen un gran coste ya que su vida útil es corta y su coste es elevado.

## RESULTADOS.

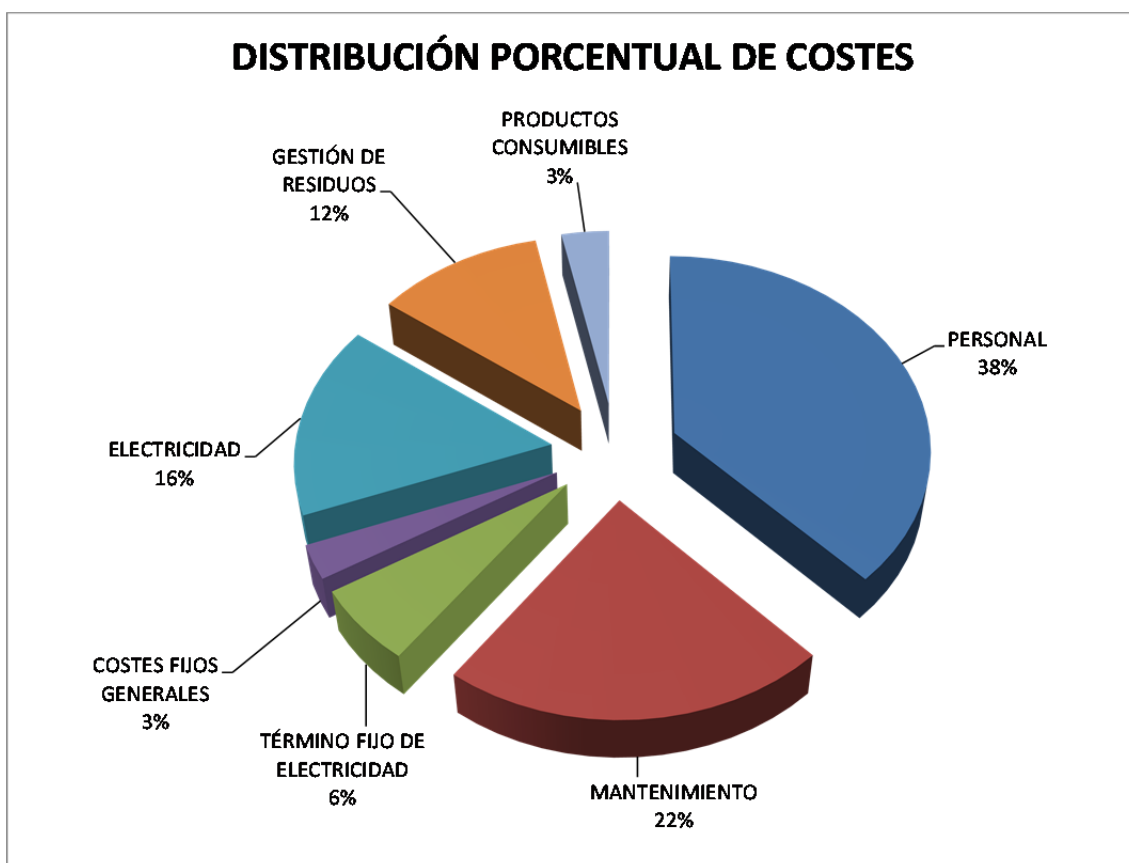
En la *Tabla 32* se presentan los resultados del análisis de coste en los dos escenarios, y en las *Figuras 38* y *39* se expone la distribución porcentual de cada uno de los costes sobre el total.

**Tabla 32.** Resultados del análisis de costes. Fuente: Elaboración propia.

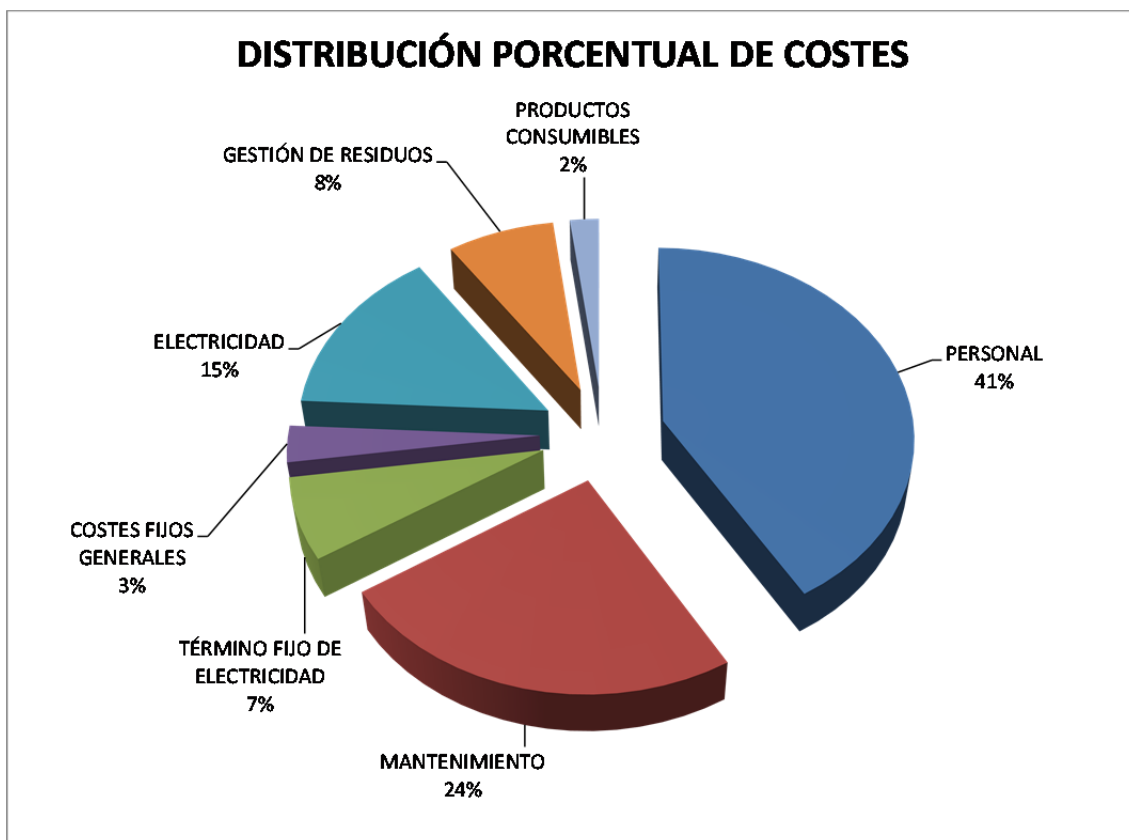
<b>COSTES</b>		<b>2015</b>	<b>2016</b>
Costes sin amortización	€/ano	<b>337.300,62</b>	<b>307.617,60</b>
Coste medio por m <sup>3</sup> (sin amortización)	€/m <sup>3</sup>	<b>0,40</b>	<b>0,17</b>
Costes con amortización	€/ano	<b>581.660,97</b>	<b>668.680,89</b>
Coste medio por m <sup>3</sup> (con amortización)	€/m <sup>3</sup>	<b>0,70</b>	<b>0,36</b>

En el *Anexo F* se detallan los cálculos de los costes además de la amortización, que se ha calculado actualizando las inversiones realizadas en cada fase (construcción de la EDAR en 1.999, primera obra en 2.010 y obra de mejora en 2.015) al año 2.017 y teniendo en cuenta los años de vida útil de cada elemento.

Como se observa en la *Tabla 32* los costes tanto sin amortización como con amortización son superiores en el primer escenario. Analizando los costes con amortización observamos un valor más alto en el segundo escenario (debido al presupuesto utilizado en las obras de mejora del año 2.015), sin embargo, el coste medio por m<sup>3</sup> con amortización sigue siendo más bajo en este escenario. Como se ha explicado en apartados anteriores el caudal de entrada a la EDAR en el escenario 2 fue muy superior al del escenario 1 (debido principalmente a la precipitación) por lo que el volumen de agua tratada también es superior y los costes disminuyen si se calculan por volumen tratado.



**Figura 38.** Resultados del análisis de costes escenario 1 (2.015). Fuente: Elaboración propia.



**Figura 39.** Resultados del análisis de costes escenario 2 (2.016). Fuente: Elaboración propia.

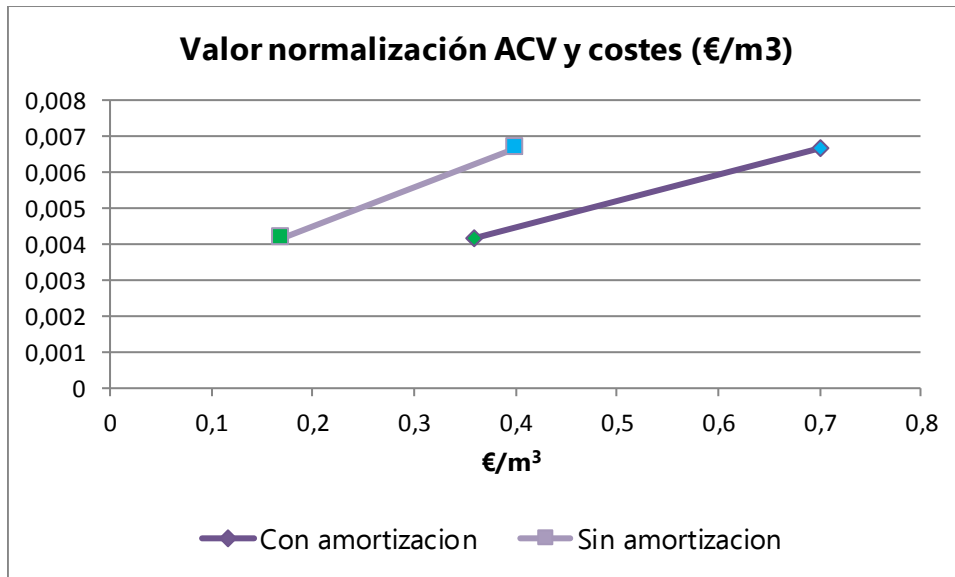
En cuanto a la distribución porcentual de costes, las *Figuras 38 y 39* muestran como los porcentajes correspondientes a costes variables descienden ligeramente, en electricidad y productos consumibles se observa un descenso de un 1% sobre el total, mientras que en la gestión de residuos se percibe una bajada de un 4%. Esta disminución se explica con el descenso del consumo eléctrico, de utilización de reactivos y de generación de residuos dado en el primer semestre del año 2.016 tras las obras de mejora.

Los costes fijos siguen distribuciones porcentuales muy similares en ambos escenarios, ya que no se produce ningún cambio sobre ellos tras la obra de mejora.

## 4.2. Resultados del análisis de ecoeficiencia

Los resultados del Análisis del Ciclo de Vida muestran que la reducción total del impacto es de un 37,96%, pasando de un valor normalizado de 0,00667 en el escenario 1 a 0,00414 en el escenario 2 (apartado 3.4).

En cuanto al análisis económico se ha conseguido una disminución del coste en el escenario 2 respecto al escenario 1, de 0,40 €/m<sup>3</sup> – 0,17 €/m<sup>3</sup>; sin considerar la amortización, como incluyéndola, donde la reducción es 0,70 €/m<sup>3</sup> – 0,36 €/m<sup>3</sup>.



**Figura 40.** Resultados del análisis de ecoeficiencia. Fuente: Elaboración propia.

En la *Figura 40* se presentan los dos vectores obtenidos al relacionar el coste de explotación con el impacto ambiental de la planta analizado bajo perspectiva de ciclo de vida, utilizando la metodología indicada anteriormente, y se observa que tanto considerando la amortización como sin ella, el coste y el impacto disminuye en el segundo escenario (los puntos azules marcan la situación en el escenario 1 y los puntos verdes en el escenario 2).

Comparando con los resultados obtenidos por *Lorenzo-Toja et al, 2.016*, actualmente la EDAR de Xinzo de Limia, sin tener en cuenta la amortización, está integrada en la categoría B de ecoeficiencia, siendo la categoría intermedia de las 3 posibles, donde A representa el escenario más deseable y C el menos deseable en términos de ecoeficiencia.

No obstante, la categoría obtenida puede tener una gran incertidumbre ya que se han sumado todos los impactos obtenidos en el ACV en un solo valor. Además, los resultados presentados en el trabajo de *Lorenzo-Toja et al, 2.016*, se corresponden con la metodología ReCiPe, pero utilizando indicadores endpoint, por ello, se debe tener en cuenta que para poder realizar una comparación más precisa y obtener una categoría de ecoeficiencia rigurosa, sería necesario analizar esta EDAR utilizando estos indicadores.

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha evaluado la estación depuradora de aguas residuales urbanas de Xinzo de Limia (Ourense) en dos escenarios distintos, definidos por la realización de una obra en la EDAR en el año 2.015 cuyo principal objetivo era la mejora de la eliminación de nutrientes. El primer escenario se sitúa en el primer semestre del año 2.015 (anterior a la obra), mientras que el segundo escenario en el primer semestre del año 2.016 (posterior a la obra).

Una de las herramientas más utilizadas para cuantificar el impacto ambiental de una EDAR es el ACV (Análisis del Ciclo de Vida). Actualmente existen numerosos estudios que utilizan esta herramienta con el objetivo de exponer los aspectos ambientales (hot spots) que se han de tener en cuenta en la toma de decisiones para llevar a la práctica estrategias de mejora ambiental.

Para caracterizar la EDAR de Xinzo de Limia se ha realizado un estudio exhaustivo de la misma, tanto de su configuración, como de sus equipos y funcionamiento en los dos escenarios planteados.

En este trabajo se ha llevado a cabo un ACV comparativo de los dos escenarios definiendo como unidad funcional  $1 \text{ m}^3$  de agua tratada, y utilizando para la evaluación del impacto el software SimaPro 7.0 con el método ReCiPe Midpoint (H).

En el inventario del ciclo de vida se ha realizado una recopilación de todos los datos necesarios para identificar y cuantificar las cargas ambientales, analizando la caracterización del agua, los reactivos utilizados, la generación de residuos y fangos, el consumo eléctrico y el transporte.

El principal hot spot identificado es el consumo de energía eléctrica, que afecta a la mayoría de las categorías de impacto definidas por ReCiPe.

Las categorías que presentan mayor impacto en ambos escenarios son la eutrofización del agua dulce y marina (por la propia naturaleza de la EDAR), la ecotoxicidad en el medio acuático (por el consumo de electricidad) y la toxicidad humana y terrestre (marcadas por la disposición de fangos en agricultura que contienen metales pesados). Además, la categoría de transformación del medio natural presenta un valor negativo de impacto debido al destino de los fangos generados en la planta.

Comparando los dos escenarios se observa una disminución del impacto en el escenario 2 en torno a un 60%. Incluso, en la categoría de eutrofización marina se alcanza un 80%, debido a la mejora en el rendimiento de eliminación de nitrógeno. Por el contrario, la categoría de eutrofización del agua dulce presenta un incremento de un 21% justificado por la disminución del rendimiento de la eliminación de fósforo, sin comprometer la calidad del vertido. Si bien, este incremento se compensa además, con

la disminución en la utilización de  $\text{FeCl}_3$  y en consecuencia en la reducción de la generación de fangos.

Analizando la contribución de cada subsistema a la planta, y teniendo en cuenta que el principal hot spot es el consumo de energía eléctrica, se determina que el subsistema 2 (en ambos escenarios) presenta la mayor contribución al impacto ambiental de toda la EDAR. Aunque en el escenario 2 se incorporó el consumo del tratamiento terciario, el impacto del subsistema 2 en el escenario 2 es menor que el del subsistema 2 en el escenario 1 debido a la instalación de equipos más eficientes en la obra de mejora.

Con los resultados obtenidos se puede afirmar que tras la obra de mejora el impacto de la EDAR actual disminuye en un 37,96%.

Para realizar una evaluación más completa de la EDAR se ha llevado a cabo un análisis de ecoeficiencia, estimando los costes de explotación (tanto los fijos como los variables en los dos escenarios) e incorporando los resultados del ACV. Se ha comprobado que a pesar de incluir nuevos equipos y operaciones en la EDAR, se ha conseguido una disminución bastante elevada del coste en el escenario 2 respecto al escenario 1, tanto sin tener en cuenta la amortización, como incluyéndola. Por tanto se puede afirmar que en este caso concreto se ha conseguido una mejora ambiental acompañada de un beneficio económico.

Con los resultados obtenidos en este trabajo, las estrategias de mejora ambiental deberían encaminarse hacia la reducción del consumo de energía eléctrica o la utilización de energías renovables para obtener un impacto menor.

Otra de las líneas a seguir podría ser la optimización de la eliminación de fósforo por vía biológica en la cámara anaerobia para así conseguir disminuir el impacto sobre la eutrofización, a la vez que se reduce el consumo de químicos y que se genera menor cantidad de fango, lo que también contribuiría al descenso de los impactos sobre la toxicidad humana y terrestre.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Aguas de Galicia. Plan de Saneamiento de Galicia (2000-2015). Xunta de Galicia. Consellería de Medio Ambiente e Ordenación do Territorio. Consultado: Noviembre 2017-Enero 2018. Disponible online: [http://augasdegalicia.xunta.gal/seccion-tema/c/Planificacion\\_do\\_saneamento?content=/Portal-Web/Contidos\\_Augas\\_Galicia/Seccions/plan-saneamento-2000-2015/seccion.html](http://augasdegalicia.xunta.gal/seccion-tema/c/Planificacion_do_saneamento?content=/Portal-Web/Contidos_Augas_Galicia/Seccions/plan-saneamento-2000-2015/seccion.html)
- Bayo, J., Gómez-López, M.D., Luís I., & Moreno, J.M. (2010). *El Análisis del Ciclo de Vida como herramienta para la correcta gestión de una EDAR urbana*. Departamento de Ingeniería Química y Ambiental. ETSIA-UPCT. Cartagena.
- Cajigas Delgado, A. (2012). *Por qué depuramos las aguas residuales urbanas?* Ingeniería y territorio, (71), 4-9. Recuperado de <http://dialnet.unirioja.es/servlet/oaiart?codigo=1340076>
- CEDEX (2016). XXXIV Curso sobre tratamiento de aguas residuales y explotación de estaciones depuradoras. Madrid.
- Corominas, L., Foley, J., Guest, J. S., Hospido, A., Larsen, H. F., Morera, S., & Shaw, A. (2013). *Life cycle assessment applied to wastewater treatment: State of the art*. Water Research, 47(15), 5480. doi:10.1016/j.watres.2013.06.049
- DeustoTech (2012). *Metodología para el Análisis del Ciclo de Vida depuradoras de aguas residuales*. BizkaiLab. Universidad de Deusto. Diputación Foral de Navarra. Libro disponible en: <https://www.aguasresiduales.info/revista/libros/metodologia-para-el-analisis-de-ciclo-de-vida-de-depuradoras-de-aguas-residuales>
- Directiva 91/271/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. DOUE-L-1991-80646.
- 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. DOUE-L-1998-80424.
- Directiva 2006/7/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de febrero de 2006, relativa a la gestión de la calidad de las aguas de baño y por la que se deroga la Directiva 76/160/CEE. DOUE-L-2006-80413.
- Gallego, A. (2008). *Diferenciación espacial en la metodología del Análisis del Ciclo de Vida: Desarrollo de factores regionales para eutrofización acuática y terrestre*. (Tesis doctoral). Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Santiago de Compostela.

- González, M., Guardino, Ramón., Calderón, R. & Santos Gracia, S. (2014). *El análisis de ciclo de vida como herramienta de sostenibilidad en los proyectos de tratamiento de aguas*. AFINIDAD LXXI, 565. Recuperado de: <http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/21004>
- Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., de Schryver, A., Struijs, J., van Zelm, R., (2009). ReCiPe 2008. *A Life Cycle Impact Assessment Method Which Comprises Harmonised Category Indicators at the Midpoint and the Endpoint Level. Report I: Characterisation*. Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM), Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM). Recuperado de: [www.lcia-recipe.info](http://www.lcia-recipe.info).
- Hospido, A., Moreira, M., Fernández-Couto, M., & Feijoo, G. (2004). *Environmental performance of a municipal wastewater treatment plant*. The International Journal of Life Cycle Assessment, 9(4), 261-271. doi:10.1007/BF02978602
- Hospido, A., Moreira, M., & Feijoo, G. (2008). A comparison of municipal wastewater treatment plants for big centres of population in Galicia (Spain). The International Journal of Life Cycle Assessment, 13(1), 57-64. doi:10.1065/lca2007.03.314
- ISO (2006a). Gestión Ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia (ISO 14040:2006). Ginebra, Suiza.
- ISO (2006b). Gestión Ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices (ISO 14044:2006). Ginebra, Suiza.
- ISO (2012). Gestión Ambiental. Evaluación de la ecoeficiencia del sistema del producto. Principios, requisitos y directrices. (ISO 14045:2012). Ginebra, Suiza.
- Ley 5/2006, de 30 de junio, para la protección, la conservación y la mejora de los ríos gallegos. BOE-A-2006-14945.
- Ley 9/2010, de 4 de noviembre, de aguas de Galicia. BOE-A-2010-18559.
- Li, Y., Luo, X., Huang, X., Wang, D., & Zhang, W. (2013). Life cycle assessment of a municipal wastewater treatment plant: A case study in Suzhou, China. Journal of Cleaner Production, 57, 221-227. doi:10.1016/j.jclepro.2013.05.035
- Lopsik, K. (2013). *Life cycle assessment of small-scale constructed wetland and extended aeration activated sludge wastewater treatment system*. International Journal of Environmental Science and Technology, 10(6), 1295-1308. doi:10.1007/s13762-012-0159-y
- Lorenzo-Toja, Y., Vázquez-Rowe, I., Amores, M. J., Termes-Rifé, M., Marín-Navarro, D., Moreira, M. T., & Feijoo, G. (2016). *Benchmarking wastewater treatment plants under an eco-efficiency perspective*. Science of the Total Environment, 566-567, 468-479. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.05.110

- Lorenzo-Toja, Y., Vazquez-Rowe, I., Chenel, S., Marin-Navarro, D., Moreira, M. T., & Feijoo, G. (2015). *Eco-efficiency analysis of spanish WWTPs using the LCA + DEA method*. *Water Research*, 68, 651-666. doi:10.1016/j.watres.2014.10.040
- MAGRAMA (2014). Proyecto de Mejora de la capacidad de eliminación de nutrientes de la EDAR de Xinzo de Limia (Ourense). Confederación Hidrográfica Miño-Sil.
- Martorell, A. (2015). *Aplicació de la metodologia de l'Anàlisi de Cicle de Vida (ACV) a una depuradora de fangs actius (Manlleu)*. (Trabajo de fin de grado). Laboratorio de Ingeniería Química y Ambiental. Universidad de Girona.
- Real Decreto 927/1988, de 29 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de la Administración Pública del Agua y de la Planificación Hidrológica, en desarrollo de los títulos II y III de la Ley de Aguas.
- Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas. BOE-A-1995-27963.
- 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. BOE-A-1996-7159.
- 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. BOE-A-1998-24166.
- Real Decreto 125/2012, de 10 de mayo, por el que se regula la utilización de lodos de depuradora en el ámbito del sector agrario en la Comunidad Autónoma de Galicia. BOE-A-2007-2296.
- Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. BOE-A-2007-21092.
- Renou, S., Thomas, J. S., Aoustin, E., & Pons, M. N. (2008). *Influence of impact assessment methods in wastewater treatment LCA*. *Journal of Cleaner Production*, 16(10), 1098-1105. doi:10.1016/j.jclepro.2007.06.003
- Rintelen, Y. (2013). *Análisis del Ciclo de Vida de los tratamientos terciarios de la EDAR del Prat para la reutilización del agua*. (Trabajo de fin de grado). Universidad Politécnica de Cataluña.
- Rohrbacher, J. (2011). *Evaluating the Environmental Impacts of Wastewater Treatment using Life Cycle Analysis Software*. Ohio Water Environment Association. Annual Conference.
- Rodríguez, G. (2013). *Life Cycle Assessment and Wastewater Treatment: Applications and methodological improvements*. (Tesis doctoral). Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Santiago de Compostela.

- Valderrama, C.A. (2013). *Análisis del Ciclo de Vida de los tratamientos terciarios de la EDAR de El Prat para la reutilización del agua*. (Trabajo final de carrera) Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona. Barcelona.
- Vega, J.A. (2010). *Análisis de ciclo de vida de sistemas de tratamiento de aguas residuales: influencia de los materiales utilizados*. (Proyecto de fin de carrera). Universidad Autónoma de Barcelona.

# **ANEXOS**



## ANEXO A. Principales datos del estudio.

Los datos utilizados para la realización del estudio provienen de dos fuentes: la caracterización del agua corresponde a los valores de las analíticas integradas realizadas por Adantia S.L. y Viaqua S.A.U. Los correspondientes a los reactivos, residuos, fangos, consumos eléctricos y transporte han sido aportados por la empresa concesionaria del servicio (Viaqua S.A.U.).

**Tabla A1.** Caracterización del agua residual de la EDAR\*. (Los valores son por m<sup>3</sup> de agua tratada). Fuente: Elaboración propia.

		ene-15	feb-15	mar-15	abr-15	may-15	jun-15	Promedio	Desviación
<b>DBO<sub>5</sub></b> mg O <sub>2</sub> /L	Entrada	37,00	33,40	76,00	98,90	73,00	121,00	73,22	34,199
	Salida	5,90	<5	<5	<5	9,30	8,00	6,37	1,849
	Rendimiento	84,05	85,03	93,42	94,94	87,26	93,39	91,30	4,787
<b>DQO</b> mg O <sub>2</sub> /L	Entrada	189,00	87,00	237,00	376,00	234,00	339,00	243,67	104,184
	Salida	14,80	11,10	18,00	12,20	29,30	22,10	17,92	6,869
	Rendimiento	92,17	87,24	92,41	96,76	87,48	93,48	92,65	3,662
<b>MES</b> mg/L	Entrada	128,00	30,50	139,00	391,00	69,00	110,67	144,70	127,205
	Salida	6,40	4,71	9,50	2,80	9,00	4,57	6,16	2,653
	Rendimiento	95,00	84,56	93,17	99,28	86,96	95,87	95,74	5,619
<b>N<sub>total</sub></b> mg/L	Entrada	22,97	17,42	27,44	30,00	36,49	64,99	33,22	16,843
	Salida	11,90	9,20	8,50	8,80	12,90	25,20	12,75	6,356
	Rendimiento	48,19	47,19	69,02	70,67	64,65	61,22	61,62	10,215
<b>P<sub>total</sub></b> mg/L	Entrada	3,02	2,08	5,35	4,35	4,50	7,00	4,38	1,730
	Salida	0,46	0,52	0,83	0,29	1,03	0,84	0,66	0,281
	Rendimiento	84,77	75,00	84,49	93,33	77,11	88,00	84,90	6,813
		ene-16	feb-16	mar-16	abr-16	may-16	jun-16	Promedio	Desviación
<b>DBO<sub>5</sub></b> mg O <sub>2</sub> /L	Entrada	660,00	46,00	85,00	30,00	21,00	200,00	173,67	247,112
	Salida	<5	<5	<5	<5	7,00	<5	5,33	0,816
	Rendimiento	99,24	89,13	94,12	83,33	66,67	97,50	96,93	12,096
<b>DQO</b> mg O <sub>2</sub> /L	Entrada	1131,00	145,00	159,00	102,00	76,00	385,00	333,00	406,088
	Salida	37,00	<10	16,00	15,00	16,00	11,00	17,50	9,894
	Rendimiento	96,73	93,10	89,94	85,29	78,95	97,14	94,74	7,071
<b>MES</b> mg/L	Entrada	790,00	111,00	79,00	38,00	20,00	8,00	174,33	304,045
	Salida	3,00	4,00	3,00	5,00	5,00	4,00	4,00	0,894
	Rendimiento	99,62	96,40	96,20	86,84	75,00	50,00	97,71	18,930
<b>N<sub>total</sub></b> mg/L	Entrada	63,10	10,40	20,20	15,20	7,10	18,90	22,48	20,511
	Salida	3,50	2,50	2,60	2,80	1,90	1,20	2,42	0,788
	Rendimiento	94,45	75,96	87,13	81,58	73,24	93,65	89,25	8,920
<b>P<sub>total</sub></b>	Entrada	13,21	2,06	2,40	1,98	1,68	3,70	4,17	4,484

mg/L	Salida	1,80	1,11	0,92	0,96	0,96	0,26	1,00	0,492
	Rendimiento	86,37	46,12	61,67	51,52	42,86	92,97	75,99	21,294

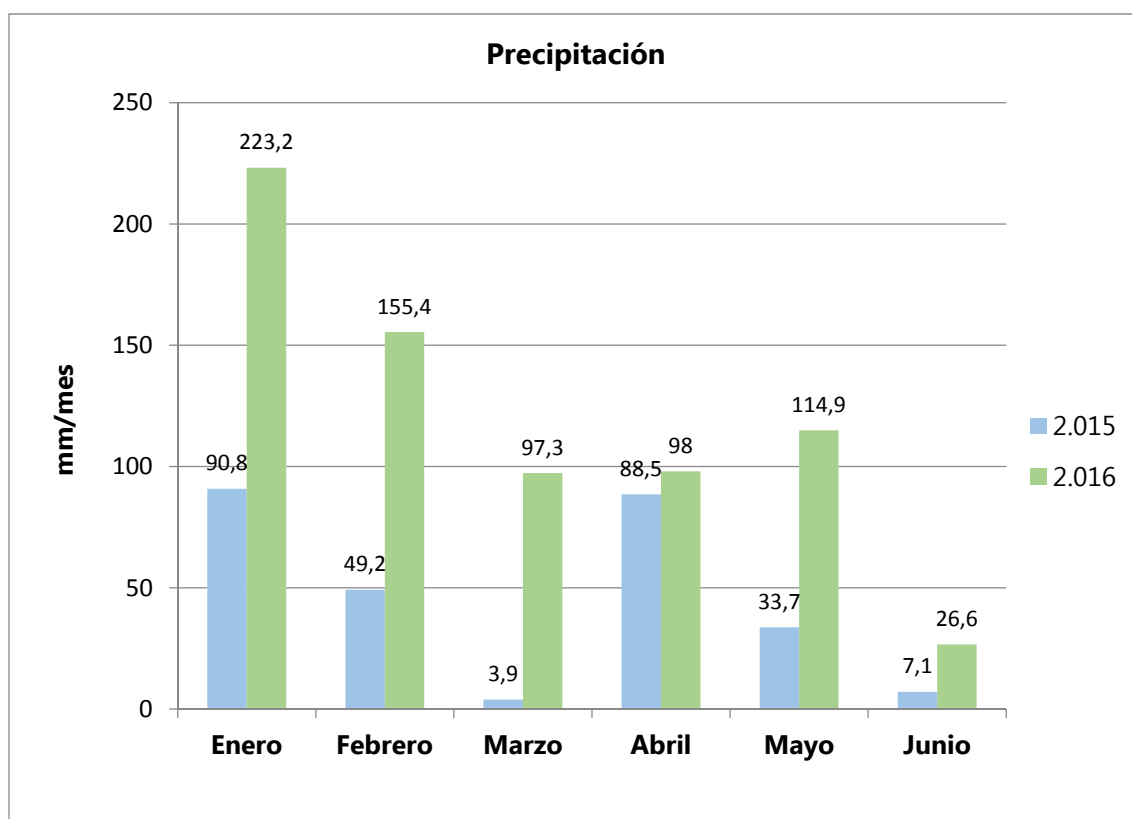
\*Ha de tenerse en cuenta que el límite de detección utilizado en el laboratorio para la determinación de la DBO5 es de 5 mg/L por lo que los valores registrados como <5 se corresponde en realidad con un valor comprendido entre 0 y 5. Ocurre lo mismo con la DQO, en este caso el límite es 10 mg/L.

## ANEXO B. Datos de precipitación.

Con la información disponible de los caudales mensuales de los dos escenarios evaluados en este trabajo, y los datos de precipitación (*MeteoGalicia*) se exponen las Figuras B1 y B2.

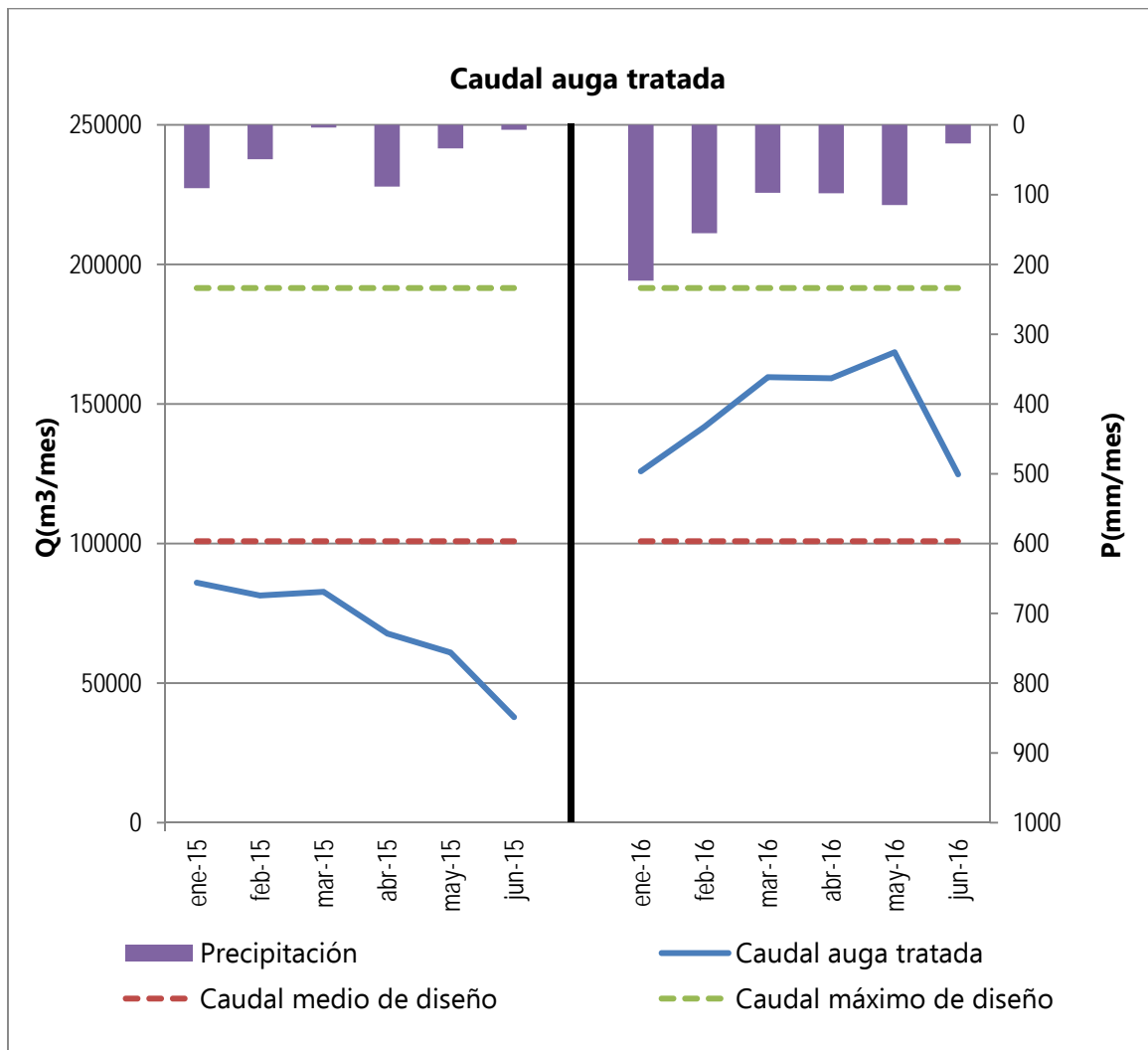
En la Figura B1, se observa que la precipitación es superior en el periodo analizado en el año 2.016 que en 2.015. En los 6 meses considerados los valores obtenidos para el segundo escenario (año 2.016) son superiores a los del primero, llegando a ser más del doble todos los meses excepto abril, donde la precipitación también es ligeramente superior en el año 2.016.

De todo el periodo de tiempo estudiado, la mayor precipitación se produce en el mes de enero de 2.016, con un valor de 223,2 mm/mes, lo que explica el pico de caudal y carga descrito en el apartado 3.2.



**Figura B1.** Datos mensuales de precipitación para los dos escenarios analizados. Fuente: Adaptado de MeteoGalicia.

En la *Figura B2* aparecen los datos de caudal tratado, los valores de caudal medio y máximo de diseño, y la precipitación del periodo de tiempo examinado. En ninguno de los dos periodos el caudal de agua tratada supera el caudal máximo de diseño (191.520 m<sup>3</sup>/mes), sin embargo, durante todo el periodo analizado en el año 2.016 se supera el caudal medio de diseño (100.800 m<sup>3</sup>/mes).



**Figura B2.** Precipitación, caudal de agua tratada y caudales medio y máximo de diseño. Fuente: Elaboración propia.

## ANEXO C. Consumo eléctrico.

El consumo eléctrico para cada equipo se calculó mediante los datos proporcionados por la empresa concesionaria del servicio, conociendo la potencia de cada uno y las respectivas horas de funcionamiento diarias, se computó el consumo eléctrico de acuerdo con la unidad funcional elegida (m<sup>3</sup> de agua tratada).

**Tabla C1.** Cálculo del consumo eléctrico en el escenario 1 (año 2.015) en kWh por m<sup>3</sup> de agua tratada. Fuente: Elaboración propia.

	Horas de funcionamiento al día	POTENCIA en kW	Consumo al día kWh	Consumo UF kWh/m <sup>3</sup>
<b>SUBSISTEMA 1</b>	<b>218,93</b>	<b>59,00</b>	<b>474,54</b>	<b>1,93E-01</b>
Bombeo de entrada	39,93	45,00	299,50	1,22E-01
Bomba-1	18,68	7,50	140,10	5,69E-02
Bomba-2	5,92	7,50	44,42	1,80E-02
Bomba-3	2,31	7,50	17,36	7,05E-03
Bomba-4	8,67	7,50	65,01	2,64E-02
Bomba-5	3,66	7,50	27,47	1,12E-02
Bomba-6	0,69	7,50	5,14	2,09E-03
Pretratamiento	179,00	14,00	175,04	7,11E-02
Cuchara bivalva	2,00	0,98	1,96	7,96E-04
Cestón	1,00	0,80	0,80	3,25E-04
Rototamiz-1	24,00	0,75	18,00	7,31E-03
Rototamiz-2	24,00	0,75	18,00	7,31E-03
Prensa Compactadora	24,00	1,10	26,40	1,07E-02
Soplante-1	12,00	3,00	36,00	1,46E-02
Soplante-2	12,00	3,00	36,00	1,46E-02
Puente desarenador	24,00	0,37	8,88	3,60E-03
Bomba de succión de arenas	4,00	2,20	8,80	3,57E-03
Extracción de grasas	4,00	0,25	1,00	4,06E-04
Clasificador de Arenas	24,00	0,55	13,20	5,36E-03
Concentrador de Grasas	24,00	0,25	6,00	2,44E-03
<b>SUBSISTEMA 2</b>	<b>308,69</b>	<b>104,82</b>	<b>1982,35</b>	<b>8,05E-01</b>
Tratamiento secundario	308,69	96,22	1.982,35	8,05E-01
Aireador-1	23,94	11,00	263,33	1,07E-01
Aireador-2	23,94	11,00	263,33	1,07E-01
Aireador-3	23,93	11,00	263,27	1,07E-01
Aireador-4	23,94	11,00	263,39	1,07E-01
Aireador-5	23,94	7,50	179,54	7,29E-02
Aireador-6	23,94	7,50	179,59	7,29E-02
Aireador-7	23,94	7,50	179,54	7,29E-02

	Horas de funcionamiento al día	POTENCIA en kW	Consumo al día kWh	Consumo UF kWh/m3
Aireador-8	23,94	7,50	179,54	7,29E-02
Vehiculador-1	24,00	4,00	96,00	3,90E-02
Vehiculador-2	0,00	4,00	-	0,00E+00
Puente decantador	24,00	0,37	8,88	3,60E-03
Agitador flotantes	0,02	1,90	0,04	1,70E-05
Bomba flotantes 1	0,70	1,50	1,05	4,27E-04
Bomba flotantes 2	14,04	1,50	21,07	8,55E-03
Bomba fango en exceso 1	4,00	1,30	5,20	2,11E-03
Bomba fango en exceso 2	3,65	1,30	4,74	1,92E-03
Bomba recirculación 1	8,54	3,10	26,46	1,07E-02
Bomba recirculación 2	14,72	3,10	45,64	1,85E-02
Bomba cloruro férrico 1	23,49	0,07	1,71	6,96E-04
Bomba cloruro férrico 2	0,00	0,07	-	0,00E+00
Tratamiento terciario	0,00	8,60	-	0,00E+00
Lamparas U.V	0,00	8,60	-	0,00E+00
<b>SUBSISTEMA 3</b>	<b>89,36</b>	<b>45,64</b>	<b>408,14</b>	<b>1,66E-01</b>
Espesado	24,00	0,60	14,40	5,85E-03
Agitador espesador	24,00	0,60	14,40	5,85E-03
Deshidratación	37,20	35,87	311,40	1,26E-01
Bomba-1	4,68	2,20	10,29	4,18E-03
Bomba-2	4,68	2,20	10,29	4,18E-03
Centrífuga	9,35	30,00	280,61	1,14E-01
Maquina preparación Poli	9,35	0,73	6,83	2,77E-03
Bomba-1	4,80	0,37	1,77	7,20E-04
Bomba-2	4,35	0,37	1,61	6,53E-04
Silo de fangos deshidratados	28,15	9,17	82,35	3,34E-02
Tornillo inyector	9,35	2,20	20,58	8,35E-03
Tornillo elevador	9,35	5,50	51,44	2,09E-02
Tornillo transportador	9,35	1,10	10,29	4,18E-03
Accionamiento tajadera Silo	0,09	0,37	0,03	1,41E-05
<b>EQUIPOS AUXILIARES</b>	<b>183,00</b>	<b>6,66</b>	<b>32,81</b>	<b>1,33E-02</b>
Maniobra e instrumentación	48,00	0,75	4,80	1,95E-03
1 Ordenador	24,00	0,20	4,80	1,95E-03
1 Impresora	0,00	0,10	34,10	1,38E-02
3 Cuadros de maniobra	24,00	0,45	10,80	4,38E-03
Iluminación	102,00	2,79	18,35	7,45E-03
9x2 Fluorescentes	6,00	0,65	3,89	1,58E-03
3x1 Bombillas	6,00	0,09	0,54	2,19E-04

	Horas de funcionamiento al día	POTENCIA en kW	Consumo al día kWh	Consumo UF kWh/m <sup>3</sup>
1 Luces de emergencia	24,00	0,02	0,53	2,14E-04
3x2 Fluorescentes	6,00	0,22	1,30	5,26E-04
1 Luces de emergencia	24,00	0,02	0,53	2,14E-04
4x2 Fluorescentes	6,00	0,25	1,51	6,14E-04
2 Luces de emergencia	24,00	0,04	1,06	4,29E-04
6 Luminarias en 2 Farolas	6,00	1,50	9,00	3,65E-03
Climatización	8,00	0,12	0,96	3,90E-04
2 Radiadores eléctricos	8,00	0,12	0,96	3,90E-04
Varios	25,00	3,00	8,70	3,53E-03
1 Calentador eléctrico de 100L	1,00	1,50	1,50	6,09E-04
1 Nevera	24,00	0,30	7,20	2,92E-03
1 Estufa de laboratorio	0,00	1,20	-	0,00E+00

**Tabla C2.** Cálculo del consumo eléctrico en el escenario 2 (año 2.016) en kWh por m<sup>3</sup> de agua tratada. Fuente: Elaboración propia.

	Horas de funcionamiento al día	POTENCIA en kW	Consumo al día kWh	Consumo UF kWh/m <sup>3</sup>
<b>SUBSISTEMA 1</b>	<b>1,35E+01</b>	<b>8,48E+00</b>	<b>4,56E+02</b>	<b>9,44E-02</b>
Bombeo de entrada	35,22	40,20	263,75	0,0546
Bomba-1	9,39	7,50	70,43	0,0146
Bomba-2	11,52	7,50	86,37	0,0179
Bomba-3	14,07	7,50	105,49	0,0218
Bomba-4	0,10	5,90	0,58	0,0001
Bomba-5	0,12	5,90	0,68	0,0001
Bomba-6	0,03	5,90	0,19	0,0000
Pretratamiento	164,25	16,88	192,48	0,0398
Reja de desbaste automática	4,00	1,10	4,40	0,0009
Cuchara bivalva	2,00	0,98	1,96	0,0004
Cestón	1,00	0,80	0,80	0,0002
Rototamiz-1	23,71	0,75	17,79	0,0037
Rototamiz-2	23,71	0,75	17,79	0,0037
Prensa Compactadora	23,62	1,10	25,98	0,0054
Soplante-1	11,96	4,00	47,82	0,0099
Soplante-2	11,91	4,00	47,63	0,0099
Puente desarenador-1	8,59	0,67	5,77	0,0012
Puente desarenador-2	9,51	0,67	6,39	0,0013
Bomba de succión de arenas-1	3,85	0,75	2,89	0,0006
Bomba de succión de arenas-2	4,43	0,75	3,33	0,0007
Clasificador de Arenas	17,58	0,44	7,73	0,0016

	Horas de funcionamiento al día	POTENCIA en kW	Consumo al día kWh	Consumo UF kWh/m <sup>3</sup>
Concentrador de Grasas	18,37	0,12	2,20	0,0005
<b>SUBSISTEMA 2</b>	<b>4,40E+02</b>	<b>3,46E+02</b>	<b>1,84E+03</b>	<b>3,81E-01</b>
Tratamiento secundario	204,20	164,62	785,01	0,1624
TurboSoplante-1	1,16	45,00	52,17	0,0108
TurboSoplante-2	1,85	45,00	83,32	0,0172
TurboSoplante-3	2,17	45,00	97,66	0,0202
Vehiculador-1	23,83	5,70	135,83	0,0281
Vehiculador-2	23,83	5,70	135,83	0,0281
Agitador	23,83	2,50	59,57	0,0123
Puente decantador	23,52	0,37	8,70	0,0018
Agitador flotantes	0,00	1,90	0,00	0,0000
Compresor válvula	16,10	1,50	24,16	0,0050
Bomba flotantes 1	14,57	1,50	21,85	0,0045
Bomba flotantes 2	19,51	1,50	29,27	0,0061
Bomba fango en exceso 1	1,27	1,30	1,65	0,0003
Bomba fango en exceso 2	1,20	1,30	1,56	0,0003
Bomba recirculación 1	21,43	3,10	66,45	0,0137
Bomba recirculación 2	21,41	3,10	66,36	0,0137
Bomba cloruro férrico 1	8,02	0,07	0,59	0,0001
Bomba cloruro férrico 2	0,49	0,07	0,04	0,0000
Tratamiento terciario	15,93	8,60	137,03	0,0283
Ultravioleta	15,93	8,60	137,03	0,0283
<b>SUBSISTEMA 3</b>	<b>7,19E+01</b>	<b>4,58E+01</b>	<b>1,66E+02</b>	<b>3,44E-02</b>
Espesado	47,23	0,74	17,47	0,0036
Agitador espesador-1	23,69	0,37	8,76	0,0018
Agitador espesador-2	23,54	0,37	8,71	0,0018
Deshidratación	14,00	35,87	117,69	0,0243
Bomba fango deshidratado 1	1,71	2,20	3,76	0,0008
Bomba fango deshidratado 2	1,69	2,20	3,72	0,0008
Centrífuga	3,54	30,00	106,32	0,0220
Maquina preparación Poli	3,54	0,73	2,59	0,0005
Bomba poli 1	2,08	0,37	0,77	0,0002
Bomba poli 2	1,43	0,37	0,53	0,0001
Silo de fangos deshidratados	10,66	9,17	31,20	0,0065
Tornillo inyector	3,54	2,20	7,80	0,0016
Tornillo elevador	3,54	5,50	19,49	0,0040
Tornillo transportador	3,54	1,10	3,90	0,0008
Accionamiento tajadera Silo	0,03	0,37	0,01	0,0000
<b>EQUIPOS AUXILIARES</b>	<b>2,97E+02</b>	<b>1,24E+01</b>	<b>6,89E+01</b>	<b>1,42E-02</b>
Grupo de presión agua industrial	5,87	4,66	13,67	0,0028
Bomba-1	2,33	2,33	5,43	0,0011
Bomba-2	3,54	2,33	8,24	0,0017

	Horas de funcionamiento al día	POTENCIA en kW	Consumo al día kWh	Consumo UF kWh/m <sup>3</sup>
Maniobra e instrumentación	80,00	1,82	25,28	0,0115
2 Ordenadores	24,00	0,40	9,60	0,0083
1 Impresora	0,00	0,10	-	0,0000
3 Cuadros de maniobra	24,00	0,45	10,80	0,0022
Equipo Filtración sonda de fosfatos	4,00	0,30	1,20	0,0002
Sonda de fosfatos	4,00	0,50	2,00	0,0004
Controlador SC1000	24,00	0,07	1,68	0,0003
Iluminación	178,00	2,84	20,24	0,0046
9x2 Fluorescentes	6,00	0,32	1,94	0,0004
3x1 Bombillas	6,00	0,09	0,54	0,0005
5 Luces de emergencia	24,00	0,11	2,64	0,0005
3x2 Fluorescentes	6,00	0,11	0,65	0,0001
1 Luces de emergencia	24,00	0,02	0,53	0,0001
9x2 Fluorescentes	6	0,324	1,94	0,0004
2 Luces de emergencia	24	0,044	1,06	0,0002
6x2 Fluorescentes	2	0,108	0,22	0,0000
1 Luces de emergencia	24	0,022	0,53	0,0001
3x2 Fluorescentes	1	0,108	0,11	0,0000
1 Luces de emergencia	24	0,022	0,53	0,0001
1x2 Fluorescentes	1	0,036	0,04	0,0000
1 Luces de emergencia	24	0,022	0,53	0,0001
6 Luminarias en 2 Farolas	6	1,5	9,00	0,0019
Climatización	8	0,12	0,96	0,000199
2 Radiadores eléctricos	8	0,12	0,96	0,0002
Varios	25	3	8,70	0,0018
1 Calentador eléctrico de 100L	1	1,5	1,50	0,0003
1 Nevera	24	0,3	7,20	0,0015
1 Estufa de laboratorio	0	1,2	-	0,0000

## ANEXO D. Inventario del Ciclo de Vida.

En la *Tabla D1* se expone el inventario del Ciclo de Vida de cada uno de los dos escenarios, con los datos totalizados de los 5 subsistemas.

**Tabla D1.** Inventario del Ciclo de Vida. Fuente: Elaboración propia.

2015 / 2016			
ENTRADAS			
Externas			
	2015	2016	
	en 1 m <sup>3</sup>	en 1 m <sup>3</sup>	
ELECTRICIDAD		MATERIALES	
Total Subsistemas	1,176	0,525	kWh/m <sup>3</sup>
TRANSPORTE		1,69	0,34 g/m <sup>3</sup>
Transporte total	0,055	0,008	T·km/m <sup>3</sup>
		51,60	10,10 g/m <sup>3</sup>
SALIDAS			
SÓLIDOS INERTES			
	en 1 m <sup>3</sup>	en 1 m <sup>3</sup>	
Residuos sólidos	0,149	0,028	kg/m <sup>3</sup>
EMISIONES AL AGUA			
	en 1 m <sup>3</sup>	en 1 m <sup>3</sup>	
DQO	17,917	17,500	g/m <sup>3</sup>
DBO <sub>5</sub>	6,367	5,333	g/m <sup>3</sup>
N	12,750	2,417	g/m <sup>3</sup>
P	0,662	1,002	g/m <sup>3</sup>
MES	6,163	4,000	g/m <sup>3</sup>
EMISIONES AL SUELO			
	en 1 m <sup>3</sup>	en 1 m <sup>3</sup>	
Cd	0,000	0,000	mg/m <sup>3</sup>
Cu	233,065	79,953	mg/m <sup>3</sup>
Ni	2,736	0,939	mg/m <sup>3</sup>
Pb	15,401	5,283	mg/m <sup>3</sup>
Zn	129,712	44,498	mg/m <sup>3</sup>
Hg	0,122	0,042	mg/m <sup>3</sup>
Cr	4,207	1,443	mg/m <sup>3</sup>

## ANEXO E. Resultados del ACV.

En las siguientes tablas se exponen los resultados del Análisis del Ciclo de Vida obtenidos con el software SimaPro 7.0.

Tabla E1. Resultados caracterización Escenario 1. Fuente: Realizado a partir de datos obtenidos en SimaPro 7.0.

Categoría de impacto	Unidades	Total	Emisiones directas	Transporte	FeCl <sub>3</sub>	Agua ultrapura	Polielectrolito	Electricidad	Residuos sólidos
Cambio climático (CC)	kg CO <sub>2</sub> eq	5,76E-01	0	7,31E-03	3,09E-02	1,44E-02	2,81E-03	5,19E-01	1,57E-03
Agotamiento de ozono (OD)	kg CFC-11 eq	8,05E-08	0	1,35E-09	1,04E-08	2,31E-09	1,08E-10	6,59E-08	4,05E-10
Acidificación terrestre (TA)	kg SO <sub>2</sub> eq	3,48E-03	0	3,23E-05	1,67E-04	7,63E-05	1,27E-05	3,18E-03	1,07E-05
Eutrofización de agua dulce (FE)	kg P eq	8,44E-04	6,62E-04	6,26E-07	2,25E-05	1,20E-05	5,37E-07	1,46E-04	5,03E-07
Eutrofización marina (ME)	kg N eq	1,29E-02	1,27E-02	1,66E-06	8,29E-06	8,48E-06	3,86E-07	1,02E-04	5,38E-07
Toxicidad humana (HT)	kg 1,4-DB eq	2,51E-01	7,04E-02	2,44E-03	2,76E-02	4,65E-03	7,03E-04	1,16E-01	2,91E-02
Formación de oxidantes fotoquímicos (POF)	kg NMVOC	1,93E-03	0	4,61E-05	9,81E-05	1,02E-04	8,90E-06	1,66E-03	1,44E-05
Formación de material particulado (PMF)	kg PM <sub>10</sub> eq	1,28E-03	0	1,79E-05	1,01E-04	4,18E-05	4,93E-06	1,11E-03	5,37E-06
Ecotoxicidad terrestre (TE)	kg 1,4-DB eq	1,62E-03	1,59E-03	4,04E-06	3,03E-06	5,20E-06	1,63E-07	1,48E-05	1,37E-07
Ecotoxicidad de agua dulce (FE)	kg 1,4-DB eq	9,54E-03	1,57E-04	6,56E-05	1,13E-03	1,42E-04	2,98E-05	7,37E-03	6,39E-04
Ecotoxicidad marina (ME)	kg 1,4-DB eq	8,60E-03	8,18E-05	8,47E-05	1,05E-03	1,62E-04	2,73E-05	6,59E-03	5,98E-04
Radiación ionizante (IR)	kBq U <sup>235</sup> eq	2,35E-01	0	5,63E-04	4,84E-03	1,26E-03	1,12E-04	2,29E-01	1,90E-04
Ocupación de terrenos agrícolas (ALO)	m <sup>2</sup> a	3,26E-02	0	1,05E-04	2,60E-03	3,14E-04	5,29E-05	2,94E-02	1,35E-04
Ocupación de terreno urbano (ULO)	m <sup>2</sup> a	5,52E-03	0	5,10E-04	4,89E-04	8,80E-04	1,98E-05	3,06E-03	5,66E-04
Transformación del medio natural (NLT)	m <sup>2</sup>	7,32E-05	0	2,90E-06	4,94E-06	5,17E-06	2,33E-07	6,64E-05	-6,44E-06
Agotamiento de agua (WD)	m <sup>3</sup>	4,14E-03	0	2,52E-05	6,91E-04	3,86E-04	4,46E-05	2,95E-03	4,26E-05
Agotamiento de metales (MD)	kg Fe eq	1,65E-02	0	2,67E-04	5,61E-03	1,02E-03	1,39E-04	9,34E-03	1,18E-04
Agotamiento de combustible fósil (FD)	kg oil eq	1,59E-01	0	2,67E-03	7,71E-03	4,80E-03	1,30E-03	1,42E-01	8,91E-04

**Tabla E2.** Resultados normalización Escenario 1. Fuente: Realizado a partir de datos obtenidos en SimaPro 7.0.

Categoría de impacto	Total	Emisiones directas	Transporte	FeCl <sub>3</sub>	Agua ultrapura	Polielectrolito	Electricidad	Residuos sólidos
<b>Cambio climático (CC)</b>	5,13E-05	0	6,52E-07	2,76E-06	1,29E-06	2,51E-07	4,63E-05	1,40E-07
<b>Agotamiento de ozono (OD)</b>	3,65E-06	0	6,14E-08	4,74E-07	1,05E-07	4,89E-09	2,99E-06	1,84E-08
<b>Acidificación terrestre (TA)</b>	1,01E-04	0	9,41E-07	4,87E-06	2,22E-06	3,69E-07	9,24E-05	3,11E-07
<b>Eutrofización de agua dulce (FE)</b>	2,03E-03	1,60E-03	1,51E-06	5,41E-05	2,89E-05	1,30E-06	3,51E-04	1,21E-06
<b>Eutrofización marina (ME)</b>	1,27E-03	1,26E-03	1,64E-07	8,19E-07	8,38E-07	3,81E-08	1,01E-05	5,31E-08
<b>Toxicidad humana (HT)</b>	3,98E-04	1,12E-04	3,87E-06	4,38E-05	7,39E-06	1,12E-06	1,84E-04	4,62E-05
<b>Formación de oxidantes fotoquímicos (POF)</b>	3,40E-05	0	8,12E-07	1,73E-06	1,80E-06	1,57E-07	2,93E-05	2,54E-07
<b>Formación de material particulado (PMF)</b>	8,60E-05	0	1,20E-06	6,75E-06	2,80E-06	3,31E-07	7,45E-05	3,60E-07
<b>Ecotoxicidad terrestre (TE)</b>	1,96E-04	1,92E-04	4,89E-07	3,66E-07	6,29E-07	1,98E-08	1,80E-06	1,66E-08
<b>Ecotoxicidad de agua dulce (FE)</b>	8,67E-04	1,43E-05	5,96E-06	1,03E-04	1,29E-05	2,71E-06	6,70E-04	5,81E-05
<b>Ecotoxicidad marina (ME)</b>	9,89E-04	9,41E-06	9,74E-06	1,21E-04	1,86E-05	3,14E-06	7,58E-04	6,87E-05
<b>Radiación ionizante (IR)</b>	3,77E-05	0	9,01E-08	7,75E-07	2,01E-07	1,79E-08	3,66E-05	3,04E-08
<b>Ocupación de terrenos agrícolas (ALO)</b>	7,20E-06	0	2,32E-08	5,74E-07	6,94E-08	1,17E-08	6,49E-06	2,98E-08
<b>Ocupación de terreno urbano (ULO)</b>	1,36E-05	0	1,25E-06	1,20E-06	2,16E-06	4,88E-08	7,52E-06	1,39E-06
<b>Transformación del medio natural (NLT)</b>	4,53E-04	0	1,80E-05	3,06E-05	3,20E-05	1,44E-06	4,11E-04	-3,99E-05
<b>Agotamiento de agua (WD)</b>	0,00E+00	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
<b>Agotamiento de metales (MD)</b>	2,31E-05	0	3,73E-07	7,85E-06	1,43E-06	1,95E-07	1,31E-05	1,65E-07
<b>Agotamiento de combustible fósil (FD)</b>	1,03E-04	0	1,72E-06	4,96E-06	3,08E-06	8,36E-07	9,14E-05	5,73E-07

**Tabla E3.** Resultados caracterización Escenario 2. Fuente: Realizado a partir de datos obtenidos en SimaPro 7.0.

Categoría de impacto	Unidades	Total	Emisiones directas	Transporte	FeCl <sub>3</sub>	Agua ultrapura	Poliectrolito	Electricidad	Residuos sólidos
Cambio climático (CC)	kg CO <sub>2</sub> eq	2,42E-01	0	1,06E-03	6,06E-03	2,83E-03	5,65E-04	2,31E-01	2,96E-04
Agotamiento de ozono (OD)	kg CFC-11 eq	3,22E-08	0	1,97E-10	2,04E-09	4,52E-10	2,17E-11	2,94E-08	7,61E-11
Acidificación terrestre (TA)	kg SO <sub>2</sub> eq	1,48E-03	0	4,70E-06	3,28E-05	1,49E-05	2,55E-06	1,42E-03	2,01E-06
Eutrofización de agua dulce (FE)	kg P eq	1,07E-03	1,00E-03	9,10E-08	4,40E-06	2,35E-06	1,08E-07	6,51E-05	9,46E-08
Eutrofización marina (ME)	kg N eq	2,47E-03	2,42E-03	2,41E-07	1,62E-06	1,66E-06	7,77E-08	4,55E-05	1,01E-07
Toxicidad humana (HT)	kg 1,4-DB eq	8,81E-02	2,42E-02	3,54E-04	5,40E-03	9,10E-04	1,41E-04	5,17E-02	5,47E-03
Formación de oxidantes fotoquímicos (POF)	kg NMVOC	7,92E-04	0	6,71E-06	1,92E-05	2,00E-05	1,79E-06	7,42E-04	2,72E-06
Formación de material particulado (PMF)	kg PM <sub>10</sub> eq	5,28E-04	0	2,60E-06	1,97E-05	8,18E-06	9,91E-07	4,96E-04	1,01E-06
Ecotoxicidad terrestre (TE)	kg 1,4-DB eq	5,54E-04	5,45E-04	5,87E-07	5,92E-07	1,02E-06	3,29E-08	6,62E-06	2,58E-08
Ecotoxicidad de agua dulce (FE)	kg 1,4-DB eq	3,73E-03	5,39E-05	9,54E-06	2,21E-04	2,79E-05	5,99E-06	3,29E-03	1,20E-04
Ecotoxicidad marina (ME)	kg 1,4-DB eq	3,34E-03	2,81E-05	1,23E-05	2,06E-04	3,17E-05	5,49E-06	2,94E-03	1,12E-04
Radiación ionizante (IR)	kBq U <sup>235</sup> eq	1,03E-01	0	8,19E-05	9,48E-04	2,46E-04	2,25E-05	1,02E-01	3,57E-05
Ocupación de terrenos agrícolas (ALO)	m <sup>2</sup> a	1,37E-02	0	1,53E-05	5,08E-04	6,15E-05	1,06E-05	1,31E-02	2,53E-05
Ocupación de terreno urbano (ULO)	m <sup>2</sup> a	1,82E-03	0	7,42E-05	9,57E-05	1,72E-04	3,99E-06	1,36E-03	1,06E-04
Transformación del medio natural (NLT)	m <sup>2</sup>	3,09E-05	0	4,22E-07	9,67E-07	1,01E-06	4,68E-08	2,97E-05	-1,21E-06
Agotamiento de agua (WD)	m <sup>3</sup>	1,55E-03	0	3,66E-06	1,35E-04	7,55E-05	8,96E-06	1,32E-03	8,00E-06
Agotamiento de metales (MD)	kg Fe eq	5,56E-03	0	3,88E-05	1,10E-03	1,99E-04	2,80E-05	4,17E-03	2,22E-05
Agotamiento de combustible fósil (FD)	kg oil eq	6,67E-02	0	3,89E-04	1,51E-03	9,39E-04	2,62E-04	6,34E-02	1,67E-04

**Tabla E4.** Resultados normalización Escenario 2. Fuente: Realizado a partir de datos obtenidos en SimaPro 7.0.

Categoría de impacto	Total	Emisiones directas	Transporte	FeCl <sub>3</sub>	Agua ultrapura	Polielectrolito	Electricidad	Residuos sólidos
<b>Cambio climático (CC)</b>	2,16E-05	0	9,48E-08	5,40E-07	2,52E-07	5,04E-08	2,06E-05	2,64E-08
<b>Agotamiento de ozono (OD)</b>	1,46E-06	0	8,93E-09	9,28E-08	2,05E-08	9,84E-10	1,34E-06	3,45E-09
<b>Acidificación terrestre (TA)</b>	4,29E-05	0	1,37E-07	9,53E-07	4,34E-07	7,41E-08	4,13E-05	5,84E-08
<b>Eutrofización de agua dulce (FE)</b>	2,59E-03	2,41E-03	2,19E-07	1,06E-05	5,65E-06	2,61E-07	1,57E-04	2,28E-07
<b>Eutrofización marina (ME)</b>	2,44E-04	2,39E-04	2,38E-08	1,60E-07	1,64E-07	7,67E-09	4,49E-06	9,99E-09
<b>Toxicidad humana (HT)</b>	1,40E-04	3,84E-05	5,63E-07	8,58E-06	1,45E-06	2,25E-07	8,22E-05	8,69E-06
<b>Formación de oxidantes fotoquímicos (POF)</b>	1,39E-05	0	1,18E-07	3,38E-07	3,53E-07	3,15E-08	1,31E-05	4,78E-08
<b>Formación de material particulado (PMF)</b>	3,54E-05	0	1,74E-07	1,32E-06	5,49E-07	6,65E-08	3,33E-05	6,77E-08
<b>Ecotoxicidad terrestre (TE)</b>	6,71E-05	6,60E-05	7,11E-08	7,17E-08	1,23E-07	3,98E-09	8,02E-07	3,12E-09
<b>Ecotoxicidad de agua dulce (FE)</b>	3,39E-04	4,90E-06	8,67E-07	2,01E-05	2,53E-06	5,45E-07	2,99E-04	1,09E-05
<b>Ecotoxicidad marina (ME)</b>	3,84E-04	3,23E-06	1,42E-06	2,37E-05	3,64E-06	6,31E-07	3,38E-04	1,29E-05
<b>Radiación ionizante (IR)</b>	1,65E-05	0	1,31E-08	1,52E-07	3,93E-08	3,60E-09	1,63E-05	5,72E-09
<b>Ocupación de terrenos agrícolas (ALO)</b>	3,04E-06	0	3,37E-09	1,12E-07	1,36E-08	2,35E-09	2,90E-06	5,60E-09
<b>Ocupación de terreno urbano (ULO)</b>	4,47E-06	0	1,82E-07	2,35E-07	4,24E-07	9,81E-09	3,36E-06	2,62E-07
<b>Transformación del medio natural (NLT)</b>	1,91E-04	0	2,61E-06	5,98E-06	6,26E-06	2,90E-07	1,84E-04	-7,50E-06
<b>Agotamiento de agua (WD)</b>	0,00E+00	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
<b>Agotamiento de metales (MD)</b>	7,78E-06	0	5,43E-08	1,54E-06	2,79E-07	3,92E-08	5,84E-06	3,10E-08
<b>Agotamiento de combustible fósil (FD)</b>	4,29E-05	0	2,50E-07	9,71E-07	6,04E-07	1,68E-07	4,08E-05	1,08E-07

**Tabla E5.** Resultados caracterización comparación de los 2 escenarios. Fuente: Realizado a partir de datos obtenidos en SimaPro 7.0.

<b>Categoría de impacto</b>	<b>Unidades</b>	<b>Escenario 1</b>	<b>Escenario 2</b>
<b>Cambio climático (CC)</b>	kg CO <sub>2</sub> eq	5,76E-01	2,42E-01
<b>Agotamiento de ozono (OD)</b>	kg CFC-11 eq	8,05E-08	3,22E-08
<b>Acidificación terrestre (TA)</b>	kg SO <sub>2</sub> eq	3,48E-03	1,48E-03
<b>Eutrofización de agua dulce (FE)</b>	kg P eq	8,44E-04	1,07E-03
<b>Eutrofización marina (ME)</b>	kg N eq	1,29E-02	2,47E-03
<b>Toxicidad humana (HT)</b>	kg 1,4-DB eq	2,51E-01	8,81E-02
<b>Formación de oxidantes fotoquímicos (POF)</b>	kg NMVOC	1,93E-03	7,92E-04
<b>Formación de material particulado (PMF)</b>	kg PM <sub>10</sub> eq	1,28E-03	5,28E-04
<b>Ecotoxicidad terrestre (TE)</b>	kg 1,4-DB eq	1,62E-03	5,54E-04
<b>Ecotoxicidad de agua dulce (FE)</b>	kg 1,4-DB eq	9,54E-03	3,73E-03
<b>Ecotoxicidad marina (ME)</b>	kg 1,4-DB eq	8,60E-03	3,34E-03
<b>Radiación ionizante (IR)</b>	kBq U <sup>235</sup> eq	2,35E-01	1,03E-01
<b>Ocupación de terrenos agrícolas (ALO)</b>	m <sup>2</sup> a	3,26E-02	1,37E-02
<b>Ocupación de terreno urbano (ULO)</b>	m <sup>2</sup> a	5,52E-03	1,82E-03
<b>Transformación del medio natural (NLT)</b>	m <sup>2</sup>	7,32E-05	3,09E-05
<b>Agotamiento de agua (WD)</b>	m <sup>3</sup>	4,14E-03	1,55E-03
<b>Agotamiento de metales (MD)</b>	kg Fe eq	1,65E-02	5,56E-03
<b>Agotamiento de combustible fósil (FD)</b>	kg oil eq	1,59E-01	6,67E-02

**Tabla E6.** Resultados normalización comparación de los 2 escenarios. Fuente: Realizado a partir de datos obtenidos en SimaPro 7.0.

<b>Categoría de impacto</b>	<b>Factor de normalización</b>	<b>Escenario 1</b>	<b>Escenario 2</b>
<b>Cambio climático (CC)</b>	8,92E-05	5,13E-05	2,16E-05
<b>Agotamiento de ozono (OD)</b>	4,54E+01	3,65E-06	1,46E-06
<b>Acidificación terrestre (TA)</b>	2,91E-02	1,01E-04	4,29E-05
<b>Eutrofización de agua dulce (FE)</b>	2,41E+00	2,03E-03	2,59E-03
<b>Eutrofización marina (ME)</b>	9,88E-02	1,27E-03	2,44E-04
<b>Toxicidad humana (HT)</b>	1,59E-03	3,98E-04	1,40E-04
<b>Formación de oxidantes fotoquímicos (POF)</b>	1,76E-02	3,40E-05	1,39E-05
<b>Formación de material particulado (PMF)</b>	6,71E-02	8,60E-05	3,54E-05
<b>Ecotoxicidad terrestre (TE)</b>	1,21E-01	1,96E-04	6,71E-05
<b>Ecotoxicidad de agua dulce (FE)</b>	9,09E-02	8,67E-04	3,39E-04
<b>Ecotoxicidad marina (ME)</b>	1,15E-01	9,89E-04	3,84E-04
<b>Radiación ionizante (IR)</b>	1,60E-04	3,77E-05	1,65E-05
<b>Ocupación de terrenos agrícolas (ALO)</b>	2,21E-04	7,20E-06	3,04E-06
<b>Ocupación de terreno urbano (ULO)</b>	2,46E-03	1,36E-05	4,47E-06
<b>Transformación del medio natural (NLT)</b>	6,19E+00	4,53E-04	1,91E-04
<b>Agotamiento de agua (WD)</b>	0,00E+00	0	0
<b>Agotamiento de metales (MD)</b>	1,40E-03	2,31E-05	7,78E-06
<b>Agotamiento de combustible fósil (FD)</b>	6,43E-04	1,03E-04	4,29E-05
<b>Total</b>		<b>6,67E-03</b>	<b>4,14E-03</b>

**Tabla E7.** Resultados caracterización contribución subsistemas escenario 1. Fuente: Realizado a partir de datos obtenidos en SimaPro 7.0.

<b>Categoría de impacto</b>	<b>Unidades</b>	<b>Total</b>	<b>SS1.1</b>	<b>SS1.2</b>	<b>SS1.3</b>	<b>SS1.4</b>	<b>SS1.5</b>
<b>Cambio climático (CC)</b>	kg CO <sub>2</sub> eq	5,61E-01	8,70E-02	3,84E-01	7,78E-02	6,64E-03	5,86E-03
<b>Agotamiento de ozono (OD)</b>	kg CFC-11 eq	7,82E-08	1,1271E-08	5,54E-08	9,63E-09	1,23E-09	7,45E-10
<b>Acidificación terrestre (TA)</b>	kg SO <sub>2</sub> eq	3,40E-03	5,33E-04	2,33E-03	4,72E-04	2,94E-05	3,59E-05
<b>Eutrofización de agua dulce (FE)</b>	kg P eq	1,71E-04	2,45E-05	1,22E-04	2,16E-05	5,69E-07	1,65E-06
<b>Eutrofización marina (ME)</b>	kg N eq	1,26E-04	1,73E-05	9,05E-05	1,51E-05	1,51E-06	1,15E-06
<b>Toxicidad humana (HT)</b>	kg 1,4-DB eq	3,71E-01	4,82E-02	1,07E-01	1,74E-02	1,97E-01	1,31E-03
<b>Formación de oxidantes fotoquímicos (POF)</b>	kg NMVOC	1,83E-03	2,89E-04	1,23E-03	2,49E-04	4,19E-05	1,88E-05
<b>Formación de material particulado (PMF)</b>	kg PM <sub>10</sub> eq	1,24E-03	1,88E-04	8,58E-04	1,65E-04	1,62E-05	1,26E-05
<b>Ecotoxicidad terrestre (TE)</b>	kg 1,4-DB eq	4,51E-03	2,73E-06	1,35E-05	2,31E-06	4,50E-03	1,68E-07
<b>Ecotoxicidad de agua dulce (FE)</b>	kg 1,4-DB eq	9,42E-03	1,85E-03	6,15E-03	1,10E-03	2,38E-04	8,34E-05
<b>Ecotoxicidad marina (ME)</b>	kg 1,4-DB eq	8,90E-03	1,68E-03	5,55E-03	9,80E-04	6,14E-04	7,46E-05
<b>Radiación ionizante (IR)</b>	kBq U <sup>235</sup> eq	2,34E-01	3,77E-02	1,60E-01	3,31E-02	5,12E-04	2,58E-03
<b>Ocupación de terrenos agrícolas (ALO)</b>	m <sup>2</sup> a	3,23E-02	4,96E-03	2,26E-02	4,30E-03	9,54E-05	3,32E-04
<b>Ocupación de terreno urbano (ULO)</b>	m <sup>2</sup> a	4,66E-03	1,09E-03	2,61E-03	4,62E-04	4,64E-04	3,46E-05
<b>Transformación del medio natural (NLT)</b>	m <sup>2</sup>	6,82E-05	4,5747E-06	5,04E-05	9,84E-06	2,64E-06	7,51E-07
<b>Agotamiento de agua (WD)</b>	m <sup>3</sup>	3,76E-03	5,28E-04	2,70E-03	4,72E-04	2,29E-05	3,34E-05
<b>Agotamiento de metales (MD)</b>	kg Fe eq	1,55E-02	1,66E-03	1,20E-02	1,49E-03	2,42E-04	1,06E-04
<b>Agotamiento de combustible fósil (FD)</b>	kg oil eq	1,55E-01	2,43E-02	1,05E-01	2,18E-02	2,43E-03	1,61E-03

**Tabla E8.** Resultados normalización contribución subsistemas escenario 1. Fuente: Realizado a partir de datos obtenidos en SimaPro 7.0.

<b>Categoría de impacto</b>	<b>Total</b>	<b>SS1.1</b>	<b>SS1.2</b>	<b>SS1.3</b>	<b>SS1.4</b>	<b>SS1.5</b>
<b>Cambio climático (CC)</b>	5,01E-05	7,7567E-06	3,43E-05	6,9365E-06	5,93E-07	5,2307E-07
<b>Agotamiento de ozono (OD)</b>	3,55E-06	5,117E-07	2,51E-06	4,3728E-07	5,58E-08	3,3827E-08
<b>Acidificación terrestre (TA)</b>	9,90E-05	1,552E-05	6,78E-05	1,3732E-05	8,55E-07	1,0455E-06
<b>Eutrofización de agua dulce (FE)</b>	4,11E-04	5,89E-05	2,95E-04	5,21E-05	1,37E-06	3,97E-06
<b>Eutrofización marina (ME)</b>	1,24E-05	1,71E-06	8,94E-06	1,49E-06	1,49E-07	1,14E-07
<b>Toxicidad humana (HT)</b>	5,89E-04	7,66E-05	1,69E-04	2,77E-05	3,14E-04	2,08E-06
<b>Formación de oxidantes fotoquímicos (POF)</b>	3,22E-05	5,09E-06	2,17E-05	4,39E-06	7,38E-07	3,31E-07
<b>Formación de material particulado (PMF)</b>	8,32E-05	1,26E-05	5,75E-05	1,11E-05	1,09E-06	8,43E-07
<b>Ecotoxicidad terrestre (TE)</b>	5,46E-04	3,31E-07	1,63E-06	2,79E-07	5,44E-04	2,03E-08
<b>Ecotoxicidad de agua dulce (FE)</b>	8,56E-04	1,68E-04	5,59E-04	9,96E-05	2,16E-05	7,58E-06
<b>Ecotoxicidad marina (ME)</b>	1,02E-03	1,94E-04	6,38E-04	1,13E-04	7,06E-05	8,57E-06
<b>Radiación ionizante (IR)</b>	3,75E-05	6,03E-06	2,57E-05	5,30E-06	8,19E-08	4,13E-07
<b>Ocupación de terrenos agrícolas (ALO)</b>	7,14E-06	1,10E-06	4,99E-06	9,51E-07	2,11E-08	7,35E-08
<b>Ocupación de terreno urbano (ULO)</b>	1,15E-05	2,68E-06	6,42E-06	1,14E-06	1,14E-06	8,50E-08
<b>Transformación del medio natural (NLT)</b>	4,22E-04	2,8318E-05	3,12E-04	6,0888E-05	1,63E-05	4,6506E-06
<b>Agotamiento de agua (WD)</b>	0	0	0	0	0	0
<b>Agotamiento de metales (MD)</b>	2,17E-05	2,33E-06	1,68E-05	2,09E-06	3,39E-07	1,48E-07
<b>Agotamiento de combustible fósil (FD)</b>	9,96E-05	1,56E-05	6,73E-05	1,40E-05	1,56E-06	1,03E-06

**Tabla E9.** Resultados caracterización contribución subsistemas escenario 2. Fuente: Realizado a partir de datos obtenidos en SimaPro 7.0.

Categoría de impacto	Unidades	Total	SS1.1	SS1.2	SS1.3	SS1.4	SS1.5
<b>Cambio climático (CC)</b>	kg CO <sub>2</sub> eq	4,22E-01	0,04174877	3,59E-01	1,38E-02	1,33E-03	6,26E-03
<b>Agotamiento de ozono (OD)</b>	kg CFC-11 eq	5,49E-08	5,3436E-09	4,69E-08	1,70E-09	2,46E-10	7,95E-10
<b>Acidificación terrestre (TA)</b>	kg SO <sub>2</sub> eq	2,58E-03	2,56E-04	2,19E-03	8,36E-05	5,88E-06	3,84E-05
<b>Eutrofización de agua dulce (FE)</b>	kg P eq	1,22E-04	1,17E-05	1,05E-04	3,83E-06	1,14E-07	1,76E-06
<b>Eutrofización marina (ME)</b>	kg N eq	8,58E-05	8,24E-06	7,33E-05	2,68E-06	3,01E-07	1,23E-06
<b>Toxicidad humana (HT)</b>	kg 1,4-DB eq	1,71E-01	1,47E-02	8,41E-02	3,09E-03	6,73E-02	1,40E-03
<b>Formación de oxidantes fotoquímicos (POF)</b>	kg NMVOC	1,36E-03	1,36E-04	1,15E-03	4,42E-05	8,39E-06	2,01E-05
<b>Formación de material particulado (PMF)</b>	kg PM <sub>10</sub> eq	9,11E-04	8,98E-05	7,75E-04	2,93E-05	3,25E-06	1,34E-05
<b>Ecotoxicidad terrestre (TE)</b>	kg 1,4-DB eq	1,55E-03	1,22E-06	1,07E-05	4,11E-07	1,54E-03	1,79E-07
<b>Ecotoxicidad de agua dulce (FE)</b>	kg 1,4-DB eq	6,30E-03	7,09E-04	5,24E-03	1,94E-04	7,31E-05	8,90E-05
<b>Ecotoxicidad marina (ME)</b>	kg 1,4-DB eq	5,78E-03	6,39E-04	4,69E-03	1,74E-04	1,99E-04	7,96E-05
<b>Radiación ionizante (IR)</b>	kBq U <sup>235</sup> eq	1,83E-01	1,83E-02	1,56E-01	5,85E-03	1,02E-04	2,76E-03
<b>Ocupación de terrenos agrícolas (ALO)</b>	m <sup>2</sup> a	2,40E-02	2,37E-03	2,05E-02	7,60E-04	1,91E-05	3,55E-04
<b>Ocupación de terreno urbano (ULO)</b>	m <sup>2</sup> a	2,74E-03	3,51E-04	2,17E-03	8,19E-05	9,27E-05	3,69E-05
<b>Transformación del medio natural (NLT)</b>	m <sup>2</sup>	5,33E-05	4,1024E-06	4,62E-05	1,74E-06	5,27E-07	8,02E-07
<b>Agotamiento de agua (WD)</b>	m <sup>3</sup>	2,51E-03	2,44E-04	2,15E-03	8,43E-05	4,57E-06	3,57E-05
<b>Agotamiento de metales (MD)</b>	kg Fe eq	8,65E-03	7,69E-04	7,45E-03	2,66E-04	4,85E-05	1,13E-04
<b>Agotamiento de combustible fósil (FD)</b>	kg oil eq	1,16E-01	1,15E-02	9,82E-02	3,89E-03	4,86E-04	1,72E-03

**Tabla E10.** Resultados normalización contribución subsistemas escenario 2. Fuente: Realizado a partir de datos obtenidos en SimaPro 7.0.

<b>Categoría de impacto</b>	<b>Total</b>	<b>SS1.1</b>	<b>SS1.2</b>	<b>SS1.3</b>	<b>SS1.4</b>	<b>SS1.5</b>
<b>Cambio climático (CC)</b>	3,76E-05	3,724E-06	3,20E-05	1,23E-06	1,19E-07	5,58E-07
<b>Agotamiento de ozono (OD)</b>	2,49E-06	2,426E-07	2,13E-06	7,73E-08	1,12E-08	3,61E-08
<b>Acidificación terrestre (TA)</b>	7,50E-05	7,45E-06	6,38E-05	2,43E-06	1,71E-07	1,12E-06
<b>Eutrofización de agua dulce (FE)</b>	2,94E-04	2,83E-05	2,52E-04	9,22E-06	2,74E-07	4,24E-06
<b>Eutrofización marina (ME)</b>	8,47E-06	8,15E-07	7,24E-06	2,64E-07	2,98E-08	1,22E-07
<b>Toxicidad humana (HT)</b>	2,71E-04	2,34E-05	1,34E-04	4,92E-06	1,07E-04	2,22E-06
<b>Formación de oxidantes fotoquímicos (POF)</b>	2,39E-05	2,39E-06	2,02E-05	7,78E-07	1,48E-07	3,53E-07
<b>Formación de material particulado (PMF)</b>	6,11E-05	6,03E-06	5,20E-05	1,97E-06	2,18E-07	9,00E-07
<b>Ecotoxicidad terrestre (TE)</b>	1,88E-04	1,47E-07	1,29E-06	4,98E-08	1,86E-04	2,17E-08
<b>Ecotoxicidad de agua dulce (FE)</b>	5,73E-04	6,45E-05	4,76E-04	1,76E-05	6,65E-06	8,09E-06
<b>Ecotoxicidad marina (ME)</b>	6,65E-04	7,35E-05	5,39E-04	2,00E-05	2,29E-05	9,15E-06
<b>Radiación ionizante (IR)</b>	2,93E-05	2,93E-06	2,50E-05	9,36E-07	1,64E-08	4,41E-07
<b>Ocupación de terrenos agrícolas (ALO)</b>	5,31E-06	5,25E-07	4,53E-06	1,68E-07	4,21E-09	7,84E-08
<b>Ocupación de terreno urbano (ULO)</b>	6,73E-06	8,64E-07	5,35E-06	2,02E-07	2,28E-07	9,08E-08
<b>Transformación del medio natural (NLT)</b>	3,30E-04	2,5394E-05	2,86E-04	1,08E-05	3,26E-06	4,97E-06
<b>Agotamiento de agua (WD)</b>	0	0	0	0	0	0
<b>Agotamiento de metales (MD)</b>	1,21E-05	1,08E-06	1,04E-05	3,73E-07	6,79E-08	1,58E-07
<b>Agotamiento de combustible fósil (FD)</b>	7,45E-05	7,41E-06	6,31E-05	2,50E-06	3,12E-07	1,10E-06

## ANEXO F. Resultados del análisis de costes.

En el presente anexo se exponen los resultados detallados del análisis de costes para cada escenario.

Las *Tablas F1, F2 y F3* se corresponden con los costes fijos, los costes variables y la amortización calculada, para el escenario 1 (primer semestre del año 2.015)

**Tabla F1.** Resultados de costes fijos en el escenario 1. Fuente: Elaboración propia.

Escenario 1: 2015				
COSTES FIJOS				
<b>PERSONAL</b>				
Puesto	% dedicación	Unidades	Coste unitario (€)	Coste (€)
Jefe de explotación	75,00%	1	44.100,00 €	33.075,00 €
Operario de planta	100,00%	3	27.500,00 €	82.500,00 €
Administrativo	50,00%	1	24.100,00 €	12.050,00 €
			<b>Total</b>	<b>127.625,00 €</b>
<b>MANTENIMIENTO</b>				
Tipo	Porcentaje (%)	Inversión de referencia (€)	Coste (€)	
Equipos electromecánicos	2,5	965.495,74 €	24.137,39 €	
Obra civil. Accesorios y varios	2,25	1.323.568,12 €	29.780,28 €	
Electricidad y automatismos	2,5	842.655,35 €	21.066,38 €	
			<b>Total</b>	<b>74.984,06 €</b>
<b>TÉRMINO FIJO DE ELECTRICIDAD</b>				
Tipo	Precio kW contratado (€)	kW	Coste (€)	
Coste del término de potencia	53	400	21.200,00 €	
			<b>Total</b>	<b>21.200,00 €</b>
<b>COSTES FIJOS GENERALES</b>				
Tipo	Ratio (€/h-e)	Población de diseño (h-e)	Coste (€)	
Laboratorio	0,31	13500	4.185,00 €	
Gastos generales oficina y comunicación	0,23	13500	3.105,00 €	
Seguros	0,15	13500	2.025,00 €	
			<b>Total</b>	<b>9.315,00 €</b>
Tipo	Coste EPI/persona	Personas	Coste (€)	
Equipos de protección individual (EPI)	60	3	180,00 €	
			<b>Total</b>	<b>180,00 €</b>

**Tabla F2.** Resultados de costes variables en el escenario 1. Fuente: Elaboración propia.

<b>COSTES VARIABLES</b>					
<b>ELECTRICIDAD</b>					
Tipo	Coste medio €/kW	Consumo medio kWh/año		Coste (€)	
Coste del término de potencia	0,099	545137,4		53.968,60 €	
				<b>Total</b>	<b>53.968,60 €</b>
<b>GESTIÓN DE RESIDUOS</b>					
Tipo	Ratio (kg/m3 )	Producción teórica (Tn)	Producción real (Tn)	Coste unitario(€)	Coste (€)
Desbaste	0,03	24,99786	66,14	100,00 €	6.614,00 €
Arenas	0,0125	10,415775	0	30,00 €	312,47 €
Grasas	0,0015	1,249893	0	150,00 €	187,48 €
Fango	0,3	249,9786	455,2	70,00 €	31.864,00 €
				<b>Total</b>	<b>38.977,96 €</b>
<b>PRODUCTOS CONSUMIBLES</b>					
Tipo	Ratio (kg/Tn MS fango)	Consumo teórico (kg)	Consumo real (kg)	Coste unitario(€)	Coste (€)
Polielectrolito	4	364,16	750	3	<b>2.250,00 €</b>
Cloruro férrico	0,0514	42829,6668	16000	0,3	<b>4.800,00 €</b>
<b>OTROS</b>					
Tipo	nº lámparas	precio unitario (€)	vida útil (años)	Coste (€)	
Lámparas UV	24	250	1,5	4000	

**Tabla F3.** Resultados de la amortización para el escenario 1. Fuente: Elaboración propia.

<b>AMORTIZACIÓN 2015</b>					
Tipo de elemento	Inversión (€)	Año	Precio actualizado Base 2017	Vida útil	Amortización anual (€)
Equipos electromecánicos	663.645,83 €	1.999,00	677.790,17 €	10	67.779,02 €
	826.903,32 €	2.010,00	827.030,29 €	10	82.703,03 €
Obra civil	909.771,45 €	1.999,00	929.161,49 €	40	23.229,04 €
	309.681,38 €	2.010,00	309.728,93 €	40	7.743,22 €
Varios	22.500,00 €	2.010,00	22.503,45 €	6	3.750,58 €
Automatismos	579.209,92 €	1.999,00	591.554,67 €	10	59.155,47 €
				<b>Total</b>	<b>244.360,35 €</b>

Las *Tablas F4, F5, y F6* se corresponden con los costes fijos, los costes variables y la amortización calculada, para el escenario 2 (primer semestre del año 2.016)

**Tabla F4.** Resultados de costes fijos en el escenario 2. Fuente: Elaboración propia.

<b>Escenario 2: 2016</b>				
<b>COSTES FIJOS</b>				
<b>PERSONAL</b>				
Puesto	0	0	Coste unitario (€)	Coste (€)
Jefe de explotación	75,00%	100%	33.075,00 €	33.075,00 €
Operario de planta	100,00%	300%	82.500,00 €	82.500,00 €
Administrativo	50,00%	100%	12.050,00 €	12.050,00 €
			<b>Total</b>	<b>127.625,00 €</b>
<b>MANTENIMIENTO</b>				
Tipo	Porcentaje (%)	Inversión de referencia (€)	Coste (€)	
Equipos electromecánicos	2,50	965.495,74 €	24.137,39 €	
Obra civil. Accesorios y varios	2,25	1.323.568,12 €	29.780,28 €	
Electricidad y automatismos	2,50	842.655,35 €	21.066,38 €	
			<b>Total</b>	<b>74.984,06 €</b>
<b>TÉRMINO FIJO DE ELECTRICIDAD</b>				
Tipo	ecio kW contratado (	0	Coste (€)	
Coste del término de potencia	53,00	400,00	21.200,00 €	
			<b>Total</b>	<b>21.200,00 €</b>
<b>COSTES FIJOS GENERALES</b>				
Tipo	Ratio (€/h-e)	Población de diseño (h-e)	Coste (€)	
Laboratorio	0,31	13.500,00	4.185,00 €	
Gastos generales oficina y comunicación	0,23	13.500,00	3.105,00 €	
Seguros	0,15	13.500,00	2.025,00 €	
			<b>Total</b>	<b>9.315,00 €</b>
Tipo	Coste EPI/persona	Personas	Coste (€)	
Equipos de protección individual (EPI)	60	3	180,00 €	
			<b>Total</b>	<b>180,00 €</b>

**Tabla F5.** Resultados de costes variables en el escenario 2. Fuente: Elaboración propia.

<b>ELECTRICIDAD</b>					
Tipo	Coste medio €/kW	Consumo medio kWh/año		Coste (€)	
Coste del término de potencia	0,10	453.220,00		44.868,78 €	
				<b>Total</b>	<b>44.868,78 €</b>
<b>GESTIÓN DE RESIDUOS</b>					
Tipo	Ratio (kg/m <sup>3</sup> )	Producción teórica (Tn)	Producción real (Tn)	Coste unitario(€)	Coste (€)
Desbaste	0,03	55,69	66,14	100,00 €	6.614,00 €
Arenas	0,0125	23,21	0,00	30,00 €	0,00 €
Grasas	0,0015	2,78	0,00	150,00 €	0,00 €
Fango	0,3	556,95	236,50	70,00 €	16.555,00 €
				<b>Total</b>	<b>23.169,00 €</b>
<b>PRODUCTOS CONSUMIBLES</b>					
Tipo	Ratio (kg/Tn MS fango)	Consumo teórico (kg)	Consumo real (kg)	Coste unitario(€)	Coste (€)
Polielectrolito	4	445,56	150,00	3,00	<b>1.336,67 €</b>
Cloruro férrico	0,0514	95.423,69	3.130,30	0,30	<b>939,09 €</b>
<b>OTROS</b>					
Tipo	nº de lámparas	Precio (€)		vida útil (años)	Coste (€)
Lámparas UV	24	250		1,50	<b>4.000,00 €</b>

**Tabla F6.** Resultados de amortización del escenario 1. Fuente: Elaboración propia.

<b>AMORTIZACIÓN 2016</b>					
Tipo de elemento	Inversión (€)	Año	Precio actualizado Base 2017	Vida útil	Amortización anual (€)
Equipos electromecánicos	663.645,83 €	1.999,00	677.790,17 €	10	67.779,02 €
	826.903,32 €	2.010,00	827.030,29 €	10	82.703,03 €
	402.249,68 €	2.015,00	404.742,31 €	10	40.474,23 €
Obra civil	1.323.568,12 €	1.999,00	1.351.777,44 €	40	33.089,20 €
	309.681,38 €	2.010,00	309.728,93 €	40	7.742,03 €
	299.541,09 €	2.015,00	301.397,27 €	40	7.488,53 €
Varios	22.500,00 €	2.010,00	22.503,45 €	6	3.750,00 €
	35.440,47 €	2.015,00	35.660,09 €	6	5.906,75 €
Automatismos	842.655,35 €	1.999,00	3.930.629,94 €	10	84.265,54 €
	278.649,64 €	2.015,00	6.356.439,43 €	10	27.864,96 €
				<b>Total</b>	<b>361.063,29 €</b>